



# AGENDA



*Rutschung Spitze Stei oberhalb des Oeschinensees, Kandersteg. Foto: Valentin Raemy*

## Inhalt

(Wie) ist der Bund für künftige Herausforderungen im Bereich Naturgefahren gewappnet?.....	4
RadNAP : Ein radargestütztes Frühwarnsystem.....	10
Bergsturzzenarien bei der Rutschung Brienz/Brinzauls (GR) – Probabilistische Ansätze zur Abschätzung der Prozessräume.....	18
Murgangschutzbauwerk Meretschi, Wallis – Planung mit 3D-Modell – Optimierung mit Modellversuchen.....	26
Service de géo-information pour glissements dans les Alpes.....	34
Klimawandel und Schutzwald.....	38
Rutschung Brienz/Brinzauls (GR): Sondierstollen zur Prüfung der Wirksamkeit einer Tiefendrainage.....	44
Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren im Hochgebirge.....	49
Monitoring and Hazard Management at the Spitze Stei Rockslide, Kandersteg.....	54

**Herausgeber / Editeur**

FAN Fachleute Naturgefahren Schweiz

**Offizielle Adresse / Adresse officielle**

Christoph Graf, WSL  
 Zürcherstrasse 111  
 8903 Birmensdorf  
 Tel. 044 739 24 54, E-Mail: christoph.graf@wsl.ch

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

FAN Sekretariat c/o geo7 AG  
 Neufeldstrasse 5-9, 3012 Bern  
 Tel. 031 300 44 33  
 E-Mail: kontakt@fan-info.ch  
 Internet: <http://www.FAN-Info.ch>

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

Jean-Jacques Thormann, HAFL, Zollikofen  
 Alexandre Badoux, WSL, Birmensdorf  
 Martin Frei, MFrei Infra GmbH, Amriswil  
 Bernard Loup, BAFU, Ittigen

**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 400 Mitglieder aus der ganzen Schweiz. Mitgliedschaftsanträge sind an den Präsidenten oder Sekretär zu richten. Die Mitgliedschaft in der FAN kostet Fr. 100.– / Jahr und steht allen Fachleuten aus dem Bereich Naturgefahren offen.

**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 400 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. 100.– / an. Elle est ouverte à tous les spécialistes des dangers naturels.

# Avant-propos

Chères lectrices, chers lecteurs

Chers membres de la FAN

Le premier forum numérique multilingue de la FAN est derrière nous et a été un succès. En raison de la situation liée à la Covid-19, il n'a pas été possible d'organiser l'événement de la manière habituelle et appréciée en présentiel. La FAN était relativement bien préparée à ce changement de cap, puisqu'elle s'est engagée dans une voie de plus en plus numérique depuis environ deux ans, suivant la tendance générale de la numérisation. Avec le webinaire, réparti sur trois sessions de conférences sur plusieurs jours, elle a poursuivi ces efforts. En outre, c'était la première fois que l'idée d'une organisation du Forum FAN sous une forme plus proche de la conférence, qui avait été suggérée à plusieurs reprises depuis plusieurs années, pouvait être prise en compte.

Le thème "Approches novatrices de la gestion des dangers naturels : données de base – enchaînements de processus - changement climatique" promettait des présentations passionnantes sur un sujet tourné vers l'avenir. Le forum a débuté par une keynote du Dr Jürg Schweizer, directeur du SLF et du nouveau centre de recherche sur le changement climatique, les événements extrêmes et les dangers naturels dans la région alpine à Davos (CERC), qui a suivi l'assemblée générale. Il y a examiné les effets du changement climatique sur les processus de dangers naturels sous différents angles. Les autres présentations ont été suivies de deux autres sessions en soirée d'environ deux heures. Les sujets des présentations étaient extrêmement vastes, ce qu'impliquait le thème du Forum FAN, qui pouvait être interprété librement. Pour l'essentiel, les contributions ont été réparties selon les trois grands thèmes suivants :

- Approches novatrices des solutions en termes de données de base, de modélisation, d'évaluation des dangers sous différents angles (par exemple, fédéral, cantonal, ingénierie).
- Les défis de l'élaboration de scénarios en ce qui concerne les enchaînements de processus (par exemple, en ce qui concerne les incertitudes, la planification d'urgence).
- Influence du changement climatique sur les situations de dangers naturels et le développement des processus de danger. (par exemple, les changements possibles concernant les incertitudes, les impacts possibles sur la planification d'urgence, ou la classification et la prise en compte des événements majeurs dans la mise en œuvre)

L'équipe d'intervenants était composée de représentants de la Confédération et des cantons ainsi que d'experts du secteur privé. Les présentations préenregistrées ont été diffusées le soir des conférences et complétées par une discussion en direct entre les intervenants.

Comme d'habitude, vous pouvez maintenant lire les contributions écrites aux présentations dans le FAN-AGENDA actuel. Nous clôturons ainsi le Forum FAN 2021, qui a connu un grand succès.

Nous espérons que vous apprécierez la lecture !

*Daniel Tobler (représentant de l'équipe de préparation) et Christoph Graf (Président FAN)*

# Vorwort

Liebe Leserinnen, liebe Leser

Liebe Mitglieder der FAN

Das erste mehrsprachige digitale FAN-Forum ist Geschichte und war ein Erfolg. Bedingt durch die Corona-Situation war die gewohnte und beliebte Durchführung vor Ort nicht möglich. Die FAN war auf diesen Richtungswechsel relativ gut vorbereitet, beschreitet sie doch seit rund zwei Jahren einen zunehmend digitalen Weg und folgt damit dem allgemeinen Trend der Digitalisierung. Mit dem Webinar, verteilt auf drei Vortragsessions an mehreren Tagen, verfolgte sie diese Bestrebungen weiter. Zudem konnte damit dem seit mehreren Jahren immer wieder eingebrachten Gedanken einer vermehrt konferenzzähnlichen Organisation des FAN-Forums erstmals Rechnung getragen werden.

Das Thema «Innovative Lösungsansätze im Naturgefahrenmanagement: Grundlagen – Prozessketten – Klimawandel» versprach spannende Vorträge zu einem zukunftsorientierten Thema. Das Forum startete mit einer an die Mitgliederversammlung angeschlossenen Keynote von Dr. Jürg Schweizer, dem Leiter des SLF und des neuen Forschungszentrums für Klimawandel, Extremereignisse und Naturgefahren im alpinen Raum in Davos (CERC). Darin beleuchtete er die Auswirkungen des Klimawandels auf die Naturgefahrenprozesse aus verschiedenen Perspektiven. Die weiteren Vorträge folgten an zwei weiteren rund zweistündigen Abendsessionen. Die Themenbereiche der Referate waren äusserst breit gefasst, was durch das offen interpretierbare Thema des FAN-Forums impliziert wurde. Im Wesentlichen gliederten sich die Beiträge in die folgenden drei Hauptthemen:

- Innovative Lösungsansätze in Bezug auf Grundlagen, Modellierungen, Gefahrenbeurteilung aus verschiedenen Perspektiven (z.B. Bund, Kanton, Ingenieurbüro).
- Herausforderungen bei der Szenarienbildung in Bezug auf Prozessketten (z.B. bezüglich Unsicherheiten, Notfallplanung)
- Einfluss des Klimawandels auf die Naturgefahrensituationen und die Entwicklung der Gefahrenprozesse. (z.B. mögliche Änderungen hinsichtlich der Unsicherheiten, mögliche Auswirkungen auf die Notfallplanungen, oder Einstufung und Berücksichtigung von Grossereignissen in der Umsetzung)

Das Referententeam setzte sich aus Bundes- und Kantonsvertretern sowie aus Experten der Privatwirtschaft zusammen. Die im Voraus aufgezeichneten Vorträge wurden an den Vortragsabenden abgespielt und mit einer anschliessenden Live-Podiumsdiskussion der Referenten abgerundet.

Wie üblich, können Sie nun die schriftlichen Beiträge zu den Vorträgen in der vorliegenden FAN-AGENDA nachlesen. Damit runden wir das äusserst erfolgreiche FAN-Forum 2021 ab.

Viel Spass bei der Lektüre!

*Daniel Tobler (Vertreter Vorbereitungsteam) und Christoph Graf (Präsident FAN)*

# (Wie) ist der Bund für künftige Herausforderungen im Bereich Naturgefahren gewappnet?

Josef Eberli <sup>1</sup> (Josef.Eberli@bafu.admin.ch)  
 Carolin Schärpf <sup>1</sup> (Carolin.Schaerpf@bafu.admin.ch)

<sup>1</sup> BAFU, Abteilung Gefahrenprävention, Ittigen

## Résumé

L'avenir présente des défis que nous devons relever dans la gestion des dangers naturels. Il s'agit de maintenir à un niveau tolérable le risque en forte augmentation en Suisse. Le risque est accru par les effets du changement climatique et par l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes que cela entraîne. Cette augmentation du danger se superpose au risque toujours croissant dû à la colonisation et au développement des infrastructures. Il convient d'accorder une attention particulière à l'évolution à long terme des risques, de les gérer judicieusement et de les limiter par des mesures efficaces. À cette fin, il faut améliorer la connaissance de la situation des dangers et des risques, mettre en œuvre des mesures de protection adéquates et compléter le cadre juridique.

Le concept de gestion intégrale des risques (GIR) permet de traiter de manière globale les différents dangers naturels, leurs combinaisons et les incertitudes associées. C'est également l'instrument approprié pour faire face aux défis futurs dans des conditions changeantes - notamment celles que nous attendons du changement climatique.

## Zusammenfassung

Die Zukunft weist Herausforderungen auf, die wir im Umgang mit Naturgefahren angehen müssen, um das erheblich steigende Risiko in der Schweiz auf einem tragbaren Niveau halten zu können. Durch die Auswirkungen des Klimawandels und die daraus folgenden häufigeren Extremereignisse nimmt die Gefährdung

zu. Diese Gefährdungszunahme überlagert das weiterhin wachsende Risiko aufgrund der Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung. Es gilt das Augenmerk vermehrt auf die langfristige Risikoentwicklung zu richten, diese sinnvoll zu steuern und mit wirkungsvollen Massnahmen zu begrenzen. Dazu müssen die Kenntnisse über die Gefahren- und Risikosituation verbessert, adäquate Schutzmassnahmen umgesetzt und die gesetzlichen Rahmenbedingungen ergänzt werden.

Das Konzept des integralen Risikomanagements IRM erlaubt es, umfassend mit verschiedenen Naturgefahren, ihren Kombinationen und den damit verbundenen Unsicherheiten umzugehen. Es ist auch unter sich ändernden Bedingungen – vor allem wie wir sie durch den Klimawandel erwarten - das geeignete Instrument, um mit den künftigen Herausforderungen umzugehen.

## Einleitung

Die Intensivierung der Raumnutzung mit der Ausdehnung der Siedlungen und der Infrastrukturen in potenzielle Gefahrengebiete und der Wertsteigerung vergrössern das Schadenpotenzial und damit die Risiken in Bezug auf Naturgefahren laufend.

Zusätzlich verschärfen sich die Risiken aus Naturgefahren durch die Änderung des Klimas. Aufgrund der erhöhten Temperaturen und der Veränderungen im Niederschlagsregime ist mit einer deutlichen Zunahme an Murgängen, Rutschungen und Hochwassern, insbesondere von Oberflächenabfluss, zu rechnen. Aber nicht nur die Häufigkeit der Naturereignisse, auch deren Intensität dürfte zunehmen. Die Ereignisse werden in Zukunft jahreszeitlich und regional anders auftreten. Die Zunahme der Winterniederschläge und der gleichzeitige Anstieg der Schneefallgrenze führen zu einem erhöhten Hochwasserrisiko in

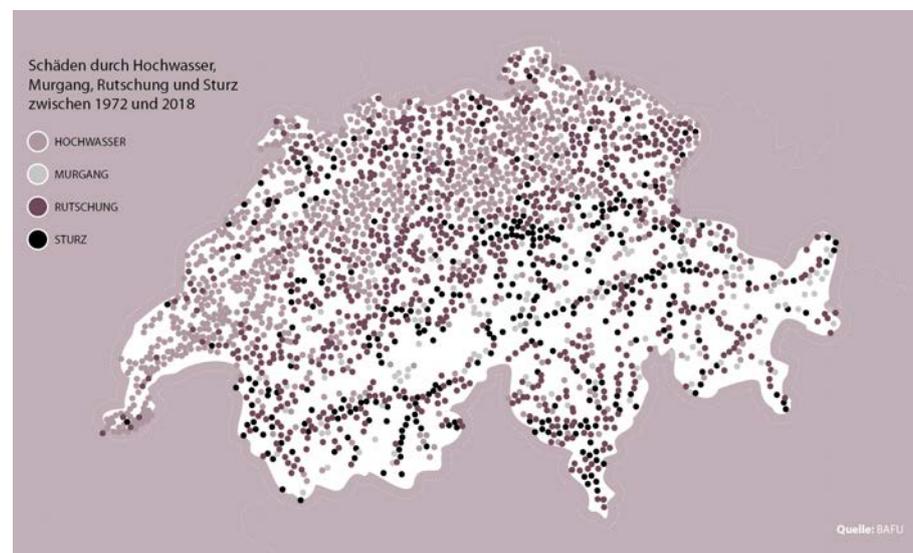


Abbildung 1: Die Verteilung der Schadenergebnisse der letzten 40 Jahre zeigt, dass die ganze Schweiz und nicht nur der Alpenraum von Naturereignissen betroffen sind.

den Wintermonaten. Infolge der erwarteten Häufung und Intensivierung von Starkniederschlägen muss auch in den übrigen Jahreszeiten mit einem steigenden Hochwasserrisiko gerechnet werden. Gleichzeitig werden wir in den niederschlagsarmen Sommermonaten häufiger mit Waldbränden und Dürren konfrontiert sein. Die höheren Temperaturen treiben im Gebirge die Gletscherschmelze und das Auftauen des Permafrosts voran, was zu einer Destabilisierung von Felsflanken und Hängen aus Lockergestein führt. Insgesamt wird sich die Gefährdungssituation saisonal und regional verändern und akzentuieren.

Die Ereignisse der letzten Jahre verdeutlichen auch, dass die Auswirkungen des Klimawandels nicht erst in der Zukunft zu erwarten, sondern bereits heute sichtbar sind (siehe Abb. 1). Bestehende Schutzkonzepte müssen daher so angepasst oder erneuert werden, dass sie den Anforderungen unter einem sich ändernden Klima gerecht werden und ihre Funktion auch langfristig gewährleisten können. Nur so kann verhindert werden, dass die Risiken aufgrund der Siedlungsentwicklung und des Klimawandels trotz allen Schutzanstrengungen stetig weiter ansteigen. Der Umgang mit den Risiken aus Naturgefahren stellt auch weiterhin eine anspruchsvolle Verbund- und Daueraufgabe dar.

## **Auf welche strategischen Grundlagen können wir uns abstützen?**

### **Strategie Naturgefahren Schweiz**

Ein gemeinsames Verständnis und eine gemeinsame Vision besteht in der Schweiz dank der «Strategie Naturgefahren Schweiz» von 2003, welche im Jahr 2018 unter dem Titel «Umgang mit Risiken aus Naturgefahren» von der Plattform Naturgefahren (PLANAT) aktualisiert wurde. Sie definiert die Ziele im Umgang mit Risiken aus Naturgefahren und erläutert,

nach welchen Grundsätzen sie zu erreichen sind. Bewährte Elemente wurden in der aktualisierten Strategie weiterverfolgt und weiterentwickelt, so zum Beispiel der Ansatz des integralen Risikomanagements. Als Ziel wird formuliert, dass mit risikobasiertem Handeln eine angemessene Sicherheit vor Naturgefahren geschaffen und diese langfristig erhalten wird.

### **Bericht «Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz»**

Der Bericht «Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz» (2016) wurde unter Einbezug aller relevanten Akteurinnen und Akteure erarbeitet. Er identifiziert neben dem aktuellen Stand auch den Handlungsbedarf für die Umsetzung des IRM. Die festgelegten 67 Massnahmen zur vollständigen Umsetzung des integralen Risikomanagements bilden den Aktionsplan zur Strategie «Umgang mit Risiken aus Naturgefahren». Neben den gravitativen Naturgefahren wurden auch klimatisch-meteorologische Gefahren wie Sturm, Starkregen, Hagel, Blitzschlag oder Waldbrand, sowie Erdbeben berücksichtigt.

Im Jahr 2020 wurde dem Bundesrat erstmals über den Arbeitsfortschritt Bericht erstattet (BAFU, 2020). Der Stand der Umsetzung aller Massnahmen beträgt aktuell 32 %. Ziel ist es, dass bis 2030 bereits 90 % der Massnahmen und bis 2040 alle 67 Massnahmen vollständig umgesetzt sind.

### **Rechtsanpassung – fit für die Zukunft**

Für die Umsetzung von 19 der 67 Massnahmen aus dem Bericht Naturgefahren ist eine Rechtsanpassung erforderlich. Diese ist als Teilrevision des Bundesgesetzes über den Wasserbau (WBG) mit inhaltlichen Anpassungen im Waldgesetz (WaG) und Gewässerschutzgesetz (GschG) angelegt.

Die vorgeschlagenen Gesetzesänderungen richten sich einerseits an der Strategie «Umgang mit Risiken aus Naturgefahren» aus, andererseits nehmen sie das in der Praxis bereits vielerorts gelebte integrale Risikomanagement ins Gesetz auf. Damit soll erreicht werden, dass das angestrebte Schutzniveau, auf welchem der ökonomische Erfolg der Schweiz aufbaut, auch langfristig gehalten und mittelfristig mit den bestehenden Finanzmitteln gewährleistet werden kann.

Bei der Gesetzesrevision geht es auch darum, den Risikobegriff und die risikobasierte Massnahmenplanung im Gesetz zu verankern. Dazu bilden Risikoübersichten und Gesamtplanungen der Kantone und des Bundes eine wichtige Grundlage, die nach Vorliegen der Gefahrenkarten nun schweizweit zu erarbeiten sind. In Zukunft sollen raumplanerische Massnahmen risikobasiert umgesetzt, Überlastfallkonzepte berücksichtigt und Freihalteräume ausgeschieden werden. Weiter sollen künftig alle Schutzmassnahmen (planerisch, organisatorisch, biologisch, technisch) für eine optimale Massnahmenkombination gleichwertig durch den Bund gefördert werden können. An den bestehenden Zuständigkeiten zwischen Bund und Kantonen sowie der Verbundaufgabe wird festgehalten.

Die Gesetzesvorlage wurde unter Einbezug der Kantone und der betroffenen Akteurinnen und Akteure erarbeitet und ging im April 2021 in die Vernehmlassung. Parallel zur Gesetzesrevision werden die Präzisierungen in den Verordnungen, sowie die Erarbeitung entsprechender Vollzugsinstrumente in Angriff genommen. Dazu zählt unter anderem auch das Handbuch zur Programmvereinbarung im Umweltbereich, welches sich ab der Periode 2025 – 2028 auf die neue Bundesgesetzgebung abstützen wird. Dabei werden auch die Kriterien für Mehrleistungen angepasst wer-

den. Um die Planungen möglichst frühzeitig darauf ausrichten zu können, werden die Anpassungen nach Absprache mit den Kantonen gegen Ende 2021 bekannt gegeben.

### Was sind die wichtigsten Instrumente, um den Herausforderungen zu begegnen?

Der Bericht «Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz» zeigt, dass bereits sehr viel im Bereich des IRM erreicht wurde. Die Gesetzesanpassungen ermöglichen es nun, die dort aufgezeigten Lücken zu schliessen und so besser für die bestehenden und künftigen Herausforderungen gewappnet zu sein. Im Folgenden werden die wichtigsten Handlungsfelder kurz skizziert.

#### Risikoübersichten zeigen - was auf dem Spiel steht

In den letzten 30 Jahren wurden schweizweit Gefahrenkarten für die meisten gravitativen Gefahrenprozesse erstellt. Das IRM erfordert jedoch auch flächige Risikogrundlagen bezüglich Naturgefahren mit möglichst quantifizierten Sach- und Personenrisiken. Um Widersprüche zu vermeiden und damit die kantonalen Risikoübersichten anschliessend auch schweizweit aggregiert werden können, ist es unerlässlich, dass sich die Kantone und der Bund auf gemeinsame Standards zur Ermittlung der Risiken festlegen. Diese Standards wurden in Absprache mit den Kantonen bereits festgelegt und publiziert (BAFU, 2020). Das ermöglicht es, die Risikoübersichten schweizweit bis 2030 zu erarbeiten.

#### Gesamtplanungen - Handlungsbedarf erkennen und Prioritäten setzen

Strategische Gesamtplanungen dienen dazu, den Handlungsbedarf zu erkennen, Handlungsoptionen zu ermitteln und die prioritären Massnahmen zur langfristigen und effektiven Risikobegrenzung festzulegen. Die Gesamt-

planungen stützen sich auf die Risikoübersichten und beziehen die zu erwartende Risikoentwicklung mit ein. Sie umfassen im Weiteren das Inventar der Schutzbauten und die erforderlichen Finanzmittel für den Erhalt der Schutzinfrastruktur. Diese Finanzmittel ergänzt mit den Kosten zusätzlicher Massnahmen zeigen den längerfristigen Finanzierungsbedarf auf. Diese Übersicht dient sowohl den Kantonen als auch dem Bund dazu, die erforderlichen Finanzmittel bereitstellen zu können. Gesamtplanungen helfen, Prioritäten auf die wirtschaftlichsten und am schnellsten wirksamen Massnahmen zur Risikobegrenzung zu setzen. Die nationale Gesamtplanung wird auf den kantonalen Planungen basieren. Die Methodik wird seit 2018 in Zusammenarbeit von Bund und Kantonen entwickelt.

#### Massnahmen optimal kombinieren

Mit einer optimalen Massnahmenkombination, also der effektivsten Kombination von planerischen, organisatorischen, biologischen und technischen Massnahmen wird der Risikoanstieg kostengünstig und langfristig begrenzt. Dabei werden Massnahmen der Gefahrenabwehr, mit Massnahmen welche die Exposition und Verletzlichkeit der Nutzungen reduzieren, situativ und optimal kombiniert.

#### Risikobasierte Raumplanung

Die Umsetzung der risikobasierten Raumplanung, zu welcher Empfehlungen bereits 2005 publiziert wurden, muss in Zukunft verstärkt angewendet werden. Bei der risikobasierten Raumplanung liegt der Fokus nicht auf der Gefährdung, sondern es werden bestehende und künftige Risiken in die Planung einbezogen und die Raumnutzung in der Folge entsprechend angepasst und somit das Schadenpotential reduziert.

Die Berücksichtigung von Extremereignissen bzw. des Überlastfalls sind entscheidende Komponenten der risikobasierten Raumplanung. Mit der Schaffung von Freihalteräumen, wie zum Beispiel Überlastkorridoren, die von weiteren Gebäuden und Anlagen freigehalten werden, wird erreicht, dass Hochwasser möglichst ungehindert und schadensarm abfliessen kann. Freihalteräume sollen auch dazu dienen, frühzeitig Gebiete vor einer Intensivierung der Nutzung freizuhalten, in denen sich beispielsweise aufgrund des auftauenden Permafrostes neue brutale Prozesse wie Blockschlag, Felssturz, oder häufigere Hangmuren abzeichnen.

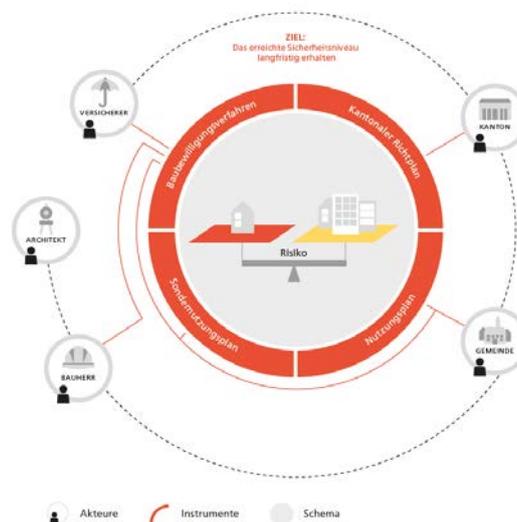


Abbildung 2: Risikoabwägung (Mitte), Akteure und Instrumente, um die Risikoentwicklung langfristig zu steuern (EBP, 2019)

Die risikobasierte Raumplanung gelingt nur, wenn Risikoübersichten vorliegen, die bisherige und zukünftige Risikoentwicklungen den Planern und Entscheidungsträgerinnen bewusst sind und die Planungs- sowie Baubewilligungsverfahren zur Risikobegrenzung genutzt werden. Neben den Gemeinden und Kantonen spielen die Bauherrschaft und Architektinnen und Architekten sowie die Gebäudeversicherungen eine wichtige Rolle.

### **Synergien nutzen – mit der Siedlungswirtschaft zusammenarbeiten**

Die Entwässerungssysteme im urbanen Raum sind nicht auf seltene Niederschlagsereignisse ausgelegt. Bei Starkniederschlägen können jedoch durch Oberflächenabfluss hohe Schäden entstehen, wie die jüngsten Ereignisse in Lausanne, Sion oder Zofingen (Abb. 3) gezeigt haben. Aufgrund der Häufung solcher Ereignisse sind auch diese Entwässerungssysteme mit Überlastkonzepten zu ergänzen. Die Grundlagen und Methoden für dieses Integrierte Regenwassermanagement (IRWM) werden zurzeit vom VSA und dem BAFU gemeinsam mit ausgewählten Kantonen und weiteren Stakeholdern erarbeitet. Das Projekt «Regenwasser im Siedlungsraum: Starkniederschläge und Regenwasserbewirtschaftung in der klimangepassten Entwicklung» (BAFU, Publikation geplant Herbst 2021) befasst sich ebenfalls mit dieser Thematik, welche mit dem Klimawandel zunehmend an Bedeutung gewinnt.

### **Wie gehen wir mit der Klimaänderung um?**

Im Alpenraum ist die Erwärmung seit dem späten 19. Jahrhundert rund doppelt so stark wie im globalen Mittel. Die Schweiz ist von den Auswirkungen des Klimawandels also besonders betroffen. Der Klimawandel wirkt sich bereits heute auf die gravitativen Naturprozesse aus und beeinflusst die Naturgefahrensituation.

Für den Naturgefahrenbereich gilt generell: Was bereits heute gilt, wird mit den Auswirkungen des Klimawandels noch wichtiger: Extremereignisse, Prozessverkettungen und Kombinationen von Ereignissen müssen in alle Überlegungen bei der Erarbeitung von Gefahren- und Risikogrundlagen und bei der Massnahmenplanung einfließen. Sollten keine exakteren Informationen zur Entwicklung vorhanden sein, so wird empfohlen, dass man sich auf pessimistische Szenarien stützt, insbesondere bei der Anpassung der Raumnutzung, bei technisch-baulichen Schutzmassnahmen und bei den Einsatzplanungen. Der Grundsatz robuster, anpassbarer und überlastbarer Schutzkonzepte und Massnahmen wird mit dem Klimawandel noch wichtiger.

Betrachtet man die Schritte des IRM «Risiken erfassen – bewerten – steuern», stellt man fest, dass die Einflüsse des Klimawandels vor allem in den Bereichen «Risiken erfassen» und «Risiken steuern» berücksichtigt werden sollten. Für das Vorgehen in diesen Bereichen müssen methodisch einheitliche Vorgaben erarbeitet werden.

#### **Risiken erfassen**

Der Einfluss des Klimas muss bereits bei der Erfassung der Risiken berücksichtigt werden. Dabei sind die bereits heute bestehenden Unsicherheiten und Unschärfen, welche aufgrund des Klimawandels noch grösser werden, klar auszuweisen und zu beschreiben und bei allen nachfolgenden Tätigkeiten zu berücksichtigen.

Im Rahmen der Gefahrenbeurteilung sind die Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahrenprozesse, inklusive Prozessschwellen und Prozessverkettungen in einer gebiets- und prozessspezifischen Analyse strukturiert abzuklären. Extremereignisse sollen für den heutigen Zustand konsequent berücksichtigt werden, ebenso wie bei der Betrachtung

künftiger Zustände. Die Betrachtung von Extremszenarien hilft, die verbleibenden Risiken zu ermitteln und deren Tragbarkeit bewerten zu können. Durch die Häufung und Intensivierung der Gefahrenprozesse werden auch die Schutzmassnahmen stärker beansprucht. Es soll deshalb geklärt werden, ob sich diese unter den veränderten Bedingungen immer noch robust verhalten können.

Verschiedene Massnahmentypen haben eine unterschiedliche Lebens- bzw. Wirkungsdauer. Organisatorische Massnahmen, wie zum Beispiel Notfallpläne, werden häufig (ca. alle 5 Jahre) aktualisiert und lassen sich deshalb einfach an neue Erkenntnisse anpassen. Demgegenüber werden der Schutzwald, bauliche Massnahmen und die Freihaltung von Gefahrenräumen auf Wirkungsdauern von vielen Jahrzehnten ausgelegt. Die Entwicklung der Risiken muss über ihre gesamte Wirkungsdauer bekannt sein. Deshalb muss die Gefahren- und Risikobeurteilung sowohl den heutigen als auch den künftigen Zustand erfassen. Um sich die Auswirkung des Klimawandels «vor Augen zu führen», wäre es sinnvoll für beide Zustände (mit und ohne Klimawandel) die Gefahren und Risiken aufzuzeigen. Dabei sollte ein Zeithorizont, der bis in die 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts reicht, betrachtet werden und von einem Emmissionsszenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5, siehe NCCS, 2018) ausgegangen werden.

#### **Risiken bewerten**

Die Risikobewertung ist an sich nicht «klimasensitiv». Sie umfasst soziale, ökologische und wirtschaftliche Aspekte. In dieser Phase wird gemeinsam mit den Akteuren und Akteurinnen entschieden, welche Risiken als akzeptabel und tragbar respektive inakzeptabel betrachtet werden.

Die grösste Herausforderung in Bezug auf den Klimawandel besteht darin, eine quantitative

Antwort auf die Frage zu finden, «wie stark müssen sich Risiken in Folge des Klimawandels verändern, damit man heute schon bereit ist, mehr in den Schutz zu investieren?» - um so für künftige Ereignisse gewappnet zu sein.

### Risiken steuern

Risiken proaktiv zu «steuern» ist ein zentrales Element des integralen Risikomanagements. Schutzkonzepte sollen risikobasiert und integral geplant, robust ausgelegt und so gestaltet sein, dass sie bezüglich neuen Anforderungen mit vertretbarem Aufwand angepasst werden können und nicht vollständig erneuert werden müssen. Schutzkonzepte müssen auch bei einer Änderung der Prozesse aufgrund des Klimawandels (z.B. Intensität der Niederschläge, Abflussmenge, Wasserfracht, Feststofftransport, Schwemmholt) wirksam bleiben. Massnahmenplanungen müssen prozess- und massnahmentypspezifisch erfolgen und dort wo es möglich ist, soll eine Regionalisierung vorgenommen werden. Es wird nämlich eine unterschiedliche Zunahme von Extremereignissen im Tessin, Mittelland, Jura oder in den Alpen erwartet.

Erste Überlegungen des Bundes zum Umgang mit dem Klimawandel bei Naturgefahren werden in den nächsten Monaten mit den kantonalen Fachstellen diskutiert und weiterentwickelt. So soll gemeinsam mit den Kantonen und zur Unterstützung von Planerinnen und Planern und Behörden und zur Schaffung einer gewissen Transparenz und Nachvollziehbarkeit ein methodisch einheitliches und klar definiertes Vorgehen erarbeitet werden. Mit Hilfe einer solchen umfassenden, methodisch und qualitativ guten Anleitung wird sichergestellt, dass an alle wesentlichen Punkte und Themen gedacht wird und dass das Vorgehen zur Berücksichtigung des Klimawandels bei der Gefahrenbeurteilung und bei der Massnahmenplanung verständlich, nachvollziehbar und vergleichbarer wird.



Abbildung 3: Oberflächenabfluss in Othmarsingen am 08.06.2016 (Foto: Mobiliar Lab für Naturrisiken / Christophe Lienert)

### Fazit

Der Bund ist sich der künftigen Herausforderungen bewusst und hat die wichtigsten Massnahmen aufgegleist, um für die Zukunft gewappnet zu sein. Doch Naturgefahren gehen alle an, und das was alle angeht, können wir nur gemeinsam lösen. Daher ist es wichtig, dass alle Akteurinnen und Akteure in ihrem Bereich ihre Verantwortung übernehmen und wir gemeinsam im Verbund das Ziel einer angemessenen und langfristigen Sicherheit vor Naturgefahren erreichen.

### Literatur

ARE, BAFU, 2005. Raumplanung und Naturgefahren, Empfehlung.

[https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/raumplanung/publikationen/empfehlung\\_raumplanungundnaturgefahren.pdf.download.pdf/empfehlung\\_raumplanungundnaturgefahren.pdf](https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/raumplanung/publikationen/empfehlung_raumplanungundnaturgefahren.pdf.download.pdf/empfehlung_raumplanungundnaturgefahren.pdf)

Bundesamt für Umwelt BAFU, 2020. Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz, Bericht zum Stand der Umsetzung des Integralen Risikomanagements von Naturgefahren, Bern. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/integrales-risikomanagement/wo-stehen-wir-heute.html>

Bundesamt für Umwelt BAFU, 2020. Minimale Standards, Kantonale Risikübersichten für gravitative Naturgefahren, Bern.

[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/fachinfo-daten/minimale\\_standards\\_kantonaler\\_risikoubersichten.pdf.download.pdf/minimale\\_stan-](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/fachinfo-daten/minimale_standards_kantonaler_risikoubersichten.pdf.download.pdf/minimale_stan-)

[dards\\_kantonale\\_risiko%C3%BCbersichten.pdf](#)

EBP im Auftrag des BAFU, 2020. Risikobasierte Raumplanung - Risiken abwägen: Instrumente, Chancen und Erfahrungen aus Sicht von Kantonen, Gemeinden, Raumplanern und Architekten, Bern.

[https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/laendlicher\\_raum/publikationen/broschuererisikobasierteraumplanung.pdf.download.pdf/2019-02-14\\_Bro\\_RisokobasierteRP\\_A4\\_d.pdf](https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/laendlicher_raum/publikationen/broschuererisikobasierteraumplanung.pdf.download.pdf/2019-02-14_Bro_RisokobasierteRP_A4_d.pdf)

geo7, 2020. Naturgefahren und Klimawandel in der Schweiz: Stand des Wissens. Bericht, Bern.

[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/externe-studien-berichte/naturgefahren-und-klimawandel-in-der-schweiz-stand-des-wissens.pdf.download.pdf/Bericht\\_NG\\_Klima.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/externe-studien-berichte/naturgefahren-und-klimawandel-in-der-schweiz-stand-des-wissens.pdf.download.pdf/Bericht_NG_Klima.pdf)

geo7, 2020. Naturgefahren und Klimawandel in der Schweiz: Stand des Wissens. Zusammenfassung, Bern.

[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/externe-studien-berichte/zusammenfassung-naturgefahren-und-klimawandel-in-der-schweiz.pdf.download.pdf/Zusammenfassung\\_NG\\_Klima.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/externe-studien-berichte/zusammenfassung-naturgefahren-und-klimawandel-in-der-schweiz.pdf.download.pdf/Zusammenfassung_NG_Klima.pdf)

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, 2018. Umgang mit Risiken aus Naturgefahren, Strategie 2018, Bern.

[https://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/Strategie2018/Strategie\\_de.pdf](https://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/Strategie2018/Strategie_de.pdf)

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, 2003. Sicherheit vor Naturgefahren - Strategie Naturgefahren Schweiz, Vision und Strategie, Bern.

[https://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat\\_pdf/alle\\_2012/2001-2005/PLA-](https://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat_pdf/alle_2012/2001-2005/PLA-)

[NAT\\_2004 - Sicherheit vor Naturgefahren.pdf](#)

NCCS (Hrsg.) 2018: CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich.

<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien.html>

Schweizerischer Bundesrat, 2016. Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 12.4271 Darbellay vom 14.12.2012, Bern.

[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/dossiers/umgang-mit-naturgefahreninderschweiz.pdf.download.pdf/umgang\\_mit\\_naturgefahreninderschweiz.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/dossiers/umgang-mit-naturgefahreninderschweiz.pdf.download.pdf/umgang_mit_naturgefahreninderschweiz.pdf)

# RadNAP: Ein radargestütztes Frühwarnsystem

Rolf Bart <sup>1</sup> (rolf.bart@hydro2d.ch)  
Gion Meier <sup>2</sup> (meier@bart.ch)

<sup>1</sup> hydro2D AG, St. Gallen

<sup>2</sup> Ingenieure Bart AG, St. Gallen

## Résumé

RadNAP (prévision des écoulements de précipitations basée sur le radar) est un système d'alerte précoce pour les débits de crue des bassins versants de petite à moyenne taille (environ 1 à 200 km<sup>2</sup>). Il est conçu comme un outil pour les forces d'intervention au niveau communal et envoie des messages sur les dépassements de valeurs limites définies. La caractéristique la plus importante du RadNAP est la détermination des hydrogrammes de ruissellement pour tous les points d'alerte précoce, déterminés au niveau communal. Les administrateurs au niveau communal déterminent les utilisateurs du RadNAP et leurs autorisations. Jusqu'à présent, l'intégration des communes et des corps de sapeurs-pompiers dans le RadNAP a été réalisée par les cantons. Le projet est structuré sur une base cantonale en ce qui concerne le traitement des données et la modélisation informatique.

INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) est l'un des systèmes de prévision immédiate de MétéoSuisse. Nowcasting désigne les prévisions météorologiques à court terme, soit jusqu'à 6 heures. Les précipitations sont modélisées hydrauliquement en tenant compte de la limite de la neige. Les précipitations qui atteignent le sol sans s'infiltrer, ainsi que l'eau du sol réapparaissant, la fonte des neiges et le ruissellement de surface se propageant à partir de la période précédente, forment la quantité totale d'eau qui s'écoule en surface. La formation des écoulements est modélisée hydraulique-

ment en utilisant les équations 2D des eaux peu profondes.

Au début de l'année 2022, une décision sera prise sur la poursuite du développement de RadNAP sur la base du projet pilote.

## Zusammenfassung

RadNAP (Radargestützte Niederschlag-Abfluss Prognose) ist ein Frühwarnsystem für Hochwasserabflüsse aus kleinen bis mittleren Einzugsgebieten (ca. 1 bis 200 km<sup>2</sup>). Es ist als Werkzeug für die Interventionskräfte auf kommunaler Ebene konzipiert und versendet Meldungen zu Überschreitungen festgelegter Grenzwerte. Das wesentlichste Leistungsmerkmal von RadNAP ist die Ermittlung von Abflussganglinien für alle Frühwarnstellen, die auf kommunaler Ebene bestimmt werden. Die Administratoren auf kommunaler Ebene bestimmen Nutzerinnen und Nutzer von RadNAP und deren Berechtigungen. Bisher läuft die Einbindung von Gemeinden und Feuerwehren in RadNAP über die Kantone. Das Projekt ist hinsichtlich der Datenaufbereitung und der Computermodellierungen kantonal strukturiert.

INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) ist eines der Nowcasting-Systeme der MeteoSuisse. Nowcasting bezeichnet kurzfristige Wetterprognosen bis 6 Stunden. Der Niederschlag wird mit Berücksichtigung der Schneefallgrenze hydraulisch modelliert. Der Niederschlag, der auf den Boden gelangt und nicht einsickert, bildet

zusammen mit wiederaustretendem Bodenwasser, der Schneeschmelze und dem sich aus dem vorherigen Zeitschritt ausbreitenden Oberflächenabfluss die Wassermenge, welche insgesamt oberflächlich abfließt. Die Abflussbildung wird mit den 2D-Flachwassergleichungen hydraulisch modelliert.

Anfang 2022 wird aufgrund des Pilotprojektes über die Weiterentwicklung von RadNAP entschieden.

## Einleitung

Gelungene Interventionsmassnahmen sind wirtschaftlich effizient. Nach den grossen Hochwassern 2005 in weiten Teilen der Schweiz wurden Verbesserungen bei Interventionsmassnahmen als nötig erkannt. Etliche Kantone haben folgerichtig die Notfallplanungen gerade bei Hochwassern systematisch vorangetrieben. Ausreichend frühe und möglichst präzise Warnungen verlängern die Vorwarnzeit und erhöhen damit die Erfolgsaussichten von Interventionen.

Oft dienen Abflussmessungen zur Auslösung von Entscheiden. Wird ein bestimmter Abfluss erreicht, löst dies erste Massnahmen aus, die meist mit einer Beobachtung beginnen und bei Eskalation des Ereignisses weitere Schritte auslösen. Ein potenziell gefährliches Ereignis muss begonnen haben, um eine Warnung auszulösen. Je kleiner ein Einzugsgebiet ist, desto kürzer wird die Vorwarnzeit. Das BAFU publiziert Gefahrenstufen 1 bis 5, die an einzelnen, grösseren Gewässern Abflussberei-



Abbildung 1: Beteiligte an Methodik, Umsetzung, Grundlagen und Betrieb.

chen entsprechen. An grossen Gewässern werden teils mehrere komplexe Modelle eingesetzt, die auch Steuerungen von Seerentionen einbeziehen. Für kleinere Einzugsgebiete werden regionale Gefahrenstufen publiziert. PREVAH (Precipitation Evapotranspiration Hydrotope Model) der WSL wird für ausgewählte Gewässer eingerichtet und ist zur Erstellung von Prognosen auf unterschiedlichste Messungen angewiesen.

Nachfragen bei Gemeinden und Feuerwehren haben ergeben, dass regionalisierte Warnungen für kleinere Einzugsgebiete wenig beachtet werden. Sie können die Aufmerksamkeit erhöhen und eigene Beobachtungen initiieren, reichen aber nicht aus, dass präventive Massnahmen ergriffen werden.

RadNAP eignet sich besonders für kleine bis mittlere Einzugsgebiete von ca. 1 bis 200 km<sup>2</sup>, wobei Vorwarnzeiten erreicht werden sollen, die präventive Massnahmen ermöglichen. Anfänglich war die Prognose von Abflüssen als Folge von Gewittern und gewitterähnlichen Niederschlägen einzige Zielsetzung. Die Prognosen hätten sich auf ca. 2 Stunden Extrapolation aktueller Niederschlagsmessungen beschränkt. Während den intensivierten Vorbereitungsarbeiten 2018 kündigte MeteoSchweiz an, verschiedene Produkte des Nowcastings zu erarbeiten. Mit Nowcasting bezeichnen die Meteorologen kurzzeitige

Prognosen für die kommenden 6 Stunden. Ziele dieser Prognosen sind gute Genauigkeit sowie eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung. Die Nowcasting Daten erlauben es, die Prognosen auf 6 Stunden zu erweitern und alle Niederschlagstypen zu berücksichtigen. Neben den Niederschlägen werden auch weitere Wetterdaten derselben Prognosedauer sowie zeitlichen und räumlichen Auflösung über den INCA Kanal vertrieben.

Bereits wenige Jahre früher begann die Swisstopo mit den systematischen LIDAR-Aufnahmen zum Produkt SwissSURFACE3D. Damit stehen Höhendaten zur Verfügung, welche für die Aufbereitung des DTM entscheidend sind. Ausgehend von der Auflösung der Höhendaten auf 0.25 m wird die Kombination mit weiteren Daten der AV oder des TLM3D möglich, um die Daten automatisiert und in guter Qualität zu bereinigen.

Ebenfalls zur richtigen Zeit wurde der GeoCover in der Version 2 abgeschlossen. Die dabei erarbeitete Einheitslegende über die ganze Schweiz ist für eine grossflächig einheitliche Datenbearbeitung wichtig.

Jahre zuvor wurde hausintern die Software flox-GPU ([www.flox-gpu.ch](http://www.flox-gpu.ch)) entwickelt. Sie löst die 2D Flachwassergleichungen auf strukturierten Netzen. Strukturierte Netze ermöglichen eine besonders effiziente Paralleli-

sierung. Die speziell für Gerinnehydraulik und Gefahrenbeurteilung mit komplexen Szenarien ausgelegte Software wird für die neue Anwendung teils umgebaut. Die Bearbeitung von Szenarien ist nicht mehr nötig, dafür werden hydrologische Modellierungen implementiert.

Geeignete Daten stehen für alle notwendigen Grundlagen aktuell zur Verfügung. Mit der Software flox-GPU ist auch das Werkzeug verfügbar, die hydrologisch-hydraulische Modellierung in der nötig kurzen Zeit zu bewältigen. Die Voraussetzungen sind ideal, um das Projekt RadNAP zu starten.

## Projekt RadNAP Ausgangslage

Vor allem für die kleinen Einzugsgebiete fehlen heute punktgenaue Abflussvorhersagen. Bis zu den mittleren Einzugsgebieten sind sie lückenhaft. Da die Gewinnung von Vorwarnzeit die wesentlichste Zielsetzung ist, kann kein Expertensystem verwendet werden. Die Analyse und Interpretation von Ergebnissen und daraus abgeleitete Empfehlungen oder Weisungen erfordern zu viel Zeit. Bei kleinen Einzugsgebieten vergäbe man den Vorteil gewonnener Vorwarnzeit.

RadNAP wurde von Beginn an auf die Anwendung auf kommunaler Stufe durch Gemeinden und Feuerwehren konzipiert. Dort entscheidet sich, ob Interventionsmassnahmen erfolgreich



Abbildung 2: Organigramm Pilotprojekt Frühwarnsystem RadNAP

sind. Um den Feuerwehren den Zugang zu RadNAP zu erleichtern, muss die Bedienung einfach sein. Es müssen alle relevanten Entscheidungen zur Lage der Frühwarnstellen, den Grenzwerten und der Verteilung der Meldungen im Kompetenzbereich der kommunalen Stufe liegen. Gemeinden und Feuerwehren vergeben die Benutzerkonten, weisen die Nutzungsrechte zu und konzipieren das gesamte Meldungswesen.

Die Stellung der Kantone ist für eine spätere Nutzung von RadNAP nicht einheitlich. In der Pilotphase treten die Kantone als Gruppe von Auftraggebern auf, teils binden sie eine Auswahl von Gemeinden bereits in dieser Phase ein, teils begnügen sie sich mit deren Information und warten den Erfolg der Versuchsphase ab.

### Ziele und Bezug zu den Interventionsphasen

Neben dem Gewinn von Vorwarnzeit verfolgt RadNAP folgende Ziele:

- Optimale Eignung für Interventionskräfte der Feuerwehren und der Gemeinden
- Punktgenaue Prognoseganglinien für Ein-

zugsgebiete von ca. 1 bis mindestens 200 km<sup>2</sup>

- Aktualisierung alle 10 Minuten
- Abflussprognosen an frei wählbaren Frühwarnstellen
- Frei wählbare Grenzwerte zur automatisierten Auslösung von Meldungen
- Frei bestimmbares Kommunikationsnetzwerk
- Individuell wählbare Kanäle für die Meldungen
- Hohe Verfügbarkeit sowie einfache und sichere Bedienung

Bezüglich der Interventionsphase Gelb sind die Wählbarkeit der Lage der Frühwarnstellen und der Grenzwerte wichtig. Die Beobachtung findet andauernd statt und ist im Voraus bis zu Detailfestlegungen hinsichtlich der Meldungen plan- und automatisierbar. Mit der Verwendung von Niederschlagsprognosen sind die kommenden 6 Stunden ständig überwacht.

Während den Phasen Orange und Rot sind die wählbaren Meldungsvorgänge und die Kommunikationsmittel bedeutsam. Die virtuellen Frühwarnstellen sind funktionssicher. Sie

können physikalisch (Geschiebe, Holz, Erosion) nicht beeinträchtigt oder gar zerstört werden und sie lassen sich ohne weiteres sicher vor dem Umfließen anlegen. Im Feld ist via Smartphone Zugriff auf numerische und grafische Ergebnisse gewährleistet, eingeschlossen die Einordnung der aktuellen Prognosen in den Kontext vergangener.

### Projektübersicht

Das Projekt profitiert davon, dass qualitativ hochstehende Grundlagendaten und Nowcasting Wetterdaten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zeitgleich verfügbar wurden. Die Soft- und Hardware sind auf einem Entwicklungsstand, um die nötigen Rechenzeiten mit vertretbaren Kosten zu erreichen.

Mit der Beteiligung von vier Kantonen und dem Fürstentum Liechtenstein sind sowohl für die Funktionalitäten als auch die praxistaugliche Ausgestaltung gute Voraussetzungen gegeben. Dass zwei der Kantone Gemeinden und Feuerwehren in die Entwicklungs- und Pilotphase einbinden, ist wichtig. Das Frühwarnsystem wird bei der Zielgruppe der kommunalen Interventionskräfte solide verankert, indem

deren Voraussetzungen und Bedürfnisse von Anfang an berücksichtigt sind.

Bei den aufgeführten Pilot-Gemeinden des Kantons St. Gallen sind die Feuerwehren ebenfalls beteiligt. Der Kanton hat ausgewählte Gemeinden angefragt, welche in den letzten Jahren mit Interventionen bei Hochwassern Erfahrungen sammeln konnten. Dem Projekt kommt weiter zugute, dass das BAFU und das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie je einen Fachexperten in der Begleitgruppe mitwirken lassen. Der Kanton Luzern gehört zur Minderheit der Kantone, welche die Notfallplanungen flächendeckend nach einer Richtlinie erstellt haben. Der Kanton hat eine repräsentative Auswahl interessierter Feuerwehren in die Pilotphase integriert.

Weitere Kantone können RadNAP jederzeit nutzen. Für die Einrichtung werden je nach verfügbaren Daten ca. 3 bis 5 Monate benötigt, sofern ein Kanton Gemeinden und Feuerwehren von Anfang an optimal in den Projekt- ablauf einbindet.

## Hydrologisch-hydraulisches Modell

### Übersicht

Das Geländeprofil zeigt wesentliche Elemente des hydrologischen Modells von RadNAP. Im Hinblick auf spätere Optimierungen am Modell sind die einzelnen Einflussgrößen soweit unterteilt, wie es die Daten zulassen. Anpassungen können so gezielt vorgenommen werden, ohne Aspekte zu beeinflussen, die nicht verändert werden sollen.

Die nachfolgenden Nummern beziehen sich auf jene in Abbildung 4.

- 1 Festgesteine werden in der Regel als weitgehend dicht behandelt.
- 2 Für verkarstete Gesteine wird die Durchlässigkeit jener des Unterbodens gleichgesetzt.

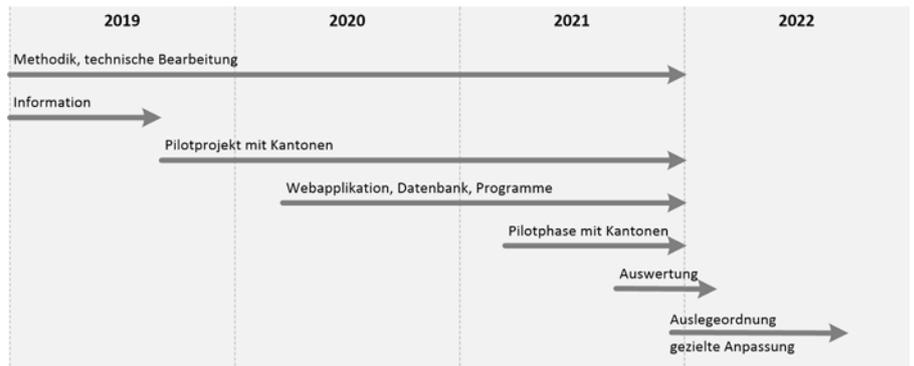


Abbildung 3: Projekttablauf

- Es kommt nicht zu einer Sättigung von unten her.
- 3 Bei kartiertem Festgestein wird die Mächtigkeit der in situ Verwitterung geschätzt. Sie hängt von der Verwitterungsresistenz des Gesteins, der Höhenlage, der Hanglage und der Neigung ab.
- 4 Dem Muttergestein wird i.d.R. eine leicht geringere Durchlässigkeit zugewiesen als dem Unterboden. Eine Sättigung wird nicht berücksichtigt; Grundwasser wird vernachlässigt.
- 5 Aufschüttungen werden wie Unterboden behandelt (wie z.B. bei Strassendämmen).
- 6 Die Mächtigkeit des Unterbodens wird mit Geländemodellierungen geschätzt und bei Bewaldung erhöht. Über Festgesteinen limitiert die Mächtigkeit der Verwitterungsschicht jene des Unterbodens.
- 7 Die Mächtigkeit des Oberbodens wird rechnerisch geschätzt. Die Bandbreite liegt zwischen 5 und 30 cm.
- 8 Dolinen werden aus Kartierungen übernommen und mit Senken und Geländeanalysen ergänzt. Zu rund 3'000 kartierten Dolinen kommen weitere ca. 12'000 analytisch bestimmte hinzu. Dolinen «schlucken» alles oberflächliche oder im Boden zufließende Wasser – es «verschwindet».
- 9 Alle kartierten Gewässer (i.d.R. TLM3D) nehmen oberflächlich sowie aus dem Ober- und Unterboden zufließendes Wasser auf und führen es ab (hydraulische Modellierungen mit 2D-Flachwassergleichungen)

- 10 Der hydrologische Aspekt der stehenden Gewässer ist bei gesteuerten Stauanlagen und grossen Seen das «Verschwinden» des zufließenden Wassers. Nur wenn die Beziehungen von Pegel und Auslass bekannt sind, lässt sich der verschwundene Abfluss wieder ins hydraulische Modell einspeisen. Kleinere stehende Gewässer retendieren über die Seespiegelfläche.
- 11 Strassen unterbrechen die Sickerung im Oberboden.
- 12 Gebäude werden als unterkellert vorausgesetzt. Gebäude unterbrechen die Sickerung im Ober- und Unterboden.
- 13 Die Vegetation wird aus den Daten von SwissSURFACE3D ausgewertet. Die Messungen der entsprechenden Klasse werden pro 20 m Zelle als mittlere Höhe aller Lasermessungen angegeben. Ein Laserstrahl kann tief in die Baumvegetation eindringen und liefert so auch eine Information zu deren Dichte. Der Mittelwert ist ein gutes Mass für die Kapazität der Interzeption. Erfasst werden alle Gehölze, sofern in einer Zelle mindestens die halbe Fläche bestockt ist.

### Konzept

Mit den hydrologischen Modellierungen werden die Eingangsrößen Niederschlag und Schneeschmelze auf den Anteil reduziert, der oberflächlich abfließt. Die Trennung von Schneefall und Regen findet ganz am Anfang statt. Schnee wird nicht weiter berücksichtigt, sondern über die Schneeschmelze

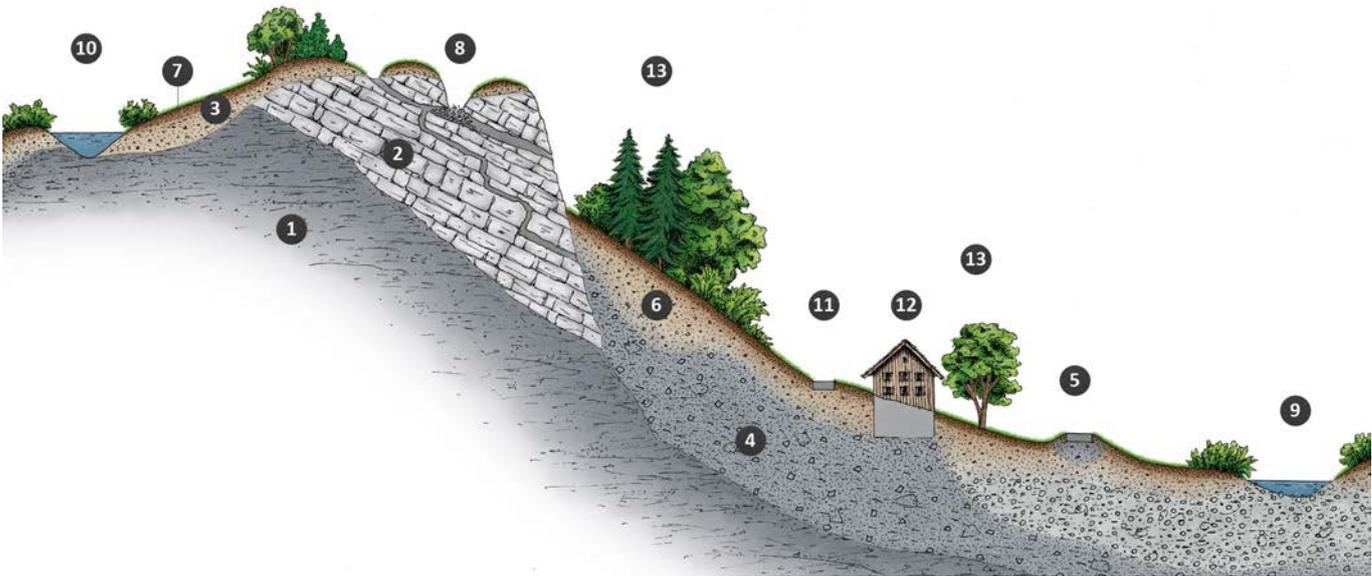


Abbildung 4: Geländeprofil mit Hinweisen zum hydrologischen Modell (Bodenschichten ca. 5-fach überhöht).

implementiert. Der Regen trifft zuerst auf die Datenschicht mit der hydrologischen Vegetationshöhe. Ab diesem Bearbeitungsstand ist der Regen ebenfalls durchgehend auf 20 m aufgelöst.

Die weiteren Benetzungsverluste richten sich nach Daten zur Landnutzung. Danach folgt die Zugabe der Schneeschmelze nach den OSHD (Operative Schneehydrologische Modelle) des SLF. Zusammen mit dem Nettoniederschlag ist die auf der Bodenoberfläche totale Wassermenge pro 20 m Zelle und pro 5 Minuten aufgelöst. An dieser Stelle kommt noch der Oberflächenabfluss aus der hydraulischen

Modellierung der vergangenen 5 Minuten hinzu. Mit dieser totalen Wassermenge pro Zelle wird die Infiltration modelliert. Das im Boden eingesickerte Wasser wird in der Ausbreitung modelliert, woraus sich bei hohen Sättigungen auch Wasseraustritte an die Bodenoberfläche ergeben können. Der Nettoeintrag für den Oberflächenabfluss besteht damit aus der Summe des nicht infiltrierten Wassers plus des aus dem Boden austretenden Wassers. Zu letzterem gehört auch Bodenwasser, welches ein Gerinne erreicht.

**Ablauf**

Für den Ablauf der Modellierungen sind die

Phasen mit Ereignis und jene zwischen den Ereignissen zu unterscheiden. Werden Prognosen aus Niederschlagsdaten oder Schneeschmelze modelliert, sind dies Ereignisphasen. Treten weder Niederschlag noch Schneeschmelze auf, so ist es die Phase ohne Ereignis. Es können zwar noch Austritte von Wasser aus dem Boden auftreten, dieser Beitrag zum Oberflächenabfluss oder direkten Gerinneabfluss wird nur für den aktuellen Zeitabschnitt modelliert.

RadNAP verwendet keine Feldmessungen, um die Abflussprognosen zu erstellen. Mit den hydrologischen Modellierungen zwischen den Ereignisphasen werden die hydrologischen Zustände beim Beginn eines Ereignisses geschätzt.

**Hydraulische Modellierungen**

Hydraulische Modellierungen basierend auf den 2D-Flachwassergleichungen sind rechen- und damit zeitaufwändig. Um die hier vorgestellte Prognosemodellierung alle 10 Minuten zu aktualisieren, muss ein sechsstündiger Regen in weniger als 10 Minuten hydrologisch und hydraulisch modelliert werden. Das heisst, die Modellierungen laufen mehr

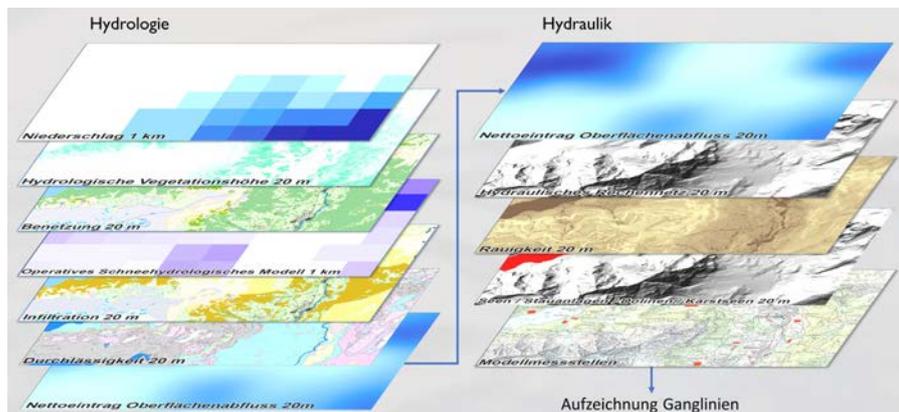


Abbildung 5: Hydrologisch-hydraulisches Modell

als 35-mal schneller ab als das reale Ereignis. Die Geschwindigkeit der Modellierungen ist annähernd proportional zur Anzahl der benetzten Zellen und stark abhängig vom kürzesten Zeitschritt innerhalb eines Rechenschrittes im gesamten Modell. Schwache und kleinräumige Niederschläge erfordern massiv weniger Rechenleistung als grossflächiger, starker und langdauernder Regen. Die Rechenleistung wird also umso stärker gefordert, je wichtiger ein Niederschlagsereignis für die Voraussage potenziell gefährlicher Abflüsse ist. Die bereitgestellte Hardware muss auf die seltenen Fälle höchster Rechenleistung ausgelegt werden, die jedoch nur sehr selten in Anspruch genommen wird.

Zur Bemessung der notwendigen Hardware dient das immer gleiche Testszenario. Das DTM in Abbildung 8 erstreckt sich von Kilometer 2'680 / 1'190 (Landeskoordinaten, unten links) bis Kilometer 2'730 / 1'243 (Landeskoordinaten oben rechts). Die Fläche von 2'650 km<sup>2</sup> ist in 6.625 Millionen Zellen von 20 mal 20 Metern aufgelöst. Die maximale Neigung liegt bei ca. 86°. Der Niederschlag fällt während 6 Stunden flächendeckend mit einer Intensität von 40 mm/h. Die Modellierungszeit entspricht dem gesamten Niederschlagsereignis. Die maximal auftretende Fliesstiefe misst 71 m. Mit der aktuellen Optimierung wird die hydraulische Modellierung in 6.8 Minuten abgeschlossen. Mit der Testanlage werden die Anforderungen an die Hardware und die maximale Fläche eines Modells festgelegt.

Die hydraulischen Modellierungen werden mit den 2D-Flachwassergleichungen auf einem leistungsstarken GPU Server ausgeführt. Als Grundlage wird die Software flox-GPU verwendet, die um die Modellierung der hydrologischen Prozesse erweitert wird. Die hydrologischen Prozesse werden ebenfalls parallelisiert. Die Modellierung von Szenarien,

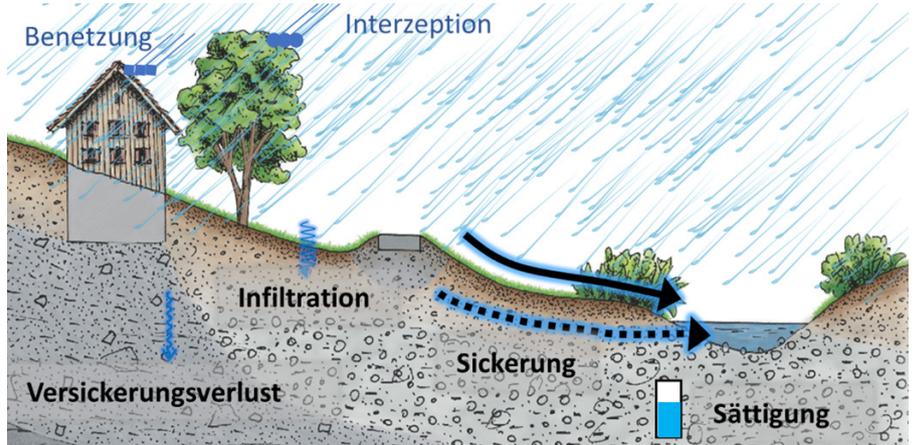


Abbildung 6: Ereignisphase (Daten Nowcasting: Niederschlag quantitativ RR (10 Min. korrigiert), Niederschlag qualitativ, RP, (5 Min. unkorrigiert), Schneefallgrenze (10 Min.), zusätzlich: Schneeschmelze (OSHD, SLF))

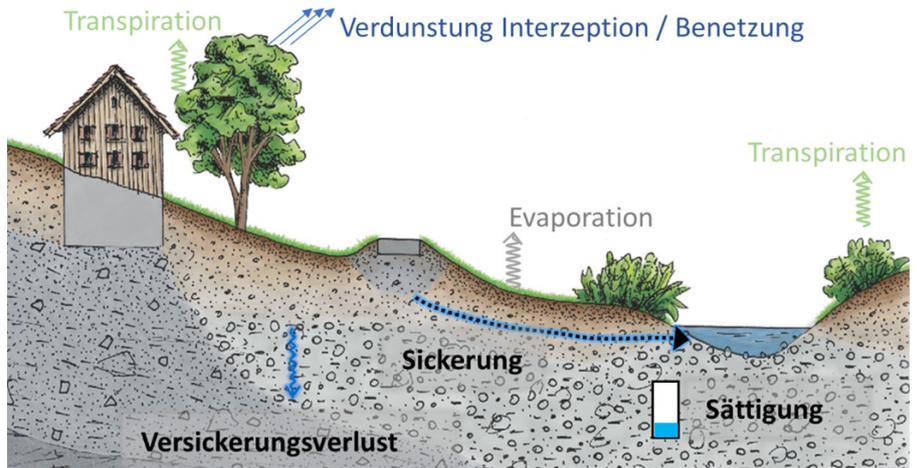


Abbildung 7: Phase ohne Ereignis (Daten Nowcasting: Temperatur 2 m ü.B. (10 Min.), Luftfeuchtigkeit 2 m ü.B. (10 Min.), Windgeschwindigkeit (60 Min.))

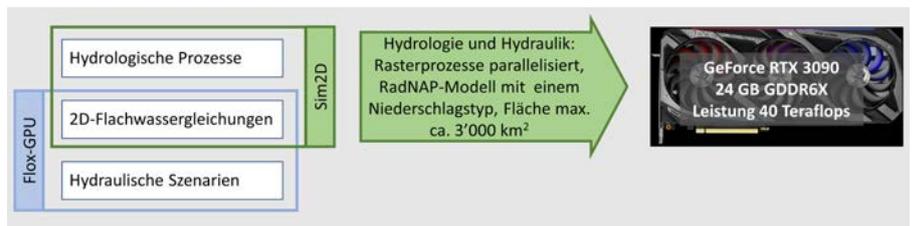


Abbildung 8: Recheneinheit für ein hydrologisch-hydraulisches RadNAP-Modell

welche in flox-GPU für die Modellierung von Gerinnehydraulik und Gefahrenbeurteilungen eine grosse Rolle spielen, kommen in RadNAP nicht zum Einsatz. Basierend auf der bestehenden hydraulischen Software flox-GPU wird die speziell auf die Bedürfnisse angepasste hydrologisch-hydraulische Software Sim2D entwickelt. Dem verwendeten GPU Server wird für eine Grafikkarte des genannten Typs ein Gebiet von maximal 3'000 km<sup>2</sup> zugewiesen.

Grössere Gebiete sind nach hydrologischen Kriterien zu unterteilen.

**Frühwarnstelle**

Frühwarnstellen basieren auf Modellmessstellen, die im hydraulischen Modell eingerichtet sind. Bei allen Modellierungen werden die Abflussganglinien über alle Modellmessstellen aufgezeichnet und in einer Datenbank gespeichert. Modellmessstellen sind die in der hy-

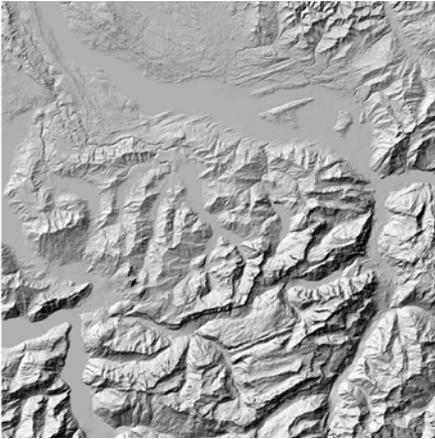


Abbildung 9: DTM für die Tempotests als Grundlage für die Bemessung der Hardwarekomponenten

draulischen Software eingerichteten virtuellen Messstellen. Diese stehen grundsätzlich allen Nutzerinnen und Nutzern des RadNAP-Modells zur Einrichtung von Frühwarnstellen zur Verfügung. Eine Frühwarnstelle entsteht mit der Definition durch eine Gemeinde oder Feuerwehr, die damit Eigentümerin der Frühwarnstelle wird. Mehrere Modellmessstellen können gemeinsam eine Frühwarnstelle bilden. Massgebend ist in diesen Fällen ausschliesslich die Summenganglinie der verwendeten Modellmessstellen.

Frühwarnstellen können grundsätzlich frei nach den Erfordernissen der Notfallplanung ausgewählt werden. Abfluss aus prognostiziertem Niederschlag schliesst an Modellabfluss an und erstreckt sich maximal 6 Stunden in die Zukunft. Eine Grenzwertüberschreitung

führt zu einer Meldung. Überschreitet eine Prognosemodellierung den Grenzwert für das Ereignisende nirgends, ist das Ereignis zu Ende.

### Werkzeug für die Intervention Kommunikation

RadNAP meldet die Überschreitung festgelegter Grenzwerte und greift damit nicht in die Aufgaben der Warnungen oder Alarmierungen der Interventionskräfte ein. Teils bestehen feste Abläufe und Instrumentarien, wie die Interventionskräfte aufbieten oder informieren. Die Firma instaSOLUTION betreibt Kommunikations- und Managementlösungen für Alarmierung, Krisenmanagement, mobile Kollaboration, Messaging und IoT-Internet of Things. InstaSOLUTION erhält von RadNAP die zu verschickenden Meldungen und die Verbindungsdaten über eine Programmierschnittstelle (API) und verschickt die Meldungen nach den festgelegten Vorgaben. Mit den unterschiedlichen Verbindlichkeiten der Meldungsvorgänge bleibt den Gemeinden die Wahlfreiheit bzgl. der Kommunikation. Die allfälligen Rückmeldungen gehen an die von Gemeinde oder Feuerwehr bezeichneten Personen und können im Detail erfasst und überprüft werden. Eine Feuerwehr kann minimal eine Meldung für eine Warnregion vorsehen und das bestehende Kommunikationsnetz verwenden. Sie kann jedoch neben Meldungen von RadNAP

die Kommunikationstechnologie von InstaSOLUTION verwenden.

### Frühwarnung und Notfallplanung

Die Frühwarnung kann ihre Wirkung nur voll entfalten, wenn eine Notfallplanung besteht und diese die spezifischen Leistungen der Frühwarnung berücksichtigt. Um die Frühwarnung zur Einrichtung präventiver Massnahmen zu nutzen, muss für die einzelnen Massnahmen der Zeitbedarf zu Errichtung bekannt sein. Zudem ist eine Priorisierung der Massnahmen nach deren Bedeutung zu empfehlen. Reicht die Zeit nicht, um alle Massnahmen aufzubauen, kann sich die Intervention nach einer gut begründeten Reihenfolge der Ausführung richten.

### Kontrollen und Optimierung

Gemeinden und Kantone nehmen teils Kontrollen vor, die sie in der Webapplikation RadNAP erfassen können. Um eine gute Datenbasis für unterschiedlichste Kontrollen sicherzustellen, werden Abflussmessstellen vom BAFU und solche von Kantonen, Gemeinden oder anderen Institutionen in RadNAP eingebunden. Diese Messungen werden mit Aufzeichnungen zugehöriger Modellmessstellen verglichen und ausgewertet. Zu den Niederschlägen bezieht RadNAP sowohl Prognosen als auch Messungen, die miteinander verglichen werden. Die grosse Datenmenge erfordert automatisierte

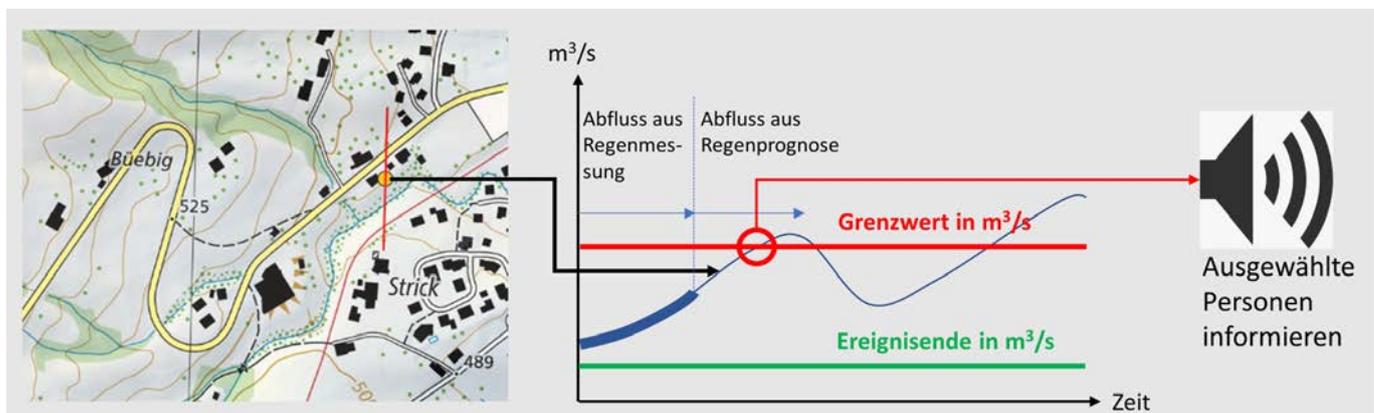


Abbildung 10: Frühwarnstelle mit Aufzeichnung von Abfluss aus gemessenem und prognostiziertem Regen

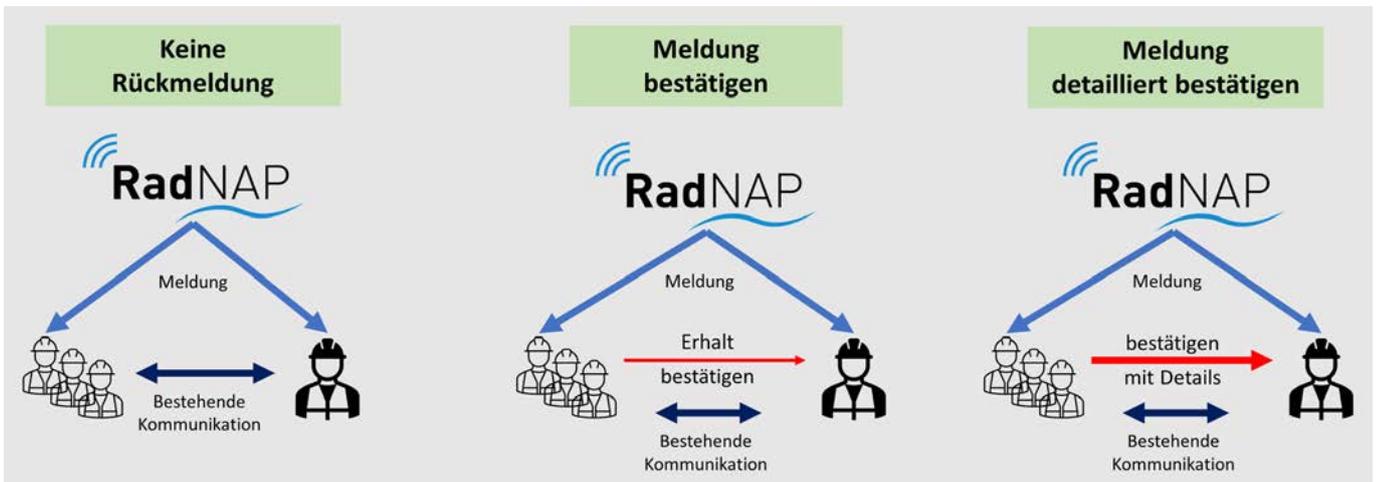


Abbildung 11: Meldungswesen in unterschiedlicher Verbindlichkeit

Auswertungen, welche dazu beitragen, die in RadNAP eingesetzten Modelle und deren konkrete Umsetzung laufend zu verbessern. Folgende Hauptfragen stehen aus heutiger Sicht im Vordergrund:

1. Wie gut stimmen Ganglinienverlauf und Abflussgrößen zwischen Abflussmessungen und Modellierungen auf Basis gemessener Niederschläge überein?
2. Wie gut stimmen prognostizierte Niederschläge mit gemessenen überein? Wie wirkt sich dabei die zeitliche Distanz zwischen Prognose und Messung aus?
3. Wo und wie sind in RadNAP Verbesserungen möglich und wie kann der Umgang mit den Prognosen den Erfolg in der Intervention verbessern.

Der erste Fragenkreis liefert Hinweise zur Qualität insbesondere des hydrologischen Modells. Die Unterscheidung von hydrologischen und hydraulischen Einflüssen wird vertiefte Abklärungen erfordern. Fragestellungen zu Punkt 2 liefern Hinweise zur Qualität der Niederschlagsprognosen generell, zusätzlich auch zu den korrigierten und den unkorrigierten Niederschlagsprognosen. Die Abhängigkeit der Prognosequalität von den Niederschlagstypen erfordert vertiefte Abklärungen, da die Wetterlagen in RadNAP nicht erfasst werden. Die Antworten zu Fragen unter 3.

werden in gezielte Anpassungen von RadNAP münden und wichtige Hinweise zur Interpretation der Ergebnisse liefern. Automatisierbare Auswertungen sind fester Bestandteil von RadNAP. Spezielle Fragestellungen werden bei Bedarf behandelt oder können nach der Pilotphase im Rahmen externer wissenschaftlicher Arbeiten aufgegriffen werden.

### Weitere Anwendungen

Neben der Anwendung in der klassischen Intervention im Siedlungsgebiet ist auf die Anwendung für Verkehrsachsen hinzuweisen. Oft können relevante Risiken mit technischen Schutzmassnahmen nicht kosteneffizient verringert werden. Hier kann RadNAP dank der einfachen Einführung von Frühwarnstellen gute Dienste leisten. Auch für Baustellen kann sich die Einrichtung lohnen, entweder um die Arbeitssicherheit zu erhöhen oder um die Schäden aus unerwarteten, starken Abflüssen mit geeigneten Massnahmen zu reduzieren.

### Ausblick

Für den April dieses Jahres ist der Start des Onlinebetriebes zuhanden der Auftraggeber geplant. Anhand der Kontrollen werden im Laufe des Jahres schrittweise Optimierungen vorgenommen. Vor Abschluss der Pilotphase ist lediglich die Einbindung von Notfallplänen in RadNAP als relevante Erweiterung

geplant. Die Auswertung der Pilotphase und die Bewertungen der Auftraggeber werden die nächsten Schritte definieren.

Weitere Kantone können sich RadNAP jederzeit anschliessen. Minimal ist die komplette Aufbereitung aller notwendigen Grundlagendaten erforderlich. Die Einbindung von Gemeinden und Feuerwehren obliegt den Kantonen.

# Bergsturzscenarien bei der Rutschung Brienz/Brinzauls (GR)

## Probabilistische Ansätze zur Abschätzung der Prozessräume

Valentin Gischig <sup>1</sup> (v.gischig@csd.ch)

Stefan Schneider <sup>1</sup> (s.schneider@csd.ch)

Andri Largiadèr <sup>2</sup> (Andri.Largiadèr@awn.gr.ch)

Andreas Huwiler <sup>2</sup> (Andreas.Huwiler@awn.gr.ch)

Christoph Nänni <sup>3</sup> (Christoph.Naenni@tba.gr.ch)

<sup>1</sup> CSD INGENIEURE AG

<sup>2</sup> Amt für Wald und Naturgefahren, Graubünden

<sup>3</sup> Tiefbauamt, Graubünden

### Résumé

La zone autour du village de Brienz/Brinzauls, dans les Grisons, bouge actuellement de plus de 1 m/an. Le versant au-dessus de Brienz/Brinzauls fait également partie de cette zone de glissement et se déplace vers le village à raison de plusieurs mètres par an. En raison du développement spectaculaire de la vitesse au cours des 20 dernières années (augmentation d'un facteur ~10) et du degré élevé de désagrégation de la masse rocheuse au-dessus du village, un éboulement ne peut pas être exclu. La zone d'impact potentiel de l'éboulement a été évaluée à l'aide de modèles de simulation usuels. En raison des incertitudes liées aux scénarios de rupture possibles et du large éventail de paramètres de saisie possibles, nous sommes confrontés à une variété de réalisations de modèles avec différentes probabilités. Dans cet article, nous décrivons une approche probabiliste qui permet de représenter de manière compacte l'ensemble des modèles sur une carte, tout en identifiant de manière transparente et quantitative les incertitudes dans l'estimation de l'espace d'impact.

### Zusammenfassung

Das Gebiet rund um das Dorf Brienz/Brinzauls in Graubünden bewegt sich aktuell mit mehr als 1 m/Jahr talabwärts. Der Hang oberhalb Brienz/Brinzauls ist ebenfalls Teil dieses Grossrutschgebietes und bewegt sich mit mehreren Metern pro Jahr auf das Dorf zu. Aufgrund der dramatischen Geschwindigkeitsentwicklung in den letzten 20 Jahren (Zunah-

me um einen Faktor ~10) und des hohen Zerrüttungsgrades der Felsmasse oberhalb des Dorfes ist ein Bergsturz nicht auszuschliessen. Mithilfe gängiger Simulationsmodelle wurde der potenzielle Wirkungsraum eines Bergsturzes abgeschätzt. Aufgrund Unsicherheiten in den möglichen Abbruchsszenarien und dem breiten Bereich möglicher Eingangsparameter sind wir mit einer Vielzahl Modellrealisationen konfrontiert, die unterschiedlich wahrscheinlich sind. In diesem Beitrag beschreiben wir einen probabilistischen Ansatz, der es ermöglicht, die Gesamtheit der Modelle in einer Karte kompakt darzustellen und gleichzeitig die Unsicherheiten in der Abschätzung des Wirkungsraums transparent und quantitativ auszuweisen.

### Einleitung

Die Abschätzung der Gefährdung ausgehend von grossen Hanginstabilitäten beinhaltet die Beurteilung des Wirkungsraumes potentieller Bergstürze und Felslawinen sowie der damit verbundenen Sekundärprozesse. Aktuelle Beispiele hierfür sind neben dem Pizzo Cengalo bei Bondo und dem Spitze Stei bei Kandersteg (vgl. Artikel Kienholz et al. in diesem Heft) auch die Grossrutschung oberhalb Brienz/Brinzauls in Graubünden, auf die in diesem Beitrag näher eingegangen wird. Zur Abschätzung der Prozessräume von Bergstürzen kommen üblicherweise numerische Simulationen zum Einsatz (z.B. RAMMS, DAN3D). Dabei bestehen grundsätzlich zwei Herausforderungen. Erstens: Obwohl es inzwischen zahlreiche Fallstudien gibt, an denen die Eingangsparameter

der Simulationsmodelle kalibriert wurden, sind diese für den jeweiligen Fall schwierig abzuschätzen. Zweitens: Unsicherheiten im geologischen und kinematischen Modell der Felsinstabilität führen dazu, dass eine Reihe von möglichen Szenarien bezüglich Ausbruchsnische und -volumen zu berücksichtigen sind. Für das Gefährdungsmanagement werden oft für einzelne Abbruchsszenarien optimistische, mittlere und pessimistische Modellrealisationen herangezogen. Dabei werden die Unsicherheiten in der Parametrisierung und die eingeschätzte Wahrscheinlichkeit der einzelnen Abbruchsszenarien – wenn überhaupt – nur qualitativ ausgewiesen. Gleichzeitig ist nicht klar, wie mit den Unsicherheiten in der Massnahmenplanung umzugehen ist. In diesem Beitrag beschreiben wir am Beispiel von Brienz/Brinzauls einen probabilistischen Ansatz, welcher es ermöglicht, eine Vielzahl an möglichen Modellresultaten zu einer einzigen probabilistischen Auslaufkarte zu kombinieren. Diese zeigt auf, mit welcher Wahrscheinlichkeit im Falle eines Bergsturzes ein Gebiet betroffen ist. Ein ähnlicher Ansatz kam bereits beim Pizzo Cengalo zur Anwendung (Amann et al. 2019).

### Der Briener Rutsch

Der Felshang oberhalb des Dorfes Brienz/Brinzauls in Graubünden bewegt sich mehrere Meter pro Jahr auf das Dorf zu. Das Dorf selber liegt auf einer Terrasse, welche auf einer tiefliegenden Rutschung liegt und sich aktuell mit ca. 1.2 m/Jahr zu Tale bewegt. Der Einfachheit halber wird die Instabilität oberhalb

Brienz/Brinzauls «Rutschung Berg» genannt und die Rutschung, auf der sich Brienz selbst befindet, «Rutschung Dorf». (Diese Terminologie ist rein geographisch zu verstehen; sie soll keine geologischen und kinematischen Kompartimente der Gesamtrutschung implizieren.) Geologisch ist das Gebiet der Rutschung Dorf dem Nordpenninischen Flysch zuzuordnen, welcher auch der unterste Bereich der Rutschung Berg bildet. Darüber kommen die Allgäuschiefer der Aroser-Schuppenzone (Südpenninikum) zu liegen. Das darüber liegende Rauwacke-Band (Raiblerschichten) ist als gelbliche Schicht in der Anrisszone oberhalb Brienz deutlich zu sehen. Darauf kommt der Arlbergdolomit zu liegen. Die Raiblerschichten

und der Arlbergdolomit sind Teil des Ostalpinen Deckenstapels.

Die Rutschaktivität rund um Brienz war bereits im 19. Jahrhundert bekannt, spätestens seit dem Abgang von einer beachtlichen Felsmasse in Form eines Schuttstroms (genannt «Igl Rutsch») östlich oberhalb des Dorfes im Jahre 1878 (dokumentiert in Heim, 1881). Über Jahrzehnte bewegte sich das Dorf jedoch mit wenigen Zentimetern pro Jahr (Abbildung 1). Zwischen 2000 und 2010 begann eine kontinuierliche Zunahme der Geschwindigkeiten. Nach einem Felssturzereignis im Jahre 2008 wurde erkannt, dass die Aktivität im Felshang oberhalb des Dorfes bedrohlich zunimmt,

was detaillierte Untersuchungen mit sich zog. Im Jahre 2011 wurde damit begonnen, die Felsmasse der Rutschung Berg mit einer automatischen Totalstation vom Dorf aus zu überwachen. Zusätzlich werden zahlreiche Messpunkte periodisch mit GPS vermessen. Sowohl die Geschwindigkeiten wie auch die Zerrüttung der Rutschung Berg nahmen seither zusehends auf eindrückliche Weise zu. Nach einer kurzfristigen, leichten Beruhigung nach dem Sommer 2015 nahm die Geschwindigkeit in verstärktem Masse zu. Die Deformationen führten zu verstärkten Infrastrukturschäden in Brienz und in den umliegenden Gebieten (z.B. Risse in Gebäuden, Schäden an Strassen und Leitungen, usw.).

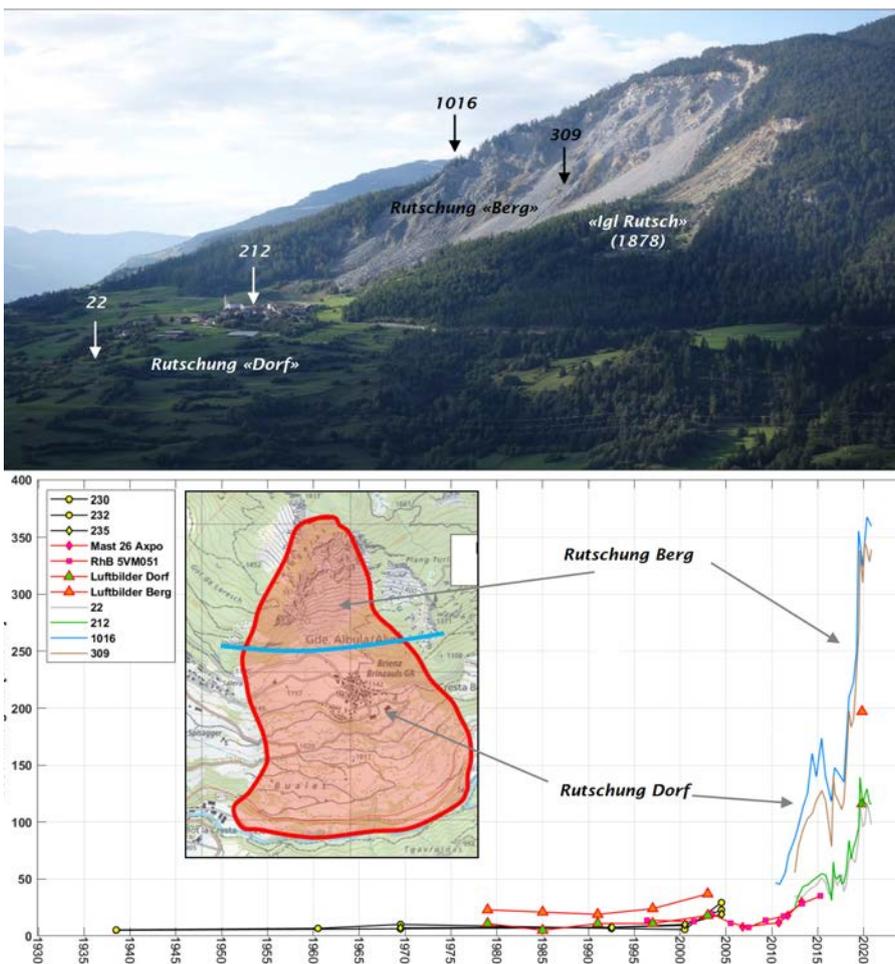


Abbildung 1: Übersichtsfoto der Rutschung Brienz/Brinzauls. Geschwindigkeitsentwicklung einiger Messpunkte auf der Rutschung Berg und der Rutschung Dorf. Die Zeitreihen «Luftbilder Dorf» und «Luftbilder Berg» wurden mittels digitaler Bildanalyse alter Luftbilder generiert (SLF, 2019). Die Geschwindigkeiten sind aus mehreren Punkten auf der Rutschung Dorf und Berg gemittelt. Die Messreihen der Punkte 1016 und 309, sowie der «Luftbilder Berg» gehören zur Rutschung Berg, die restlichen zur Rutschung Dorf.

Im Jahre 2017 wurde aufgrund der Beschleunigung der Rutschung Dorf ein roter Gefahrenbereich über das Dorf gelegt. 2018 startete bei der Rutschung Dorf ein umfangreiches Untersuchungs- und Sondierprogramm für die Erhebung geologischer Grundlagen und hinsichtlich möglicher Sanierungsvarianten (z.B. mit einem Drainagestollen, vgl. Beitrag Figi et al. in diesem Heft). Nebst diversen hydrogeologischen Untersuchungen und geophysikalischen Messungen beinhalten die Abklärungen das Abteufen von acht Sondierbohrungen (BTG, 2020). Die Bestrebungen sind nach wie vor im Gange, wobei seit Sommer 2020 auch die Rutschung Berg mit vier zusätzlichen Bohrungen in die Grundlagenenerhebung miteinbezogen wurde.

Aufgrund der markanten Beschleunigungen der Rutschung wurde das Überwachungssystem inzwischen mit elf automatischen GPS-Stationen ergänzt. Zusätzlich wurde im August 2019 im Nachgang bedeutender Beschleunigungen während eines Niederschlagsereignisses eine interferometrische Radaranlage installiert, welche die Deformationen der Rutschung Berg räumlich flächendeckend und

zeitlich dicht aufgelöst aufzeichnet. Aufgrund der hohen Steinschlagaktivität oberhalb der Kantonsstrasse, welche Lenz mit Brienz verbindet, läuft seit 2018 eine Dopplerradaranlage, welche in Echtzeit Steinschlagereignisse detektiert und mittels Ampelanlage die Strasse automatisch sperrt.

Aufgrund der zunehmenden Geschwindigkeiten und der Felszerrüttung sowie geologischer Befunde kann nicht ausgeschlossen werden, dass es aus der Felsmasse oberhalb Brienz zu einem katastrophalen Versagen und zu einem Bergsturz kommen könnte, der das Dorf Bri-

enz und das darunterliegende Gebiet betreffen würde. Es wurden verschiedene mögliche Abbruchszenarien beschrieben, um damit die Wirkungsräume im Falle eines Bergsturzes abzuschätzen. Diese sind Gegenstand dieses Artikels.

### Bergsturzszzenarien

In einer ersten Serie von Szenarien wurde angenommen, dass Teile des Anrissgebietes und des westlich angrenzenden Felsrückens abstürzen könnten. Es wurde geschätzt, dass Volumen von 125'000 m<sup>3</sup> bis hin zu 4 Mio. m<sup>3</sup> abstürzen könnten (Szenario 1-7 in Abbildung

2). Dabei lag der Fokus vor allem auf den spröden Arlberg-Dolomiten, welche – abgetrennt durch eine Zehner Meter mächtige, poröse Rauwacke Schicht (Raibler Schichten) – oberhalb von Allgäuschiefer und einer Flysch-Formation zu liegen kommen. Ferner wurde ein Extremszenario mitberücksichtigt, bei dem der gesamte Felsrücken und das dahinterliegende Plateau (d.h. die gesamte Instabilität oberhalb Brienz) auf einer am Fusse des Felsrückens ausstreichenden Gleitfläche abstürzt (Szenario 8). Das Volumen davon wurde auf über 22 Mio. m<sup>3</sup> geschätzt. Ein weiteres Szenario umfasst einen kleineren Abbruch der unters-

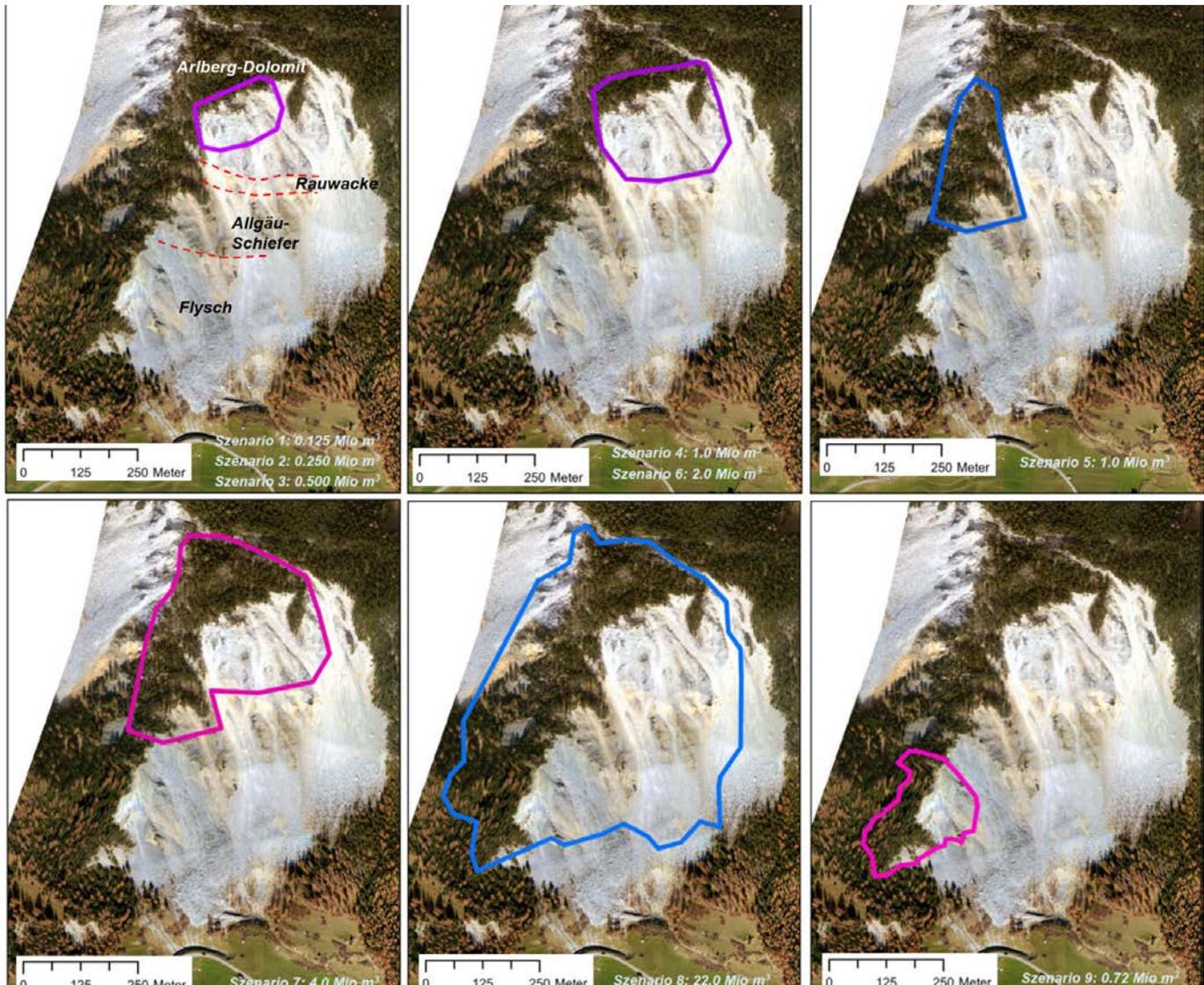


Abbildung 2: Neun Abbruchszenarien, welche bei der Bergsturzmodellierung berücksichtigt wurden. Die geologischen Grenzen sind im Bild oben links vereinfacht angedeutet. Szenarien 1,2 und 3 respektive die Szenarien 4 und 6 teilen denselben Abbruchperimeter. Die unterschiedlichen Volumina beruhen auf unterschiedlichen Annahmen der Abbruchmächtigkeiten.

ten Partie des Felsrückens (Szenario 9). Weiter wurden auf der Westseite des Felsrückens erhöhte Geschwindigkeiten und ein erhöhter Zerrüttungsgrad festgestellt, woraus ein Abbruchszenario in Richtung Westen ausgeschieden wurde. Dieses Szenario beinhaltet ein Felsvolumen von bis zu 380'000 m<sup>3</sup>. Da dieses Szenario später dazukam, wurde dieses in der Studie von 2019, auf welcher dieser Artikel basiert, noch nicht berücksichtigt. Es ist hier anzumerken, dass die Szenarien in Abbildung 2 dem damaligen Wissensstand entsprechen. Obwohl wir aktuell die Szenarien nach wie vor grösstenteils als sinnvoll erachten, werden neue Kenntnisse – insbesondere aus der laufenden Grundlagenerhebung durch die Bohrkampagne – unweigerlich zu einer gewissen Anpassung der Szenarien führen. Für den methodischen Fokus dieses Artikels ist dies wenig relevant.

### Modell-Parametrisierung

Zur Modellierung des Wirkungsraumes der Bergsturzzenarien wurde die Software RAMMS benutzt, welche typischerweise für Murgänge, bisweilen aber auch für Felslawinen verwendet wird. Die Eingangsparameter, welche in diesem Modell die Reichweite von Felslawinen massgeblich bestimmen, sind die Reibungsparameter  $\mu$  (basaler Reibungskoeffizient [-]) und (turbulenter Reibungskoeffizient  $\xi$  [m/s<sup>2</sup>]). Im Falle von Felslawinen ist es nach Stand der heutigen Forschung nicht möglich, diese aus geotechnischen Kennwerten und Geländeeigenschaften abzuleiten. Sie können jedoch mithilfe von Fallstudienanalysen aus der Literatur eingegrenzt werden. Besonders hilfreich ist hierfür die Fallstudien-sammlung von Aaron und McDougall (2019), welche insgesamt 45 Felslawinen und Bergstürze analysiert haben. (Die Kalibration wurde zwar mit der Software DAN3D gemacht. Vergleichende Simulationen, z.B. beim Pizzo Cen-galo, haben jedoch ergeben, dass die Resulta-

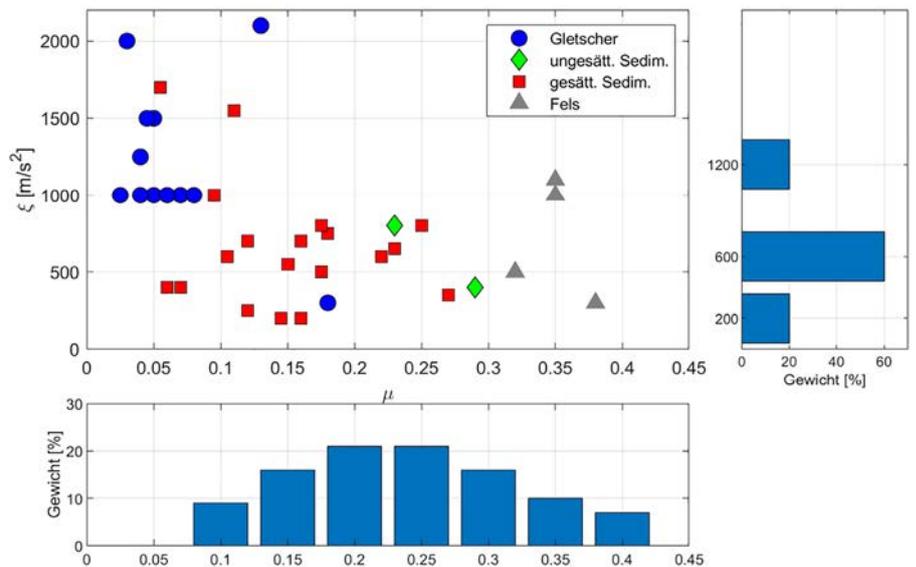


Abbildung 3: Rückgerechnete Parameter  $\mu$  und  $\xi$  für diverse Bergsturz-/Felslawinenfälle (Aaron+McDougall, 2019). Die für Brienz benutzten Parameterbereiche und Gewichtungen sind seitlich rechts und unten dargestellt.

te von DAN3D und RAMMS bei gleicher Parametrisierung vergleichbar sind, was auch aufgrund der Tatsache, dass die Stoffgesetze identisch sind, zu erwarten ist).

Die Werte für  $\mu$  und  $\xi$  sind in Abbildung 3 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass Bergstürze auf Gletscher die tiefsten Werte für  $\mu$  aufweisen (0.03 – 0.15). Bei gesättigtem Untergrund sind die Werte etwas höher, streuen aber zwischen 0.05 und 0.27. Bei ungesättigtem Untergrund liegen sie bei 0.23 – 0.29. Die höchsten Werte wurden für Felsuntergrund berechnet (0.32 – 0.4). Es ist nicht auszuschliessen, dass bei Brienz ein Bergsturz auf gesättigten Untergrund trifft (ca. 5 – 10 m Lockergesteinsschicht, BTG, 2020), der nach Niederschlägen oder bei Schnee gesättigt sein könnte. Daher wurde entschieden, für  $\mu$  den Bereich von 0.1 – 0.4 zu berücksichtigen, wobei ein Wert von 0.1 im Prinzip auch eine murgangartige Entwicklung der Absturzmasse berücksichtigt und/oder ein Worst-Case-Szenario bezüglich Auslaufverhalten darstellt.  $\xi$  hat generell bedeutend kleineren Einfluss auf den Auslaufraum. Für Brienz wurden Werte von 200, 600 und 1200 m/s<sup>2</sup> benutzt.

### Probabilistische Auslaufmodellierung

Bei der Berücksichtigung von neun Abbruchszenarien (Abbildung 2), einem Parameterraum von  $\mu = 0.1, 0.15, 0.2, \dots, 0.4$  und  $\xi = 200, 600, 1200$  m/s<sup>2</sup> ergeben sich  $7 \times 3 \times 9 = 189$  Modellresultate. Dieser «Modell-Zoo» repräsentiert zwar angemessen das breite Spektrum an möglichen Bergsturzzenarien, die Massnahmen auf diese grosse Anzahl an Ergebnissen zu stützen ist aber schwierig. Es wird beim einzelnen Modellresultat auch nicht ersichtlich, wie wahrscheinlich dieses eingeschätzt wird. Wir benutzen daher einen probabilistischen Ansatz, der es erlaubt, die Gesamtheit der Resultate inklusive deren Wahrscheinlichkeiten in einer Karte zusammenzufassen. Die Grundidee dieses Ansatzes lehnt sich an das Konzept der probabilistischen, seismischen Gefährdungsanalyse an (z.B. Wiemer et al 2015), welcher der Schweizerischen aber auch der globalen Erdbebengefährdungskarte zugrunde liegt. Dabei werden nicht nur einzelne Modellresultate berücksichtigt (etwa das optimistischste, ein mittleres und das pessimistischste Modell), sondern die Gesamtheit der möglichen Re-

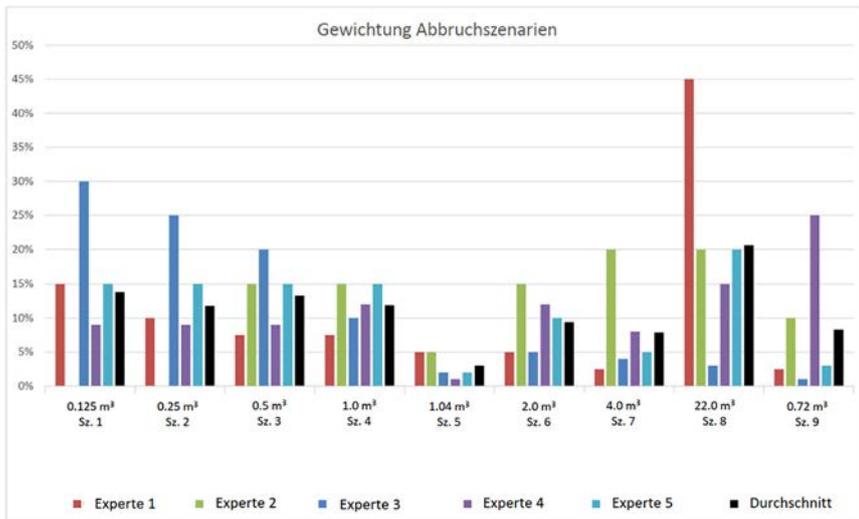


Abbildung 4: Gewichtung der einzelnen Abbruchszenarioszenarien aus Abbildung 2

sultate wird miteinbezogen. Ziel ist es, sowohl die Unsicherheiten im physikalischen Prozessverständnis (epistemische Unsicherheiten) wie auch die Zufälligkeit des Prozesses selber (aleatorische Unsicherheiten) angemessen darzustellen. Das Konzept wurde für den Fall Bergsturz oberhalb Brienz vereinfacht wie folgt angepasst: Die Anzahl Abbruchszenarioszenarien stellt einen Teil der Prozessunsicherheit dar. Wie in Abbildung 4 gezeigt ist, werden alle Szenarien berücksichtigt, allerdings mit einer individuellen Gewichtung, welche widerspiegelt, dass die Szenarien nicht alle gleich wahrscheinlich eingeschätzt werden. Die Gewichtung wurde mittels Experteneinschätzung erarbeitet. Dabei schätzten die Geologen der Fachgruppe Geologie und Naturgefahren (die Autoren A.H., A.L. und C.N.) und des Frühwarndienstes (S.S., V.G.) alle Szenarien individuell und auf Basis des momentanen Wissensstandes ein (Stand: 19. August 2019, vgl. Abbildung 4). Die definitive Gewichtung entspricht dem Mittelwert der individuellen Einschätzungen.

Der oben erwähnte Bereich der Eingangsparameter deckt sowohl das begrenzte Prozessverständnis wie auch deren Zufälligkeit ab: Diese Reibungswerte sind wohl zeitlich (witterungsbedingt) wie räumlich (untergrundbedingt) nicht konstant, sondern müssten

durch entsprechende Verteilungen dargestellt werden. Zusätzlich würden sie sich während eines Bergsturzes dynamisch entwickeln, was hier aber durch mittlere Werte entlang des Auslaufpfades dargestellt wird. Die Wahl eines breiten Parameterbereichs zielt also darauf ab, diese Unsicherheiten pragmatisch zu berücksichtigen. Der Parameter  $\mu$  wird entsprechend einer Normalverteilung um einen Mittelwert von 0.225 und einer Standardabweichung 0.1 abgebildet (Abbildung 3). Damit wird die Streuung der Literaturwerte berücksichtigt, aber den extremen Werten 0.1 und 0.4 weniger Gewicht zugewiesen. Ähnlich wurde für  $\xi$  vorgegangen (höchste Gewichtung dem mittleren Wert von 600 m/s<sup>2</sup>, tiefere Gewichtung den höheren und tieferen Werten; Abbildung 3), wobei diesem Parameter wenig Wichtigkeit zukommt.

Mithilfe dieser Gewichtungen kann nun die Wahrscheinlichkeit, dass eine Felslawine einen gewissen Ort erreicht, wie folgt berechnet werden: Erreicht die Felsmasse die Zelle der Reihe  $i$  und der Kolonne  $j$  einer Rasterkarte, wird dieser Zelle der Wert  $\delta_{ij} = 0$  zugewiesen, sonst  $\delta_{ij} = 1$ . Diese Karten (eine pro Modellrealisation), bestehend aus Zellen mit 1 und 0, werden dann gewichtet und aufsummiert. Dabei hat die Zelle mit den Indizes  $i$  und  $j$  des

Modellresultates  $n$  ein Gewicht  $W^n$ , welches sich aus dem Gewicht  $W_S$  des Abbruchsszenarios (Abbildung 4), dem Gewicht  $W_\xi$  von  $\xi$  und dem Gewicht  $W_\mu$  von  $\mu$  ergibt (Abbildung 3):  $W^n = W_M \cdot W_\xi \cdot W_\mu$ . Die Wahrscheinlichkeit  $P_{ij}$ , dass die Zelle  $ij$  erreicht wird, wird somit wie folgt geschätzt:

$$P_{ij} = \frac{\sum_n W^n \delta_{ij}^n}{\sum_n W^n}$$

Die beschriebene Prozedur wurde in einem Matlab-Algorithmus implementiert und die Resultate in ArcGIS dargestellt (vgl. Abbildung 5).

Es ist hier anzumerken, dass die Gewichtungen mittels Experteneinschätzung durchaus nicht vollständig frei von Befangenheiten sind, auch wenn unter mehreren Fachpersonen ein Konsens gefunden wird. Dies ist jedoch nicht nur beim beschriebenen probabilistischen Ansatz der Fall. Implizit ist dies auch ein inhärenter Teil jeder alternativen szenariobasierten Gefährdungseinschätzung. Auch dabei müssen Entscheidungen getroffen werden, z.B. welches Szenario massgebend ist, welche Parameter berücksichtigt werden und welche nicht und welches das realistischste und welches das pessimistischste Szenario ist, usw. Im Gegensatz zum probabilistischen Ansatz werden diese Entscheidungen normalerweise von weniger Fachpersonen getroffen, vor allem werden diese aber weniger formalisiert und weniger transparent und quantitativ offengelegt. Hier sehen wir die Stärke des probabilistischen Ansatzes.

## Resultate

Ein Beispiel einer resultierenden probabilistischen Auslaufkarte, welche alle Abbruchszenarioszenarien aus Abbildung 2 kombiniert, ist in Abbildung 5 gezeigt. Es ist bei der Interpretation zu berücksichtigen, dass die Karte nur die Auslaufwahrscheinlichkeiten im Falle eines katastrophalen Felsversagens darstellt, **d.h.**

**es ist eine bedingte Wahrscheinlichkeit.**

Es bestehen jedoch durchaus die Möglichkeiten eines portionenweisen Versagens des instabilen Hanges in Form von Blockstürzen ( $< 100'000 \text{ m}^3$ ), eines langsamen Auslaufens wie ein Schuttstrom (wie 1878 bereits im Falle des «Igl Rutsch» geschehen), oder dass die Rutschung sich beruhigt und nicht katastrophal versagt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die **absoluten Wahrscheinlichkeiten** bedeutend kleiner sind.

Die Karte zeigt jedoch, dass eine Felslawine den Fluss Albula am Fusse der Rutschung mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 20% erreicht. Mit einer Wahrscheinlichkeit von  $>10\%$  werden auch westliche Gebiete von Surava sowie östliche Gebiete von Tiefencastel erreicht. Konsultiert man die einzelnen Modellrealisationen, stellt man fest, dass ein Erreichen der Albula für Abbruchvolumen  $\geq 2 \text{ Mio m}^3$  für Modelle mit  $\mu \leq 0.2$  möglich ist, bei Abbruchvolumen  $< 2 \text{ Mio m}^3$  für Modelle mit  $\mu \leq 0.1$ . Das Szenario Aufstau Albula tritt wohl bei eher ungünstigen Bedingungen (bezüglich Abbruchszenario und Auslaufbedingungen) ein, nicht aber nur für die extremsten Szenarien.

In ähnlicher Weise wie alle Szenarien kombiniert wurden, können auch nur Untergruppen der Szenarien kombiniert werden. Dies ist in Abbildung 6 für Abbrüche von  $0.125 - 500 \text{ m}^3$  (Szenarien 1 bis 3 in Abbildung 2) vom einem sich besonders schnell deformierenden Gebiet oberhalb Brienz dargestellt. Die Gewichtungen in Abbildung 4 wurden entsprechend übernommen und hochskaliert, so dass die Summe der Gewichtungen für die Untergruppe wieder 1 ergibt. Die Karte ergibt eine 20 - 50% hohe Wahrscheinlichkeit, dass zumindest der nördliche Teil von Brienz von einer Felslawine getroffen werden könnte. Mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit von  $< 5\%$  kann so-

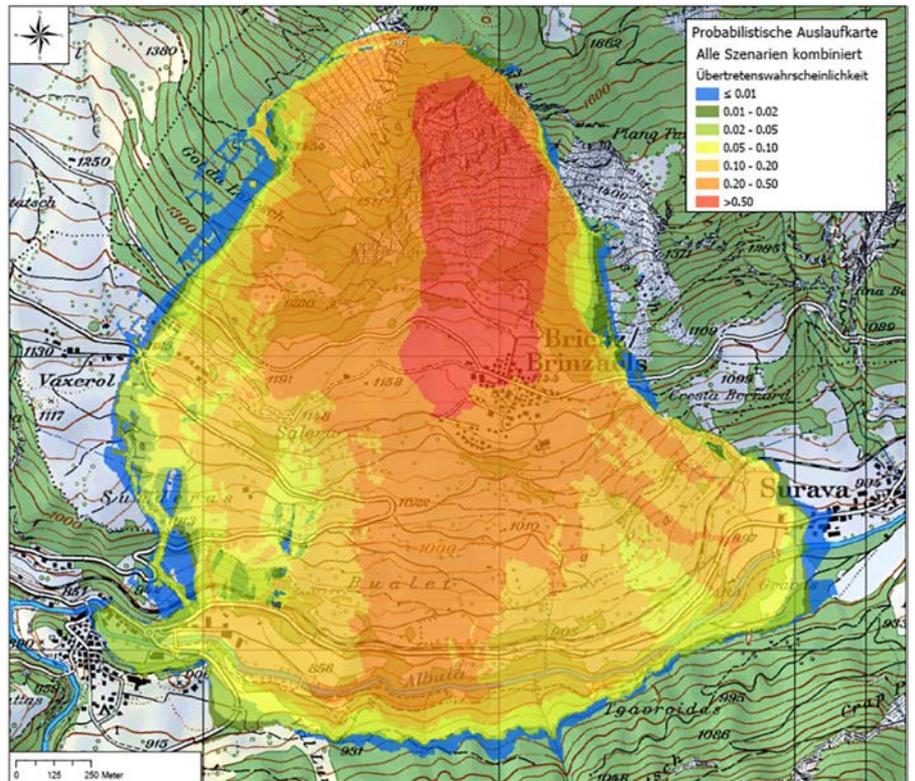


Abbildung 5: Probabilistische Karte des Wirkungsraumes eine Bergsturztes bei der Rutschung Berg. Kombination der Szenarien 1 – 9 aus Abbildung 2.

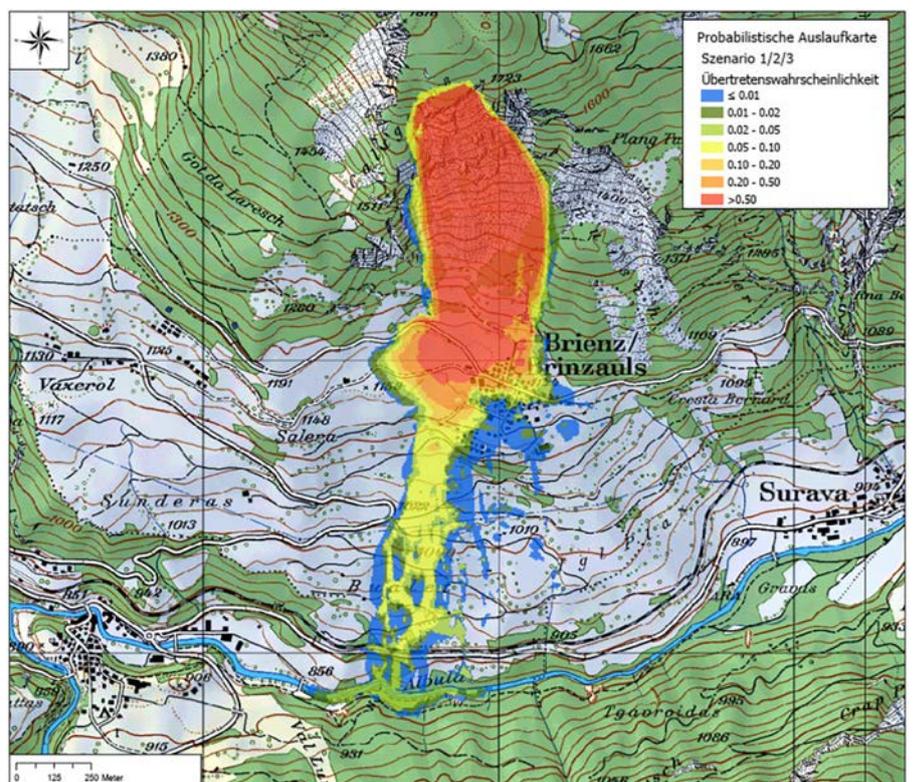


Abbildung 6: Probabilistische Karte des Wirkungsraumes eines kleinvolumigen Bergsturzes oberhalb Brienz. Kombination der Szenarien 1 – 3 aus Abbildung 2.

gar die Albula erreicht werden. Die einzelnen Modellrealisationen zeigen, dass ein Auftreffen auf den nördlichen Teil von Brienz bereits bei Modellen mit  $\mu \leq 0.4$  möglich ist.

## Aufstauung Albula

Abbildung 5 zeigt, dass nach einem Bergsturzereignis ein Aufstauen der Albula im Talgrund nicht auszuschliessen ist. Analog dem beschriebenen Verfahren kann nun die Aufstaukote und das Überschwemmungsgebiet probabilistisch berechnet werden. Dabei wurde für jedes Felslawinenmodell berechnet, ob es zu einem Aufstauen kommen kann, und - falls ja - wie hoch die Aufstaukote ist. Aus dem Höhenmodell, bei welchem die Bergsturzablagerung dazugerechnet wurden, wurde dann berechnet, welches Gebiet oberhalb der Bergsturzablagerungen überflutet wird. Die Gesamtheit der Aufstaukoten und der Überschwemmungsgebiete wurde entsprechend den Modellgewichten in eine probabilistische Karte überführt (Abbildung 7).

Die westlichsten Gebäude von Surava sowie die Kantonsstrasse sind ab einer Kote von ca. 890 m ü.M. betroffen, was mit einer (bedingten) Wahrscheinlichkeit von ca. 15% eintritt. Ab einer Kote von 910 m ü.M. sind bereits grosse Teile von Surava betroffen, was mit ca. 11% (bedingter) Wahrscheinlichkeit eintritt. Wiederum hilft eine Betrachtung der einzelnen Modellrealisationen um festzustellen, wie extrem die dazu führenden Bedingungen sein müssen: Zu einer Überschwemmung von Teilen Suravas (d.h. Kote 890 m ü.M) kommt es bei Abbruchvolumen von mehr als 4 Millionen m<sup>3</sup> und  $\mu \leq 0.15$ . Die weitgehende Überschwemmung Suravas tritt nur beim Extremzenario mit 22 Millionen m<sup>3</sup> auf, aber bereits bei  $\mu \leq 0.25$ .

## Chancen und Grenzen des probabilistischen Ansatzes

Der präsentierte probabilistische Ansatz zur Berechnung des Prozessraumes bei einem Bergsturz ermöglicht die gesamte Bandbreite von möglichen Modellresultaten gleichzeitig und kompakt in einer einzigen Karte zu kommunizieren. Dabei werden die Robustheit und die Unsicherheiten der Modellbefunde transparent und quantitativ ausgewiesen. Die erforderliche Gewichtung aller Möglichkeiten bei jedem Berechnungsschritt zwingt die beteiligten Fachpersonen, ihre Einschätzungen quantitativ darzulegen. Wie im Falle von Brienz basieren diese Einschätzungen auf einem momentanen Wissensstand, der sich im Laufe der Untersuchungen wandelt. Es ist somit unerlässlich, dass die Resultate periodisch evaluiert und den neuen Erkenntnissen angepasst werden. Aufgrund der Einfachheit der Berechnungen ist dies jedoch ohne grossen Aufwand möglich.

Eine Schwierigkeit bleibt auch dem probabilistischen Ansatz erhalten: Welche Wahrscheinlichkeit ist nun massgebend für die weitere Massnahmenplanung, etwa für die Festlegung eines Evakuationsperimeters?

Bei Brienz wurde bislang mit der bedingten Wahrscheinlichkeit im Falle eines Bergsturzes gearbeitet, d.h. berechnet wurde die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Gebiet *im Falle eines Bergsturzes* erreicht wird. Nicht mit eingerechnet ist dabei eine Abschätzung, wie gross die Wahrscheinlichkeiten sind, dass die jeweiligen Szenarien innerhalb einer definierten Zeitspanne, z.B. in den nächsten fünf Jahren, überhaupt eintreten könnten. Ebenfalls nicht berücksichtigt sind somit die Szenarien, welche ein bruchstückartiges/portionenweises Versagen der Gesteinsmassen ohne Bergsturzdynamik und ohne grössere Schäden an Infrastrukturen beinhalten oder auch das Nullszenario, d.h. dass es zu gar keinem Abbruch kommen könnte.

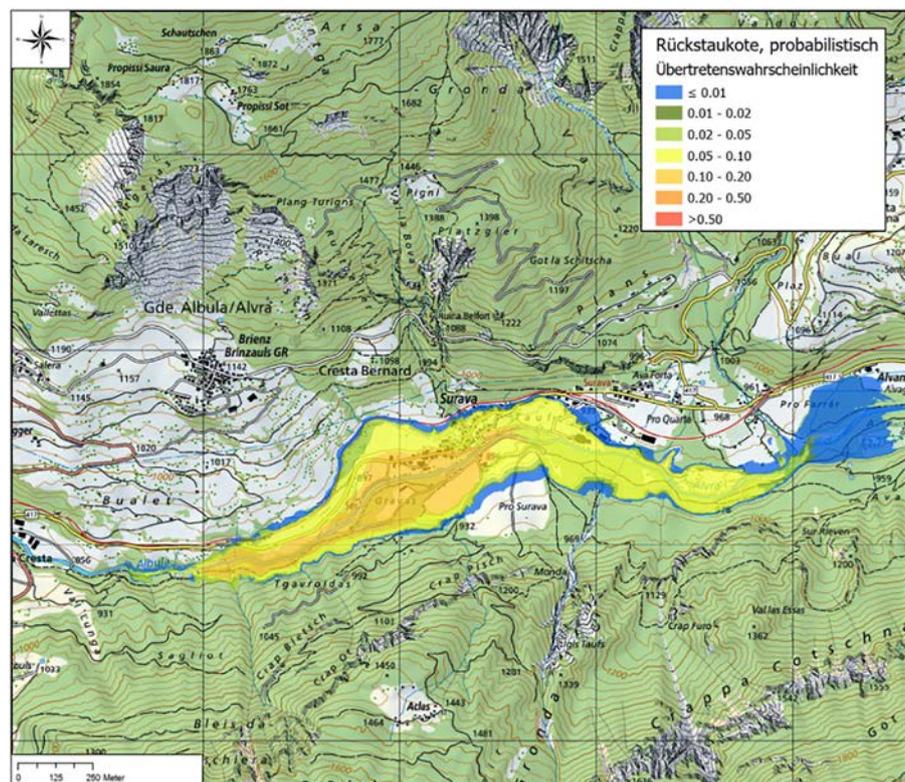


Abbildung 7: Probabilistische Darstellung der möglichen Aufstaukote im Falle eines Bergsturzes, der den Fluss Albula am Fusse der Rutschung Brienz erreicht.

Eine Umwandlung in eine absolute Wahrscheinlichkeit pro Jahr könnte leicht berechnet werden, wenn die Abbruchsszenarien anstatt einer relativen Gewichtung untereinander mit einer eingeschätzten Eintretenswahrscheinlichkeit innerhalb eines definierten Zeitraums versehen werden. Dies würde es ermöglichen, die Massnahmenplanung auf Konturen für die Eintretenswahrscheinlichkeit pro Zeitintervall (z.B. 50 Jahre, vgl. Kap. 2.8, BAFU 2016) zu bestimmen, so wie es in der Naturgefahrenbeurteilung üblich ist. Dieser Schritt wird bei Brienz durchgeführt, sobald die Grundlagenerhebung abgeschlossen ist und die darauf bauenden Szenarien vorhanden sind. Eine weitere Möglichkeit bestünde darin, risikobasiert vorzugehen, wobei nicht nur die Eintretenswahrscheinlichkeiten berechnet würden, sondern auch das zu erwartende Schadensausmass berücksichtigt werden könnte. Generell kann der probabilistische Ansatz gut als Basis für verschiedenartige, wahrscheinlichkeitsbasierte Prozessanalysen verwendet werden, wie wir dies auch am Beispiel Aufstau Albula demonstrieren konnten.

## Referenzen

Aaron, J., & McDougall, S. (2019). Rock avalanche mobility: The role of path material. *Engineering Geology*, 257, 105126.

Amann, F., Gischtig, V., Kowalski, J., Aaron, J., Mc Ardell, B., Bartelt, P. (2019). Numerische Modellierung der Reichweiten potentieller Felslawinen am Pizzo Cengalo, Kanton Graubünden, Schweiz. Schlussbericht zuhanden des Amtes für Wald und Naturgefahren, Graubünden, 9. April 2019.

BAFU (Hrsg.) 2016: Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608: 98 S.

Büro für technische Geologie AG (16.03.2020). Rutschung Brienz/Brinzauls GR, Geologische Grundlagenerhebung Rutschung Dorf: Zusammenstellung der bislang durchgeführten Untersuchungen (Zwischenbericht 2). Bericht zuhanden der Gemeinde Albula/Alvra.

Heim, A. (1881). Gutachten betreffend Rutschung bei Brienz. Handschriftlicher Bericht an die hohe Regierung des eidg. Standes Graubünden.

SLF (2019). Brienz/Brinzauls: Analyse der Sackungsbewegungen anhand von Luftbildern im Zeitraum 1973-2019. Bericht von Samuel Halter.

Wiemer, S., Danciu, L., Edwards, B., Marti, M., Fäh, D., Hiemer, S., Wössner, J., Cauzzi, C., Kästli, P., Kremer, K. (2016). Seismic hazard model 2015 for Switzerland (SULhaz2015). Report, Swiss Seismological Service, ETH, Zurich, Switzerland.

# Murgangenschutzbauwerk Meretschi, Wallis

## Planung mit 3D-Modell – Optimierung mit Modellversuchen

Florian Frank <sup>1</sup> ([florian.frank@geoformer.ch](mailto:florian.frank@geoformer.ch))  
 Prof. Davood Farshi <sup>2</sup> ([davood.farshi@ost.ch](mailto:davood.farshi@ost.ch))  
 Matthias Stucki <sup>2</sup> ([matthias.stucki@ost.ch](mailto:matthias.stucki@ost.ch))

<sup>1</sup> geoformer igp AG, Brig-Glis

<sup>2</sup> OST - Ostschweizer Fachhochschule, Rapperswil

### Résumé

Des petites coulées de boue se sont produites dans le bassin versant de Meretschi au cours des dernières années. Les événements à plusieurs coulées successives peuvent atteindre plus de 100'000 m<sup>3</sup>. Le collecteur existant étant conçu pour de petites coulées de boue, les habitations et les voies de circulation sont largement menacées fortement. Il est prévu de combler les déficits de protection par un ouvrage contre les coulées de boue à plusieurs niveaux, qui complète de manière optimale les structures existantes. Sur la base des données altimétriques actuelles, l'ouvrage a été implémentée dans un modèle 3D.

Des essais sur modèle physique ont été réalisés pour vérifier la capacité fonctionnelle et la robustesse de la structure lors de scénarios pertinents de coulées de boue. L'ouvrage modèle a été optimisé progressivement sur la base des résultats des tests. Un fonctionnement robuste a ainsi pu être mis en place. Quant à l'impact d'événements successifs sur les ouvrages de protection à plusieurs niveaux, des résultats intéressants ont été obtenus dans le cas de surcharge des structures individuelles.

### Zusammenfassung

Im Einzugsgebiet Meretschi sind in vergangenen Jahren kleinere Murgänge aufgetreten. Mehrschubereignisse können über 100'000 m<sup>3</sup> erreichen. Da der bestehende Sammler für kleine Murgänge ausgelegt ist, sind Siedlungen und Verkehrswege verbreitet erheblich gefährdet. Die Schutzdefizite sollen

mit einem mehrstufigen Murgangenschutzbauwerk behoben werden, das bestehende Bauwerke optimal erweitert. Auf Basis aktueller Höhendaten wurde das Bauwerk in einem 3D-Modell umgesetzt. Mit physischen Modellversuchen wurden Funktionstauglichkeit und Robustheit des Bauwerks mit massgebenden Murgangsszenarien überprüft. Das Modellbauwerk wurde anhand von Erkenntnissen der Modellversuche schrittweise optimiert. Damit konnte eine robuste Funktionsweise erreicht werden. In Bezug auf die Prozesswirkung in mehrstufigen Schutzbauwerken ergaben sich dabei interessante Erkenntnisse bei Überlastfällen an Einzelbauwerken.

### Einleitung

Im Einzugsgebiet Meretschibach (Agarn und Leuk, VS) sind in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten immer wieder kleinere Murgänge aufgetreten. In der aktuellen Gefahrenbeurteilung wurde ein mobilisierbares Geschiebepotential im Einzugsgebiet nachgewiesen, das die bisherigen Ereignisvolumen deutlich übersteigt. Bei Mehrschubereignissen in Kombination mit der Gerinneerosion kann dadurch ein Ereignisvolumen von über 100'000 m<sup>3</sup> im Kegelbereich anfallen. Da der bestehende Geschiebesammler in Siedlungsnähe nur für die regelmässig auftretenden Ereignisse mit Ereignisvolumen bis zu etwa 20'000 m<sup>3</sup> ausgelegt ist, sind darunterliegende Wohnsiedlungen und Verkehrswege verbreitet erheblich bis mittel gefährdet. Bestehende Schutzdefizite sollen daher mit einem neuen, mehrstufigen Murgangenschutzbauwerk behoben werden, das

in die bestehenden Bauwerke integriert wird und diese optimal erweitert.

### Murgangsszenarien im Einzugsgebiet Meretschi

Das Einzugsgebiet Meretschi befindet sich östlich des Illgrabens im Kanton Wallis. Vom derzeit aktiven Anrissgebiet "Bochtür" aus werden regelmässig kleinere Murgangereignisse mit Ereignisvolumen von bis zu 15'000 m<sup>3</sup> dokumentiert, die über das Hauptgerinne vorstossen und in einem kleinen Geschiebesammler zurückgehalten werden.

Die Geschiebepotentiale im Anrissgebiet „Bochtür“, in weiteren Nebenrinnen sowie entlang des Gerinnes sind jedoch bedeutend grösser. Gemäss aktueller Gefahrenbeurteilung (wasser/schnee/lawinen, 2016) können bis zu rund 130'000 m<sup>3</sup> im 300-jährlichen Szenario sowie bis zu etwa 160'000 m<sup>3</sup> im Extremereignis mobilisiert werden. Aus unterschiedlichen Anrisszonen wird das Material im Ereignisfall in mehreren Murschüben mobilisiert, die entlang der Fliesswege weiteres Material im Gerinne und aus Böschungen erodieren. Dadurch können die maximalen Schubvolumen am oberen Kegelhals ab dem 100-jährlichen Szenario bis zu 20'000 m<sup>3</sup> erreichen (wasser/schnee/lawinen, 2016). Bei einer allfälligen Erosion von frischen Gerinneablagerungen aus vorangegangenen Schüben bzw. kleinen Ereignissen im Hauptgerinne am oberen Kegelhals sind ab dem 100-jährlichen Szenario auch grössere Schubvolumen bis zu 40'000 m<sup>3</sup> im oberen Kegelbereich möglich (geoformer igp AG, 2018 und 2020).

## Gefahrensituation und bestehende Schutzbauwerke

### Entwicklungen Murgangdisposition

Bei einem Murgangereignis im August 2019 ist im unteren Anrissgebiet eine Ausbruchsstelle aufgetreten, die eine potenzielle Gerinneentwicklung westlich des Hauptgerinnes andeutet. Murgänge aus dem Bochtür könnten den Meretschikegel daher auch an unterschiedlichen Stellen verteilt über der gesamten Breite des Kegels erreichen (Abbildung 1).

Im Zusammenspiel geologischer und klimatischer Veränderungen in den Anrisszonen könnten im Gebiet Meretschi durch eine erhöhte Steinschlagaktivität vermehrt Murgänge auftreten oder sowohl zu grösseren Schub- als auch Ereignisvolumen führen. Wie Fallbeispiele in den Alpen gezeigt haben, können zudem auch einzelne Fels- und Bergsturzereignisse, deren Ablagerungszonen in den kritischen Murganganrisszonen liegen, zu einer periodisch erhöhten Murgangaktivität führen – wobei Murgänge sowohl in Magnitude als auch der Frequenz vorübergehend deutlich zunehmen (Frank et al., 2019; Walter et al., 2019). Diese potentiellen Entwicklungen der Disposition und Aktivitätsmuster bei Murgängen verdeutlichen die Wichtigkeit der Planung von robusten Schutzbauwerken.

### Bestehende Schutzbauwerke und Schutzwirkung

Das bestehende Murgangschutzbauwerk im Einzugsgebiet Meretschi ist auf die Szenarien der unterschiedlichen Anrisszonen und Gerinneverlagerungen teilweise ausgerichtet: Zum einen werden potentielle Ausbrüche aus dem Hauptgerinne durch den Leitdamm Ost begrenzt. Zum anderen würden Murgänge, die über neue Gerinneverlagerungen westlich des Hauptgerinnes den Kegel erreichen, über die Leitdämme 1 und 2 ins Hauptgerinne zurückgeleitet (Abbildung 1) (Ingenieurgesellschaft

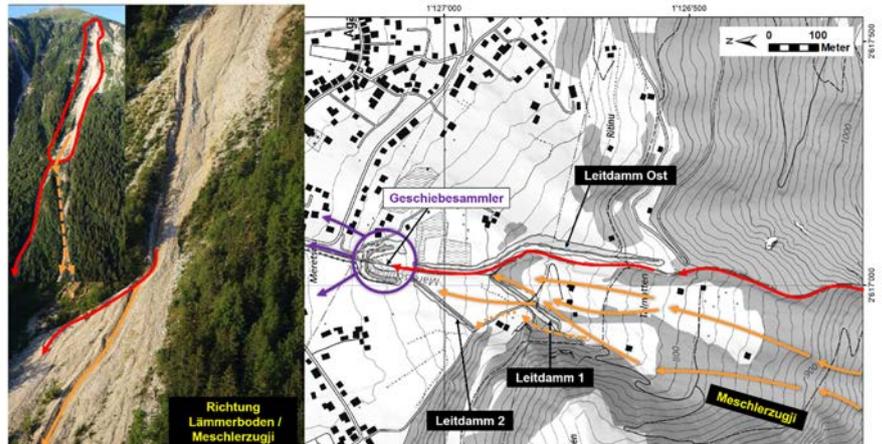


Abbildung 1: Gefahrensituation bei Ausbruchsstelle vom August 2019 (Quelle Fotos: Geoplan AG, 2019) und potentielle Gerinneentwicklungen bis auf den Kegel und ins bestehende Schutzbauwerk (Quelle Darstellung: geoformer igp AG, 2019)

T&C AG und Geo7, 2002; Teyssiere & Candolfi AG, 2010).

Die Rückhaltekapazität des bestehenden Geschiebesammlers beträgt jedoch nur knapp 20'000 m<sup>3</sup>. Daher kann der bestehende Geschiebesammler bereits im 30-jährlichen Szenario überströmt werden. Im 100- und 300-jährlichen Ereignis wären geschlossene Siedlungen und Verkehrswege von mittleren bis starken Prozessintensitäten betroffen. Für geschlossene Siedlungen wurde daher das Schutzziel 100 Jahre festgelegt, wobei gemäss Schutzzielmatrix des Bundes im 300-jährlichen Ereignis maximal schwache Intensitäten zulässig sind (ARE, BWG, BAFU, 2005). In geschlossenen Siedlungen ist daher nur ein Wasserabfluss mit schwacher Intensität zulässig, der aus Murgangablagerungen auftreten kann.

Die Platzverhältnisse zwischen dem bestehenden Geschiebesammler und den geschlossenen Siedlungen sind räumlich stark eingeschränkt (Abbildung 1). Um die gefährdeten Siedlungen zu schützen, müssen die Murgänge, die aus unterschiedlichen Gerinneverlagerungen den Kegel erreichen können, in einem klar begrenzten Perimeter im Kegelsbereich zurückgehalten werden können. Daher wur-

de innerhalb eines erweiterten, mehrstufigen Schutzbauwerks eine – dem maximalen Ereignisvolumen im 300-jährlichen Szenario entsprechende – Rückhaltekapazität von gegen 130'000 m<sup>3</sup> angestrebt.

## Planung mehrstufiges Schutzbauwerk

### Erweiterung Schutzkonzept mit mehrstufigem Sammlersystem

Aufgrund dieser Ausgangslage wurde in Diskussion und im Austausch mit den beteiligten Akteuren als Bestvariante zur Behebung resp. Reduktion der Schutzdefizite eine deutliche Erweiterung der Rückhaltekapazitäten mit 1-2 zusätzlichen Geschiebesammlern ausgewählt (geoformer igp AG, 2018).

Auf Basis eines aktuellen Höhenmodells wurden zuerst die Geländeverhältnisse studiert. Anhand der Gefällsknicke im Gerinne und den relativen Terrassen entlang des Gerinnes konnten zwei mögliche Sammlerstandorte identifiziert werden. Die entsprechenden Standorte schliessen jeweils an die bestehenden Leitdämme an. Damit können diese ihre wichtige Funktion der Rückleitung von Murgängen in das Hauptgerinne respektive die Einleitung in das (erweiterte) Schutzbauwerk weiterhin erfüllen (Abbildung 2).

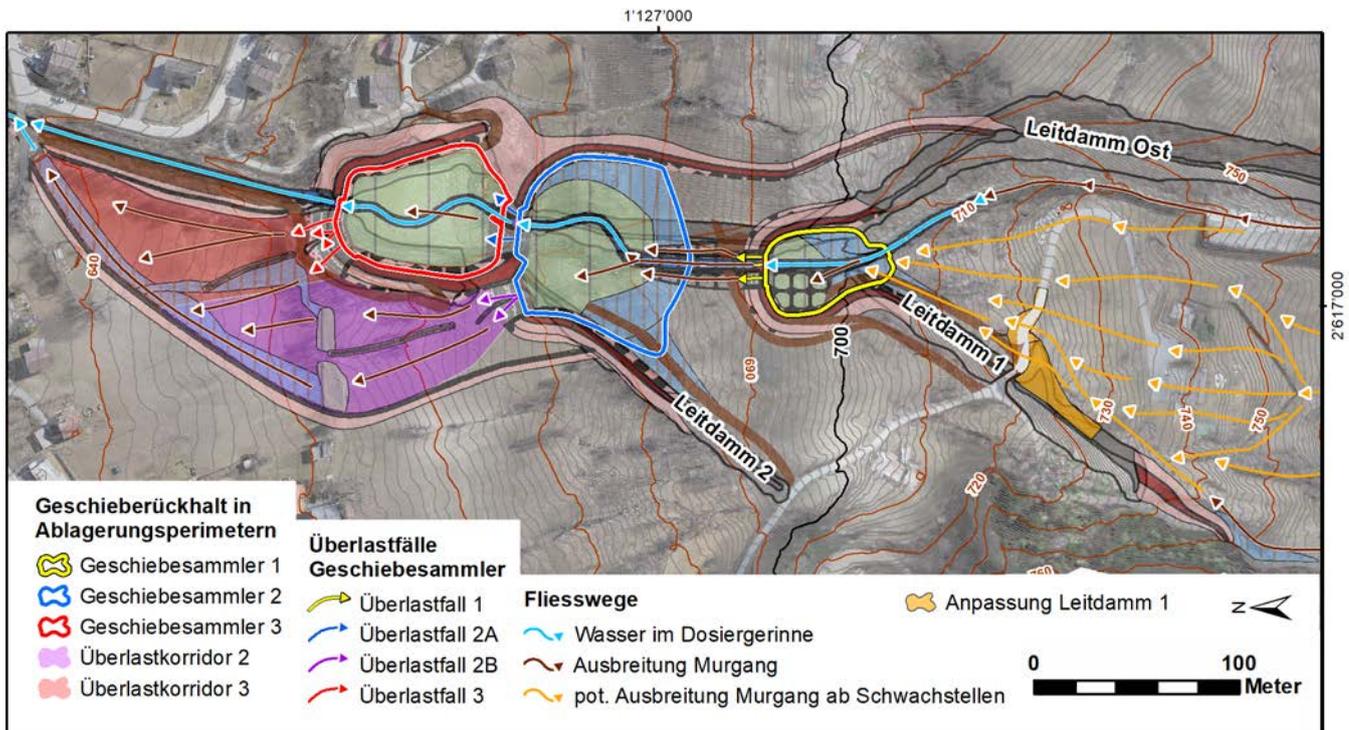


Abbildung 2: Skizze der geplanten Erweiterung: Schutzkonzept mit einem mehrstufigen Sammlersystem und Überlastkorridoren mit Leit- und Ablenkdammen sowie einem Abschlussbauwerk zur Rückführung des Wasserabflusses ins Hauptgerinne (Quelle: geoformer igp AG, 2019).

Der neue **Geschiebesammler 1** wurde daher am unteren Ende des Leitdamms 1 sowie im Anschluss an den Leitdamm Ost angeschlossen. Er bietet mit gut 20'000 m<sup>3</sup> eine vergleichbare Rückhaltekapazität wie der bestehende Geschiebesammler und kann somit die sehr häufigen Ereignisse (Wiederkehrperiode 10 Jahre) zurückhalten. Diese oberste Bauwerksstufe muss im Überlastfall alle nachfolgenden Schübe zuverlässig auf die nächstuntere Stufe ableiten können.

Auf der mittleren Bauwerksstufe wurde der neue **Geschiebesammler 2** geplant, der wiederum an den Leitdamm 2 anschliesst. Mit diesem Sammler 2 kann die Rückhaltekapazität um etwa 70'000 m<sup>3</sup> erweitert werden. Im Überlastfall sollen nachfolgende Murgänge primär über die Überlastsektion 2A in den bestehenden Sammler (neuer Sammler 3) abgeleitet werden. Funktionalität und Nutzen einer höher gelegenen Überlastsektion 2B mit angehängtem Überlastkorridor wurde im Rahmen der Modellversuche überprüft (vgl. Kapitel "Optimierung an Einzelbauwerken").

Der **Geschiebesammler 3** weist weiterhin einen zusätzlichen Rückhalt von gegen 20'000 m<sup>3</sup> auf. Mit dem starken Gefällsknick am Einlauf sollen Fließgeschwindigkeiten bei grossen Murschüben nochmals reduziert werden. Der Sammler soll zudem mit der breiten Überlastsektion 3 optimiert werden, damit die seitlichen Leitdämme 3 und 4 im Überlastkorridor mit relativ geringen Fließhöhen und reduzierten Fließgeschwindigkeiten angeströmt werden.

Mit den zusätzlichen Ablagerungskapazitäten im **Überlastkorridor** steigen die Rückhaltekapazitäten im mehrstufigen Schutzbauwerk auf insgesamt gegen 130'000 m<sup>3</sup> an. Damit könnte das angestrebte Schutzziel 300 Jahre grundsätzlich erreicht werden. Voraussetzung dafür ist neben einem ausreichenden Rückhalt auch eine zuverlässige und robuste Funktionalität des Schutzbauwerks bei allen massgebenden Mehrschubszenarien. Deshalb wurde im Austausch mit den verantwortlichen Akteuren entschieden, physische Modellversuche zur Überprüfung dieser Zielsetzungen sowie

gegebenenfalls notwendige Optimierungen an Einzelbauwerken durchzuführen.

### Umsetzung Schutzkonzept in 3D-Modell

Um das Schutzbauwerk für die Modellversuche im Modellmassstab aufbauen zu können (vgl. Kapitel "Ziele der Modellversuche"), wurde in einem weiteren Planungsschritt ein 3D-Modell des mehrstufigen Schutzbauwerks erstellt (Abbildung 3). Basierend auf dem Geländemodell wurden die Abtiefungen für die zwei neuen Sammler und die Geländemodellierungen im Überlastkorridor realisiert sowie der Verlauf des neuen Niederwassergerinnes im Modell abgesenkt. In einem zweiten Schritt wurden sämtliche Dämme der Sammler mit Überlastsektionen sowie die neuen Leit- und Ablenkdamme gemäss Planprofilen auf das 3D-Modell aufgebaut. Das erstellte 3D-Modell ermöglicht nicht nur den Aufbau des Modellbauwerks für die Modellversuche, sondern bietet auch für andere Planungsschritte gewisse Vorteile. So können z.B. Auftrag und Abtrag genauer und zuverlässiger quantifiziert

werden. Des Weiteren kann die Einhaltung der minimal erforderlichen sowie maximal zulässigen Überdeckung der Gasleitung, die durch den Überlastkorridor verläuft, für den gesamten Abschnitt im Perimeter systematisch überprüft werden. Zudem bietet das 3D-Modell eine gute Grundlage für illustrative Ansichten des geplanten Schutzbauwerks, was insbesondere im Rahmen der partizipativen Planung zur Veranschaulichung hilfreich sein kann.

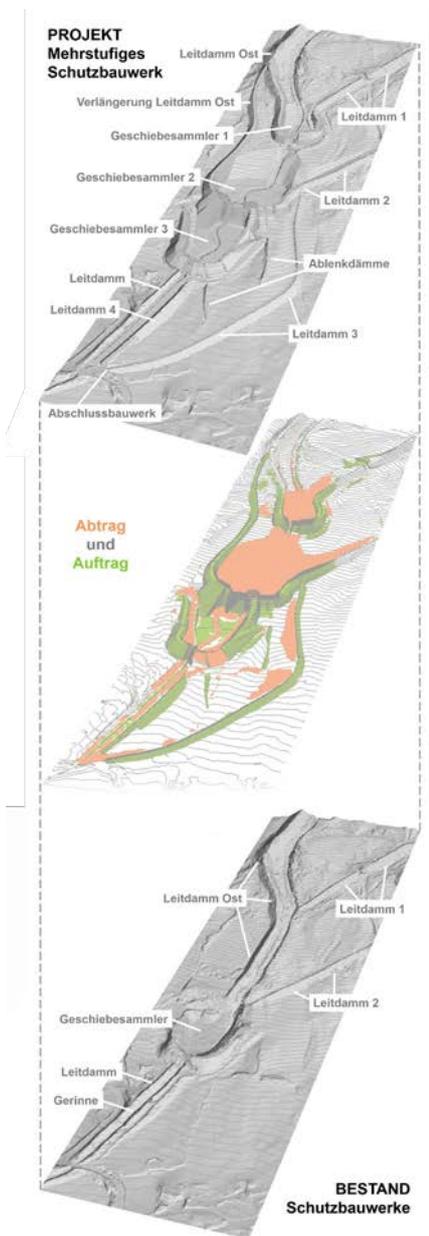


Abbildung 3: 3D-Modell des geplanten, mehrstufigen Sammlersystems mit Leit- und Ablenkdämmen in Überlastkorridoren (Quelle: geoformer igp AG, 2019).

## Physische Modellversuche

### Ziele der Modellversuche

Für die Modellversuche wurden folgende Ziele definiert (geoformer igp AG, 2020):

- Die Schutzwirkung des Bauwerks soll in Abhängigkeit der bestehenden Murgangsszenarien für die Jährlichkeiten 30, 100 und 300 Jahre überprüft und dokumentiert werden.
- Die Wirkungs- und Funktionsweise im Überlastfall sind am mehrstufigen Schutzbauwerk sowie an den relevanten Einzelbauwerken zu überprüfen.
- Das Modellbauwerk soll anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus den Versuchen weiter optimiert werden, um die beiden oben genannten Zielsetzungen zu erreichen.

Als Mittelpunkt für die Zielerfüllung gilt das Modellbauwerk, welches im Wasserbaulabor der OST – Ostschweizer Fachhochschule, Rapperswil erbaut wurde. Um den vorgegebenen Perimeter von rund 600 x 190 Meter im Labor nachzubilden, wurde ein möglichst hoher Massstabsfaktor von 1:55 gewählt, welcher trotzdem innerhalb des Anwendungsbereichs vom Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz liegt (Kobus, 1984). In der Abbildung 4 ist das rund 13 x 4.5 Meter grosse Modellbauwerk inklusive der Versuchseinrichtung ersichtlich. Trotz des hohen Massstabsfaktors ist die Genauigkeit der Einzelbauwerke zentral.

### Versuchsprogramm

Um die Ziele zu überprüfen, wurden die Modellversuche in drei Teilen durchgeführt – die Vorversuche, die Hauptversuche zur Überprüfung und Optimierung der Überlastsektionen sowie die Hauptversuche auf das gesamte Schutzbauwerk anhand verschiedener Mehrschubszenarien.

Die Umsetzung von **Vorversuchen** ist relevant, damit das Laborteam den wiederkehrenden Versuchsablauf optimieren kann, sowie

um die erforderlichen Zielwerte zu erreichen. Die Modellmischung wird für jede der zu verwendenden Schubvolumen auf die beiden Zielwerte, nämlich die mittlere Geschwindigkeit sowie den Spitzenabfluss der Murgangfront, kalibriert und für die Hauptversuche verwendet.

In den **Hauptversuchen Überlastsektionen** wurden die Wirkungen sowie Funktionen aller Überlastsektionen mittels vorverfüllten Geschiebesammlern überprüft und optimiert. Zwei der durchgeführten Umbauten sind im nachfolgenden Kapitel näher beschrieben.

Die **Hauptversuche auf das gesamte Schutzbauwerk** überprüfen die Funktionalität des Bauwerks aufgrund verschiedener Mehrschubszenarien. Diese Szenarien erreichen in den Modellversuchen ein maximales Ereignisvolumen von rund 130'000 m<sup>3</sup> mittels 6 grossen Schüben (vgl. Kap. "Überprüfung Funktionstauglichkeit mit Mehrschubszenarien") oder mehrerer kleiner Schubvolumen. Nachfolgend sind die Erkenntnisse aus dem Szenario mit 6 grossen Schüben beschrieben, die mittlerweile durch die Resultate des zweiten Szenarios bestätigt wurden.

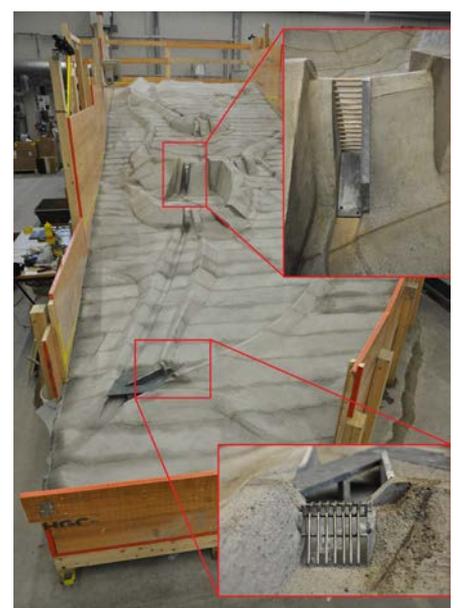


Abbildung 4: Gesamtes physisches Modellbauwerk Meretschi inklusive der Einzelbauwerke (oben: Überlastbauwerk 2B; unten: Abschlussbauwerk 4) (Fotos: OST, 2020)

### Optimierungen an Einzelbauwerken

Während den Hauptversuchen wurden die Einzelbauwerke anhand neuer Erkenntnisse aus den Modellversuchen laufend optimiert.

Beim Geschiebesammler 1 zeigte sich bereits in den Vorversuchen ein beidseitiges Überströmen der Dämme bei Einzelschüben ab 30'000 m<sup>3</sup>. Bei den ersten Hauptversuchen auf die vorverfüllten Geschiebesammler trat die Wirkung bereits ab einem Schubvolumen von 20'000 m<sup>3</sup> ein. Die Überlastsektion kann die kleineren Schubvolumen kontrolliert weitergeben. Die Abflusskapazitätsgrenze der Überlastsektion ist bei einem Schubvolumen ab 20'000 m<sup>3</sup> aufgrund einer Wirkungshöhe (vertikaler Abstand Überlastsektion – Dammkrone) von 2 Meter überschritten.

Um die Funktionalität vom Geschiebesammler 1 zu gewährleisten, wurde einerseits eine beidseitige, sekundäre Überlastsektion sowie eine Dammerhöhung mit einer totalen Wirkungshöhe von 5 Meter umgesetzt. Die lineare Dammerhöhung in Richtung der Leitdämme Ost und 1 führt auch zu einer allgemeinen Erhöhung vom Geschiebesammler 1. Somit reduziert sich das Risiko einer Überströmung beim Knick vom Leitdamm 1 in den Geschiebesammler 1, welcher aufgrund von vorverfüllten Sammlern und der anprallenden Murgangfront entsteht. In der Abbildung 5 sind die Optimierungen am Geschiebesammler 1 ersichtlich.

Die Überlastsektion 2B, auf der orografisch linken Seite im Geschiebesammler 2, hat zum Ziel einen Teil des Abflusses in den Überlastkorridor zu leiten und dementsprechend den Geschiebesammler 3 zu entlasten (Abbildung 6: Vorher). Es hat sich gezeigt, dass die Aufteilung der beiden Überlastsektionen planmässig funktioniert, der Nutzen der Überlastsektion 2B jedoch zu gering ist. Einerseits wird das maximale Ereignisvolumen von 130'000 m<sup>3</sup> bei der Jährlichkeit 300 Jahre durch die drei Ge-



Abbildung 5: Optimierung am Geschiebesammler 1 aufgrund des seitlichen Überströmens der Dämme. (Fotos: OST, 2020)



Abbildung 6: Schliessung der Überlastsektion 2B wurde mit Verlängerung des Leitdamms 2 bis hin zur Überlastsektion 2A umgesetzt. (Fotos: OST, 2020)



Abbildung 7: Absenkung der Überlastsektion 3 zur Optimierung der Rückhaltevolumen. (Fotos: OST, 2020)

schiebesammler sowie den Überlastkorridor 3 zurückgehalten; andererseits fliesst zu wenig Material über die Überlastsektion in den Überlastkorridor 2.

Daher wurde die Überlastsektion 2B vollständig geschlossen, indem der linke Damm bis zur Überlastsektion 2A verlängert wurde (Abbildung 6: Nachher). Dadurch wird das Rückhaltevolumen im Geschiebesammler 2 leicht verringert. Für die grossen Murgänge ist aber weiterhin ausreichendes Ablagerungsvolumen im Schutzbauwerk vorhanden. Dank der einfacheren Konstruktionsweise können die Baukosten in diesem Teil erheblich reduziert und das Bauwerk besser in die Landschaft integriert werden.

Wie erwähnt, soll das 300-jährige Ereignisvolumen von 130'000 m<sup>3</sup> in den drei Geschiebesammlern und dem Überlastkorridor 3 zurückgehalten werden. Ziel ist es, das 100-jährige Ereignisvolumen in den drei Geschiebesammlern zurückzuhalten, damit der Überlastkorridor 3 nicht aktiviert wird. Die Auswertung der Ablagerungsverteilung zeigte in den Hauptversuchen ein wesentlich höheres Rückhaltevolumen als die 130'000 m<sup>3</sup>, das wie beabsichtigt durch das gesamte Schutzbauwerk zurückgehalten wird. Die Kote der Überlastsektion 3 wurde deshalb abgesenkt, um beide Bedingungen zu erfüllen – keine Aktivierung beim 100-jährigen Ereignisfall und Aktivierung sowie zusätzlicher Rückhalt

im Geschiebesammler 3 beim 300-jährigen Ereignisfall. Ein positiver Nebeneffekt der Absenkung ist die bessere Integration in die Landschaft, da die bestehende Dammkrone nur geringfügig erhöht werden muss. Die Optimierung der Überlastsektion 3 ist in der Abbildung 7 ersichtlich.

**Überprüfung Funktionstauglichkeit mit Mehrschubszenarien**

Die Funktionalität des gesamten Schutzbauwerks wurde mit dem Mehrschubszenario gemäss Tabelle 1 überprüft.

Das 30-jährige Murgangereignis entspricht einem abgelagerten Volumen von rund 45'000 m³. Mit den Volumen der drei ersten Schübe wurde der obere Geschiebesammler 1 vollständig sowie der mittlere Geschiebesammler 2 teilweise aufgefüllt. Alle Einzelbauwerke erfüllen ihre Funktion. Wie geplant wird die sekundäre Überlastsektion 1B ab einem Schubvolumen von 20'000 m³ beidseitig überströmt und reduziert erfolgreich das Risiko einer Überströmung der Dämme (Abbildung 9). Bei einem solchen Murgangereignis würde der heute bestehende Geschiebesammler bereits überströmt werden.

Bei einem 100-jährigen Murgangereignis lagern sich innerhalb von 5 Schüben insgesamt rund 90'000 m³ in den Geschiebesammlern 1 bis 3 ab. Die Geschiebesammler 1 und 2 haben das maximale Rückhaltevolumen erreicht; der Geschiebesammler 3 hat die Kapazitätsgrenze knapp nicht erreicht (Abbildung 10). Trotzdem sind die Ziele für die Absenkung der Überlastsektion 3 (siehe Abbildung 7) erfüllt. Die Geschiebesammler 1 und 2 können die Murgangfront erfolgreich abbremsen und es findet eine kontrollierte Überströmung der Überlastsektionen statt. Alle Einzelbauwerke erfüllen ihre Funktion und an den Dämmen ist genügend Freibord vorhanden. Bei einem sol-

Tabelle 1: Schubabfolge mit Bezug auf die Jährlichkeiten der massgebenden Mehrschubszenarien für die Überprüfung des mehrstufigen Schutzbauwerks (geoformer igp AG, 2020).

Schubabfolge...		...massgebend für Murgangszenarioszenarien				
Nr.	Volumen [m³]	(Jährlichkeit)				
1	10'000	10 Jahre	30 Jahre	100 Jahre	300 Jahre	Extremereignis EHQ
2	20'000					
3	20'000					
4	30'000					
5	30'000					
6	40'000					
7	40'000					

chen Ereignis wäre das Siedlungsgebiet heute schon verbreitet mittel bis erheblich gefährdet.

Wie in Abbildung 11 gezeigt wird, befindet sich im Schutzbauwerk ein gesamtes Volumen von umgerechnet rund 130'000 m³. Dieses Volumen entspricht etwa dem 300-jährigen Murgangereignis gemäss Beurteilung der aktuellen Gefahrenkarte.

Das gesamte Murgangvolumen lagert sich in den Rückhalteräumen des geplanten Schutzbauwerks kontrolliert ab. Nach einer allfälligen Realisierung des Bauwerks wären also die Siedlungsgebiete und Verkehrswege nicht mehr gefährdet – und das Schutzziel erreicht.

Beim 6. Schub mit einem Volumen von rund 40'000 m³ wird die Front erfolgreich in den Geschiebesammlern 1 und 2 abgebremst. Die tiefe Geschwindigkeit führt zu einer kontrollierten Auffüllung des Geschiebesammlers 3 bis zum maximalen Rückhaltevolumen. Rund 20'000 m³ fließen über die Überlastsektion in den Überlastkorridor. Der Überlastkorridor wird breitflächig beansprucht und kann somit optimal ausgenutzt werden (Abbildung 11).

**Erkenntnisse für Konzipierung mehrstufiger Rückhalteräume**

Zur Rückleitung von Murgängen aus unterschiedlichen Gerinneverläufen erscheinen trichterförmig zusammenlaufende Leitdämme grundsätzlich gut geeignet, sofern eine Kana-

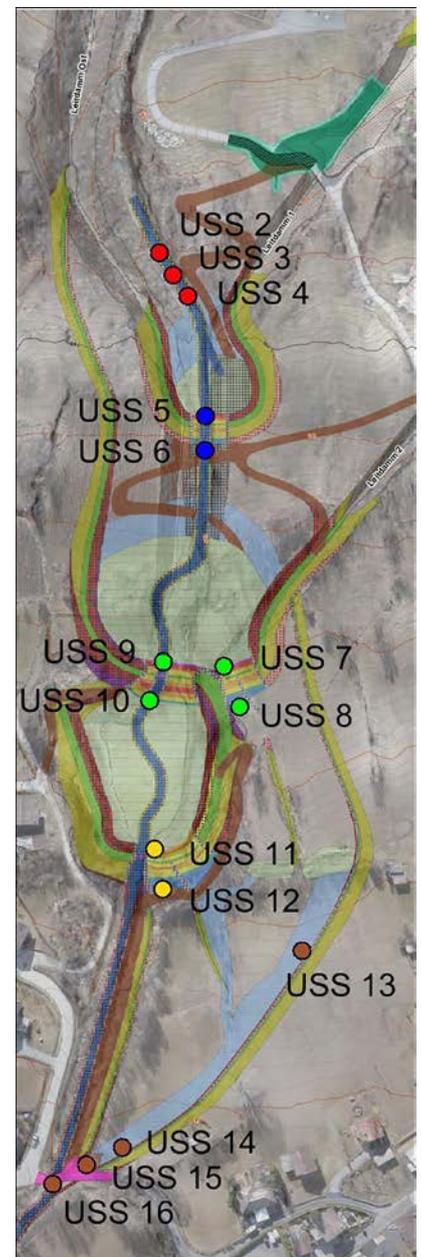


Abbildung 8: Übersicht der Ultraschallsensoren (Fotos: OST, 2020).

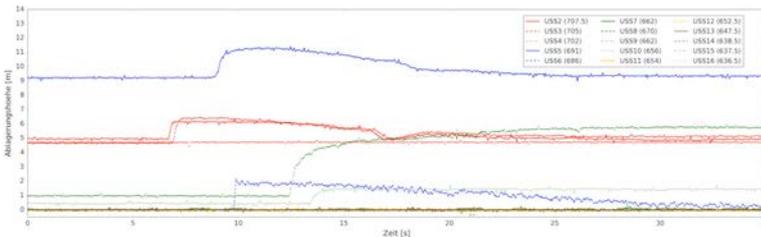


Abbildung 9: Übersicht der Ablagerungsverteilung und die Ablagerungshöhen in Abhängigkeit der Zeit für verschiedene Standorte (siehe Abbildung 8) bei einer Jährlichkeit von 30 Jahren (Fotos: OST, 2020).

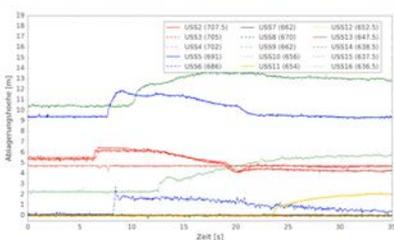


Abbildung 10: Übersicht der Ablagerungsverteilung und die Ablagerungshöhen in Abhängigkeit der Zeit für verschiedene Standorte (siehe Abbildung 8) bei einer Jährlichkeit von 100 Jahren (Fotos: OST, 2020).

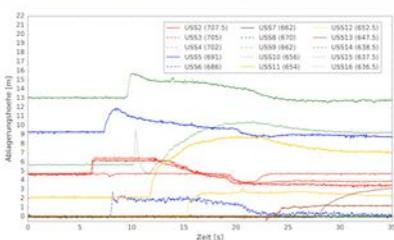


Abbildung 11: Übersicht der Ablagerungsverteilung und die Ablagerungshöhen in Abhängigkeit der Zeit für verschiedene Standorte (siehe Abbildung 8) bei einer Jährlichkeit von 300 Jahren (Fotos: OST, 2020).

lisierung der Fließwege in einem an die Leitdämme angeschlossenen Sammler erfolgt. Für eine zuverlässige Funktionalität bei allen Überlastfällen an dieser obersten Stufe sind jedoch höher gelegene, sekundäre Überlastsektionen erforderlich, die bei Nachfolgeschüben die temporären Überstauhöhen begrenzen und damit sämtliche Spitzenabflüsse kontrolliert ableiten können. Diese sekundären Überlastsektionen können z.B. durch die Verlängerung der entsprechenden Leitdämme über die beidseitigen Dammkronen konzipiert werden. In einem mehrstufigen Sammlersystem eignet sich die Position eines vorhandenen Gefälleknicks im unteren Kegelbereich als Übergang von einem mittleren zum untersten Rückhalte- raum. Der dadurch nochmals verstärkte Gefälleknick am Eingang zum untersten Rückhalte- raum trägt bei fortgeschrittenen Füllständen im Sammlersystem wesentlich zur Reduktion der Fließgeschwindigkeiten bei. Dadurch kann eine bestmögliche Ausgangslage zur kontrollierten Anströmung eines allfälligen Überlastkorridors geschaffen werden.

## Fazit

Im Rahmen der physischen Modellversuche konnte eine zuverlässige und robuste Funktionalität des geplanten, mehrstufigen Murgang- schutzbauwerks Meretschi anhand diverser Optimierungen an Einzelbauwerken erreicht bzw. nachgewiesen werden. Die Versuche zeigten zudem vielseitige Hinweise in Bezug auf die Prozesswirkung an Einzelbauwerken sowie Überlastfällen im Wechselspiel mit sich verändernden Sammlerfüllständen im Verlauf der massgebenden Mehrschubereignisse.

Unsicherheiten aufgrund geologisch oder klimatisch bedingter Veränderungen in Murgang-Einzugsgebieten stellen zunehmend höhere Anforderungen an die Robustheit von Schutzbauwerken in Bezug auf ihre angenommene Lebensdauer. Die im Projekt gewon-

nenen, allgemeinen Erkenntnisse können in die Planung von Murgangenschutzbauwerken miteinfließen, die eine Einleitung bzw. Rückführung von Murschüben aus Mehrfachgerinnen oder potentiellen Gerinneverlagerungen in mehrstufige Rückhalteräume erfordern.

Geplante Schutzbauwerke sollten aber weiterhin im Einzelfall überprüft werden, damit mit gegebenenfalls notwendigen Optimierungen eine zuverlässige und robuste Funktionalität evaluiert werden kann.

## Literatur

Bundesamt für Raumentwicklung, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bundesamt für Umwelt (2005). *Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren. ARE, BWG, BAFU, Bern.*

Frank F., Huggel C., McArdell B.W., Vieli A. (2019). *Landslides and increased debris-flow activity: a systematic comparison of six catchments in Switzerland. Earth Surf. Processes Landforms, 44 (3) (2019), pp. 699-712.*

geoformer igp AG (2018). *Meretschibach, Agarn/Leuk, Vorstudie, 12.12.2018, Brig.*

geoformer igp AG (2020). *Physische Modellversuche Schutzmassnahmen Meretschi, Agarn/Leuk VS Pflichtenheft für HSR Rapperswil. Version 3.1 / 3. April 2020, Brig.*

Ingenieurgesellschaft T&C AG und Geo7 (2002). *Schutzkonzept Meretschibach, Auflageprojekt, Juni 2002, vom Staatsrat genehmigt an der Sitzung vom 25. März 2004.*

Kobus, H. (1984). *Wasserbauliches Versuchswesen. In Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), Nr. 39. Hamburg.*

Teyssie & Candolfi AG (2010). *Meretschibach, Technischer Bericht zum ausgeführten Bauwerk insbesondere den Gefahrenkarten, Bericht Nr. 1642a - 108, Visp.*

Walter F., Amann F., Kos A., Kenner R., Phillips M., de Preux A., Huss M., Tognacca Ch., Clinton J., Diehl T., Bonanomi Y. (2019). *Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows, Geomorphology, 10.1016/j.geomorph.2019.106933, (106933).*

wasser/schnee/lawinen - Ingenieurbüro A. Burkard AG (2016). *Meretschibach, Überprüfung der Gefahrenszenarien aufgrund neuer Erkenntnisse, 09. Mai 2016, Brig.*

# Service de géo-information pour glissements dans les Alpes

Thierry Oppikofer <sup>1</sup> ([thierry.oppikofer@terranum.ch](mailto:thierry.oppikofer@terranum.ch))  
 Clément Michoud <sup>1</sup> ([clement.michoud@terranum.ch](mailto:clement.michoud@terranum.ch))  
 Jean-Philippe Malet <sup>2</sup> ([jeanphilippe.malet@unistra.fr](mailto:jeanphilippe.malet@unistra.fr))  
 Giovanni B. Crosta <sup>3</sup> ([giovannibattista.crosta@unimib.it](mailto:giovannibattista.crosta@unimib.it))  
 Paolo Frattini <sup>3</sup> ([paolo.frattini@unimib.it](mailto:paolo.frattini@unimib.it))  
 Fabrizio Pacini <sup>4</sup> ([fabrizio.pacini@terradue.com](mailto:fabrizio.pacini@terradue.com))  
 Javier Garcia Robles <sup>5</sup> ([javier.garcia@tre-altamira.com](mailto:javier.garcia@tre-altamira.com))  
 Michaelis Foumelis <sup>6</sup> ([m.foumelis@brgm.fr](mailto:m.foumelis@brgm.fr))

<sup>1</sup> Terranum Sàrl, Rue de l'Industrie 5, 1030 Bussigny

<sup>2</sup> Université de Strasbourg, École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST), Strasbourg, France

<sup>3</sup> Université de Milan-Bicocca, Département des Sciences de la Terre et de l'Environnement, Milan, Italie

<sup>4</sup> Terradue Srl, Rome, Italie

<sup>5</sup> TRE-Altamira, Barcelone, Espagne

<sup>6</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France

## Zusammenfassung

Das Projekt eo4alps-landslides wurde von der Europäischen Weltraumagentur (ESA) initiiert mit dem Hauptziel, das Potenzial neuer Satellitendaten bestmöglich für gravitative Naturgefahren im Alpenraum auszuschöpfen. Neben einem breiten Konsortium von Universitäten, geologischen Beratungsfirmen, Informationstechnologie-Unternehmen und staatlichen geologischen Diensten, werden über 70 Behörden und andere Akteure, die für das Risikomanagement von Rutschungen zuständig sind, in alle Projektphasen aktiv einbezogen. eo4alps-landslides will somit erreichen, dass satellitenbasierte Erdobservationsdaten (EO-Daten) vermehrt und effizienter in der Praxis verwendet werden. eo4alps-landslides erstellt Ereigniskataster und Anfälligkeits-/Gefährdungskarten für den Alpenraum auf der Grundlage von EO-Daten, InSAR-Bodenbewegungsdiensten und rutschungsspezifischen Anwendungen, die in die Geohazards Exploitation Platform (GEP) eingebettet sind. Geplante Produkte von eo4alps-landslides umfassen 1) die automatische Erkennung von Rutschungen basierend auf EO-Daten, 2) integrierte Rutschungskarten, welche verschiedene Bodenbewegungskarten (InSAR, Bilder-Matching) und Veränderungskarten kombinieren, 3) Gefahrenhinweiskarten bestehend aus möglichen Anrisszonen, welche verschiedene prädisponierende und auslösende Faktoren kombinieren, und spezifischen Auslaufmodellierungen. Diese EO-basierten Produkte können durch lokale Datensätze und Gelände-

dedaten vom Endnutzer direkt in GEP ergänzt werden. Weitere Anwendungsfelder und Produkte werden den Bedürfnissen der Endnutzer angepasst. Zudem werden die Produkte von eo4alps-landslides mit Produkten und Dienstleistungen von anderen eo4alps-Initiativen, sowie dem zukünftigen europäischen InSAR-Bodenbewegungsdienst kompatibel sein.

## Résumé

Le projet eo4alps-landslides a été lancé par l'Agence spatiale européenne (ESA) avec l'objectif principal d'exploiter au mieux le potentiel des nouvelles données satellitaires pour les dangers naturels gravitaires dans l'arc alpin. Outre un large consortium d'universités, de sociétés de consultants en géologie, de sociétés en technologies de l'information et de services géologiques nationaux, plus de 70 autorités et autres parties prenantes, responsables de la gestion des risques de glissements de terrain, participent activement à toutes les phases du projet. Ainsi, eo4alps-landslides a pour objectif d'accroître et d'améliorer l'utilisation des données d'observation de la Terre (OT) par satellite dans la pratique. eo4alps-landslides produit des inventaires d'événements et des cartes de susceptibilité/danger pour la région alpine sur la base de données OT, des services de mouvement de terrain InSAR et des applications spécifiques aux glissements intégrées dans la Geohazards Exploitation Platform (GEP). Les services prévus d'eo4alps-landslides comprennent : 1) la détection automatique de glissements sur les données OT, 2) des cartes

intégrées de glissements combinant diverses cartes de mouvement de terrain (InSAR, corrélation d'images) et des cartes de changement, 3) des cartes indicatives de danger combinant des zones sources potentielles, basées sur divers facteurs de prédisposition et de déclenchement, et des modélisations des périmètres d'atteinte. Ces produits basés sur l'OT peuvent être complétés par des jeux de données locales provenant de l'utilisateur directement dans GEP. D'autres domaines d'application et produits seront adaptés aux besoins des utilisateurs finaux. En outre, les produits eo4alps-landslides seront compatibles avec ceux des autres initiatives eo4alps, ainsi qu'avec le futur service européen InSAR sur les mouvements de terrain.

## Introduction

Le domaine de l'observation de la Terre (OT, Earth observation (EO) en anglais) a connu un grand essor ces dernières années, autant pour les satellites optiques/multispectrales que les satellites radars. Parmi les nombreuses innovations et améliorations, citons les cycles de répétition plus courts de l'ordre de 1 à 6 jours (p.ex. avec les satellites Copernicus Sentinel 1 & 2 ou PlanetLabs), une meilleure résolution spatiale allant jusqu'à une résolution décimétrique (p.ex. Pléiades, WorldView-2, TerraSAR-X) et des méthodes de traitement plus sophistiquées avec des calculs sur des clusters de haute-performance ou sur le cloud.

L'Agence spatiale européenne (ESA) a lancé plusieurs initiatives régionales dans le

cadre d'eo4society ([eo4society.esa.int](http://eo4society.esa.int)) afin d'accroître et d'améliorer l'utilisation des données satellitaires dans la société en général, et plus particulièrement parmi les autorités publiques, les entreprises privées et les institutions de recherche. Une de ces initiatives, nommée eo4alps ([eo4society.esa.int/tag/alps](http://eo4society.esa.int/tag/alps)), porte sur l'arc alpin avec six projets scientifiques et appliqués, dont celui-ci sur la gestion du risque de glissements (eo4alps-landslides). Initié début 2021, eo4alps-landslides fournira un service de géo-information opérationnel basé sur des données OT pour la gestion des dangers et risques de glissements au niveau régional et local. Le terme de glissement est défini ici dans un sens large comme un mouvement gravitaire de masse, comprenant également les processus de chute, de coulée ou de reptation.

### Consortium eo4alps-landslides

Le consortium développant l'application eo4alps-landslides est composé des universités de Strasbourg et de Milan-Bicocca, des entreprises en géologie et en technologies de l'information Terranum, TRE-Altamira et Terra-due, et du service géologique français BRGM. Afin de garantir que les services et produits d'eo4alps-landslides répondent aux besoins et aux exigences des utilisateurs finaux, plus de 70 autorités nationales, régionales et locales, des entreprises privées et des instituts de recherche sont impliqués dans la co-conception, ainsi que l'essai et l'évaluation opération-

nel du service de géo-information. À ces fins, eo4alps-landslides a mené une large enquête auprès de ces utilisateurs finaux. L'inclusion du savoir-faire local et l'utilisation conjointe des données de terrain sera en effet importante pour valider et améliorer les produits basés sur les données OT.

### Zone d'étude

Les services opérationnels d'eo4alps-landslides seront disponibles pour l'ensemble des pays alpins (France, Suisse, Italie, Liechtenstein, Autriche, Allemagne et Slovénie), même si la phase de développement d'eo4alps-landslides testera ses services principalement dans les Alpes françaises (p.ex. sur le glissement de La Valette, Figure 1a), lombardes (p.ex. sur le glissement de Serasano, Figure 1b) et romandes (p.ex. sur le glissement de La Perraire, Figure 1c). Le système sera conçu pour différents niveaux administratifs avec un niveau de détail progressif allant d'une moyenne résolution à l'échelle d'un canton ou d'une région, à une haute résolution à l'échelle d'une commune ou d'une vallée, jusqu'à une très haute résolution pour l'étude détaillée d'un glissement spécifique.

### Plate-forme d'exploitation des dangers géologiques (GEP)

Les services d'eo4alps-landslides seront intégrés comme application sur la plate-forme d'exploitation des dangers géologiques GEP (*Geohazard Exploitation Platform*, [\[tep.eu\]\(http://tep.eu\)\), permettant un accès direct aux données OT des missions Copernicus Sentinel et d'anciennes missions de l'ESA \(ERS, Envisat\), mais également à des fournisseurs commerciaux de données OT à très haute résolution \(Pléiades, TerraSAR-X etc.\). Il sera également possible d'y charger des données locales de l'utilisateur pour compléter les données satellitaires. Les services de traitement seront intégrés sur le cloud avec des clusters de calcul de haute performance pour un calcul rapide et optimisé des produits.](http://geohazards-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

### Produits et services d'eo4alps-landslides

Le système de géo-information eo4alps-landslides permettra la création d'inventaires avancés de glissements de terrain et de cartes de susceptibilité/danger basés sur des services d'observation de mouvements de terrain. Ce chapitre présente les différents services et produits d'eo4alps-landslides, organisés en trois modules interconnectés (Figure 2) tels qu'ils ont été pensés dans la conception du projet. Les modules, services et produits sont amenés à évoluer à la suite des retours des utilisateurs lors d'une enquête au début du projet et des tests opérationnels prévus par la suite.

### Landslide Motion : le module de détection et surveillance de glissements

Ce premier module est dédié à la détection et au suivi de mouvements de glissements. Il



Figure 1: Exemples de glissements étudiés en détail dans le cadre d'eo4alps-landslides : a) La Valette, Vallée de l'Ubaye, France (Photo : J.-P. Malet) ; b) Saresano, Tavernola, Italie (Photo : SIGEA) ; c) La Perraire, Val de Bagnes, Suisse (Photo : C. Michoud).

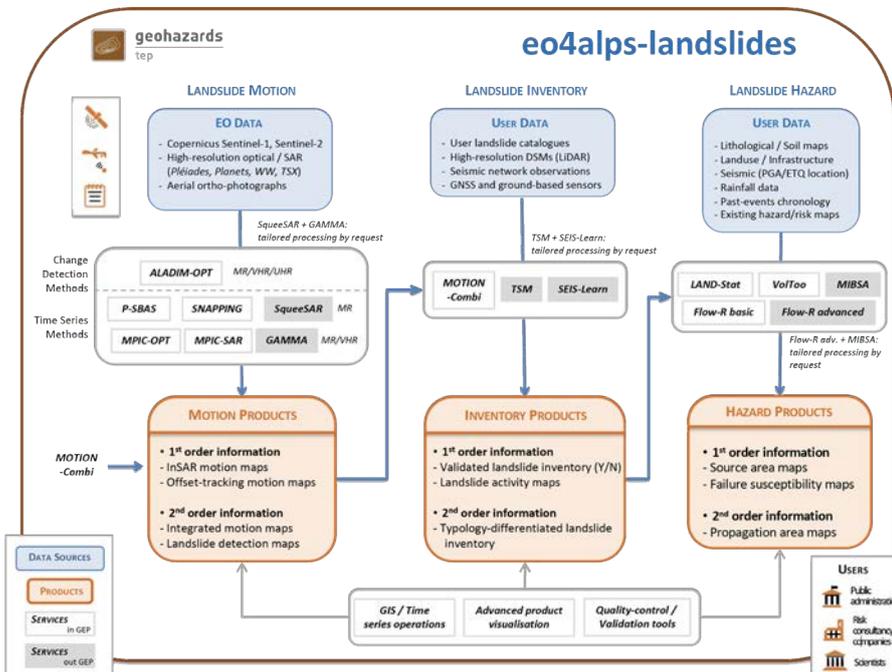


Figure 2: Aperçu du système de géo-information *eo4alps-landslides* déployé sur GEP pour la création en temps quasi réel de produits spécifiques aux glissements de terrain dans trois modules interconnectés (*eo4alps-landslides* 2021).

visé à générer des cartes de mouvement de terrain et des séries temporelles de déplacements et changements de glissements à l'aide d'imagerie optique ou radar :

- Cartes de détection de glissements utilisant des images pré- et post-événement provenant de capteurs satellitaires et/ou aériens (Stumpf et al. 2014 ; Déprez et al. 2020).
- Cartes de mouvements de terrain par suivi de décalage basées sur la corrélation de séries d'images optiques ou SAR (Raucoules et al. 2013 ; Stumpf et al. 2014).
- Cartes de mouvement de terrain InSAR à partir de séries d'images satellite SAR par le biais de plusieurs traitements InSAR basés sur les algorithmes PSI et SBAS (Casu et al. 2014 ; Schlögel et al. 2015 ; Delgado Blasco et al. 2019).

Tous ces résultats complémentaires seront ensuite combinés et intégrés dans des cartes de mouvements synthétiques, afin d'exploiter au mieux les points forts des différentes méthodes et surmonter autant que possible leurs points faibles. Par exemple, les mesures InSAR

sont adaptées aux très petits déplacements et ne sont pas sensibles aux mouvements dans la direction nord-sud, tandis que la corrélation d'images détecte mieux les grands déplacements et capte les déplacements dans toutes les directions du plan. Tous ces services comprendront un mode simple avec un minimum d'entrées requises par l'utilisateur et un mode expert permettant l'optimisation des paramètres de traitement.

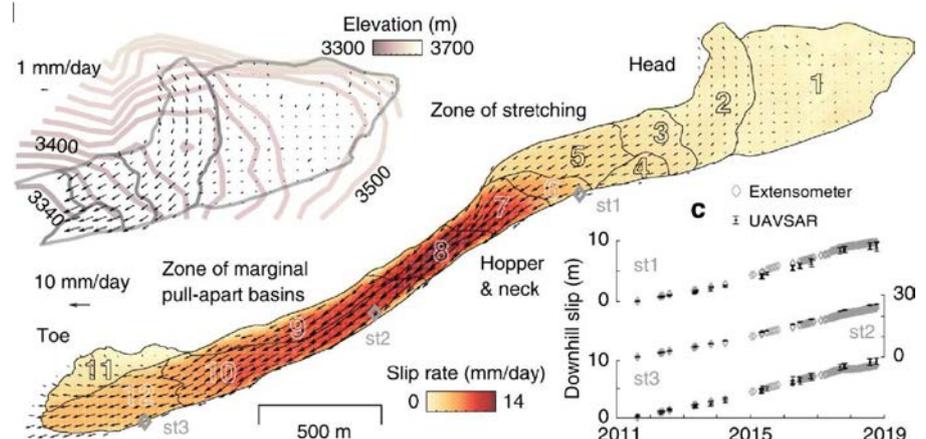


Figure 3: Carte d'activité du glissement de terrain de Slumgullion (USA) divisée en 12 compartiments présentant un mode de déplacement homogène (modifié de Hu et al. 2020).

### Landslide Inventory : le module d'inventaire de glissements

Ce deuxième module est dédié à la création et à la mise à jour d'inventaires détaillés de glissements, sur la base des résultats du premier module et des données locales :

- L'interprétation des cartes de mouvement synthétiques du premier module pour créer des cartes d'activité de glissements, délimitant différents compartiments dont le déplacement et le mécanisme de glissement sont homogènes (Figure 3).
- Des cartes d'inventaire de glissements résultant de la fusion des cartes de mouvement synthétiques avec les catalogues de glissements existants.
- Des inventaires de glissements de terrain différenciés par type ou processus.
- La visualisation et la mise à jour des inventaires de glissements existants.

### Landslide Hazard : le module d'évaluation des dangers de glissement

Ce troisième module est dédié à l'évaluation des dangers et risques de glissements et des scénarios d'évolution de glissements, comprenant :

- L'identification des zones sources de glissements à partir de la corrélation entre inventaires de glissements avec les facteurs de prédisposition et de déclenchement (Figure

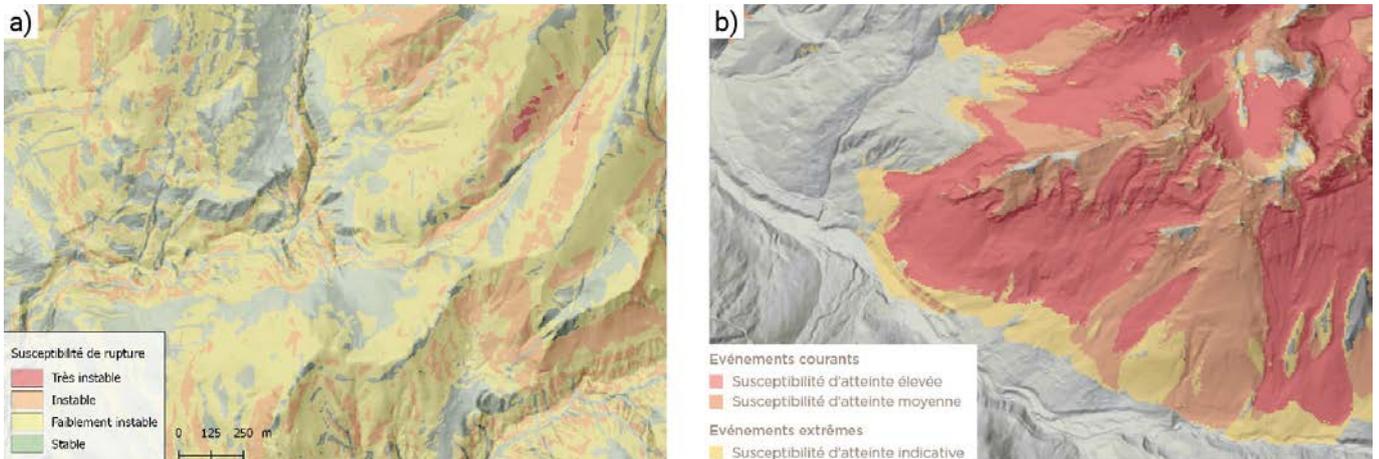


Figure 4: Cartes de susceptibilité : a) zones source de glissements spontanés avec différents niveaux de susceptibilité ; b) modélisation de propagation des chutes de pierres avec les niveaux de susceptibilité (Terranum 2020).

4a).

- Les cartes des zones de propagation basées sur la modélisation dans Flow-R (Horton et al. 2013) avec des paramètres spécifiques aux divers processus de glissement (Figure 4b).
- La modélisation de la stabilité d'un glissement et de son évolution vers une éventuelle accélération sur la base des champs de déplacement (Dattola et al. 2017).

## Perspectives

Le développement du système de géo-information eo4alps-landslides a débuté en février 2021 avec un sondage auprès des utilisateurs finaux pour l'analyse de leurs besoins. Par la suite, nous ajusterons dans le détail les requis en matière de services et produits et créerons le design de l'application eo4alps-landslides, avant de la mettre en œuvre sous forme de prototype sur GEP. Au printemps 2022, nous commencerons un test opérationnel par les utilisateurs finaux. Enfin, l'application eo4alps-landslides sera lancée au printemps 2022 et fournira un service opérationnel pour la gestion des dangers et risques de glissements sur la base de données satellitaires.

## Références

Casu, F., Elefante, S., Imperatore, P., Zinno, I., Manunta, M., De Luca, C., & Lanari, R. (2014). SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7, 3285-3296.

Dattola, G., Alberti, S., Wang, G., Stewart, T. & Crosta, G.B. (2017). An application of MIBSA to slow moving landslide. In: Proceedings of the 4th Slope Tectonics Conference, Kyoto.

Déprez, A., Marc, O., Stumpf, A., Malet, J.-P. & Michéa, D. (2020). The ALADIM service for cloud-based construction of landslide inventories from multispectral satellite sensors. *E-Surf*, 20 p. (submitted).

Delgado Blasco, J.M., Foumelis, M., Stewart, C., & Hooper, A. (2019). Measuring urban subsidence in the Rome metropolitan area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing*, 11, 129.

Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B. & Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Nat.*

*Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 869–885.

Hu, X., Bürgmann, R., Fielding, E. J., & Lee, H. (2020). Internal kinematics of the Slumgullion landslide (USA) from high-resolution UAVSAR InSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112057.

Raucoules, D., de Michele, M., Malet, J.-P. & Ulrich, P. (2013). Time-variable 3D ground displacements from high-resolution synthetic aperture radar (SAR). Application to La Valette landslide (South French Alps). *Remote Sensing of Environment*, 139, 198–204.

Schlögel, R., Doubre, C., Malet, J.-P. & Masson, F. (2015). Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: A D-InSAR geomorphological interpretation method. *Geomorphology*, 231, 314–330.

Stumpf, A., Lachiche, N., Malet, J.-P., Kerle, N. & Puissant, A. (2014). Active Learning in the spatial domain for remote sensing image classification. *IEEE Transactions on Geosciences & Remote-Sensing*, 52, 2492-2507.

# Klimawandel und Schutzwald

Stéphane Losey <sup>1</sup> ([stephane.losey@bafu.admin.ch](mailto:stephane.losey@bafu.admin.ch))  
 Kathrin Kühne <sup>1</sup> ([kathrin.kuehne@bafu.admin.ch](mailto:kathrin.kuehne@bafu.admin.ch))

<sup>1</sup> Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Gefahrenprävention, Sektion Rutschungen, Lawinen und Schutzwald, 3003 Bern

## Résumé

En tant que mesure biologique, la forêt de protection est un élément important de la gestion intégrale des risques. De nombreuses forêts offrent une protection efficace contre les dangers naturels gravitationnels tels que les avalanches, les chutes de pierres, les glissements de terrain et les laves torrentielles. L'objectif de la gestion des forêts de protection est d'amener la forêt dans un état optimal afin qu'elle puisse remplir durablement sa fonction de protection. L'état souhaité de la forêt est basé sur ce que l'on appelle des profils d'exigences, qui diffèrent en fonction du danger naturel dominant et du type de station forestière.

On s'attend à ce que les changements climatiques affectent non seulement les processus liés aux dangers naturels, mais aussi la forêt en tant que système biologique, les conditions locales du site jouant un rôle particulier. Pour adapter la gestion des forêts de protection au changement climatique, il sera donc nécessaire de prendre en compte le danger naturel et les conditions de stations qui seront déterminants à l'avenir.

## Zusammenfassung

Der Schutzwald ist als biologische Massnahme wichtiger Bestandteil des integralen Risikomanagements. Viele Wälder leisten einen wirksamen Schutz gegen gravitative Naturgefahren wie Lawinen, Steinschlag, Rutschungen und Murgänge. Ziel der Schutzwaldpflege

ist es, den Wald in einen optimalen Zustand zu bringen, so dass er seine Schutzfunktion nachhaltig erfüllen kann. Der angestrebte Waldzustand orientiert sich dabei an sogenannten Anforderungsprofilen, welche sich je nach vorherrschenden Naturgefahren und Waldstandorttyp unterscheiden.

Es wird erwartet, dass sich Klimaänderungen nicht nur auf die Naturgefahrenprozesse auswirken, sondern auch auf den Wald als biologisches System, wobei insbesondere die lokalen Standortbedingungen eine Rolle spielen. Um die Schutzwaldpflege an den Klimawandel anzupassen, wird es deshalb nötig sein, auch die zukünftig massgebenden Naturgefahren und Standortbedingungen zu berücksichtigen.

## Schutzwald als wichtiger Bestandteil des integralen Risikomanagements

Biologische Massnahmen können Gefahrenprozesse verhindern oder deren Einfluss reduzieren und sind damit für den Schutz vor Naturgefahren von grosser Bedeutung. Zusammen mit den planerischen, organisatorischen und technischen Massnahmen bildet der Schutzwald das Gerüst der Naturgefahrenprävention. Aufgrund seiner grossflächigen Wirkung und seines hohen Flächenanteils ist der Schutzwald die wichtigste biologische Schutzmassnahme in der Schweiz: Rund 49% der Wälder (knapp 600'000 ha) leisten gemäss Schutzwaldausscheidung der Kantone nach Methodik SilvaProtect-CH einen wirksa-

men Schutz gegen Naturgefahren wie Lawinen, Steinschlag, Rutschungen und Murgänge (Losey und Wehrli 2013). Dabei schützt der Wald Menschen und Sachwerte, indem Gefahrenprozesse verhindert werden oder deren Wirkung reduziert wird. Als biologisches System wirkt er im Gegensatz zu Schutzbauten grossflächig und kann gleichzeitig Schutz vor mehreren Naturgefahren bieten. Seine Schutzwirkung kann aber, bedingt durch das langsame Wachstum von Bäumen, nur mittel- bis langfristig beeinflusst werden und nicht immer ist es möglich, ihn auf die Schutzziele zu bemessen.

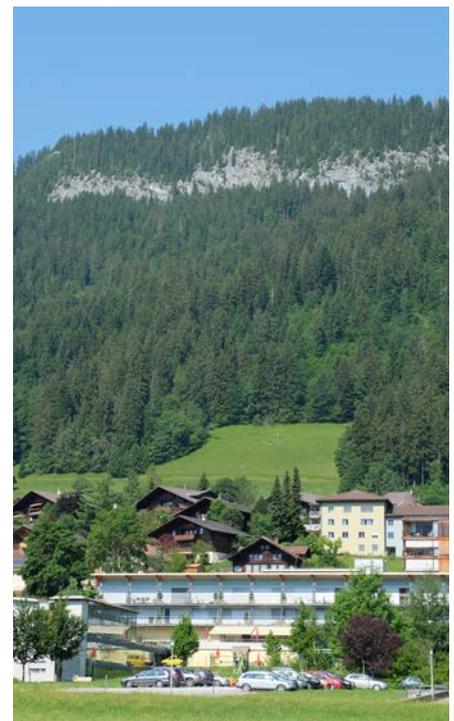


Abbildung 1: Schutzwald oberhalb Zweisimmen (Foto: Lange 2017)

## Schutzwaldpflege: Herleitung des Handlungsbedarfs

Die Schutzwaldpflege dient dazu, die biologische Massnahme Schutzwald in einen möglichst schutzwirksamen Zustand zu bringen und in einem solchen zu halten, damit er seine Schutzfunktion dauernd erfüllen kann. Mit der Vollzugshilfe «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS)» (Frehner et al. 2005/09) steht der Praxis ein Instrument zur Verfügung, welches einen nachhaltig wirksamen Schutzwald mit minimalem Aufwand sicherstellen soll. Ziel ist es, den Wald in einen Zustand zu bringen, bei dem seine Wirkung auf die Gefahrenprozesse möglichst gross und das Risiko von Schäden möglichst gering ist. Der angestrebte Waldzustand orientiert sich dabei an sogenannten Anforderungsprofilen. Es werden jeweils ein Minimalprofil (Messlatte für den Handlungsbedarf) sowie ein langfristiges Waldbauziel (Idealprofil) angegeben. Im Allgemeinen beschreiben die Anforderungsprofile Waldzustände, welche eine hohe Schutzwirkung erwarten lassen und die mit minimalem Aufwand dauernd erhalten werden können. Sie setzen sich zusammen aus den Anforderungen aufgrund der Naturgefahren sowie der lokalen Standortverhältnisse. Letzteres erlaubt es, mit der Natur zu arbeiten, weil davon auszugehen ist, dass der Wald am wenigsten anfällig für Störungen ist, wenn er sich in einem naturnahen Zustand befindet. Beim Entscheid, ob in einem Schutzwald ein Eingriff nötig ist, werden aufgrund dieser Anforderungsprofile die Merkmale Baumartenmischung, Gefüge, Stabilitätsträger und Verjüngung beurteilt. Durch den Vergleich des aktuellen Waldzustands mit den Anforderungen kann so unter Berücksichtigung der natürlichen Dynamik des Waldes beurteilt werden, ob Handlungsbedarf besteht. Wo nötig, werden wirksame und verhältnismässige Massnahmen zur Verbesserung abgeleitet (vgl. Abbildung 2). Um den Klimawandel in die-

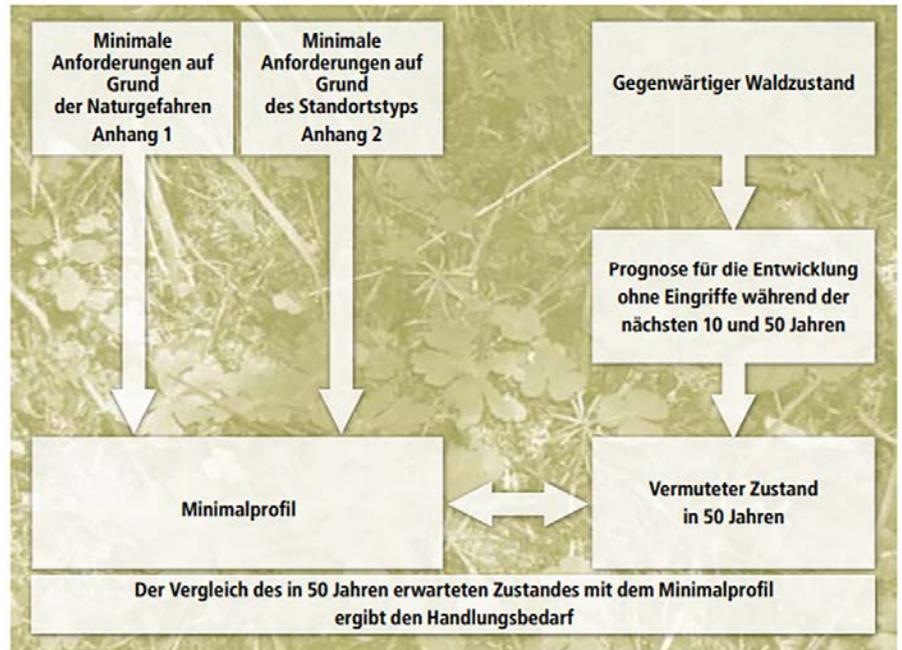


Abbildung 2: Schema zur Herleitung des Handlungsbedarfs nach NaiS (Frehner et al. 2005/09). Das Minimalprofil lässt langfristig eine ausreichende Schutzwirkung erwarten und dient als Messlatte, um zu entscheiden, ob Handlungsbedarf besteht.

se Überlegungen miteinzubeziehen, wird es nötig sein, seine Auswirkungen auf die vorherrschende Naturgefahr und den Standorttyp zu kennen und sich die Frage zu stellen, wie sich der heutige Waldbestand künftig im Vergleich zu den Anforderungen (Minimalprofil) entwickeln wird.

### Klimaänderungen und ihre Auswirkungen auf die Schutzwaldpflege

Der Wald als natürliches Ökosystem unterliegt ständigen Umweltveränderungen. Die Auswirkungen des Klimawandels werden sich in unterschiedlicher Weise auf die vorherrschenden Standortbedingungen und damit auch auf den Wald auswirken. Daneben können aber auch die Naturgefahrenprozesse selbst durch den Klimawandel beeinflusst werden.

#### Auswirkungen auf die Naturgefahrenprozesse

Hinsichtlich der Naturgefahrenprozesse wird erwartet, dass die Einflüsse der klimatisch bedingten Änderungen je nach Prozess unter-

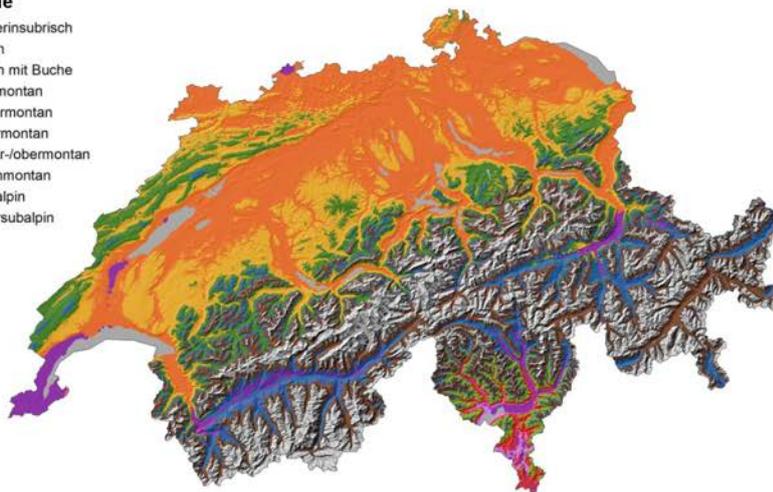
schiedlich ausfallen. So dürften künftig Lawinen gerade in tieferen Lagen eher auf kleinerer Fläche und bei selteneren Ereignissen vorkommen. In höheren Lagen werden sie aber wohl auch in Zukunft noch wichtig sein. Relativ zu Lawinen werden die Prozesse Steinschlag, Rutschung und Hochwasser langfristig an Bedeutung zunehmen (Bebi et al. 2016). Dies wird Auswirkungen auf Ort und Auftretenswahrscheinlichkeit der relevanten Naturgefahrenprozesse haben. Auf die in NaiS definierten inhaltlichen Anforderungen aufgrund der Naturgefahr selbst (beispielsweise Anforderungen an die Lückenlänge und den Kronendeckungsgrad in Lawinenschutzwäldern) wird dies aber keine Auswirkungen haben.

#### Auswirkungen auf den Wald

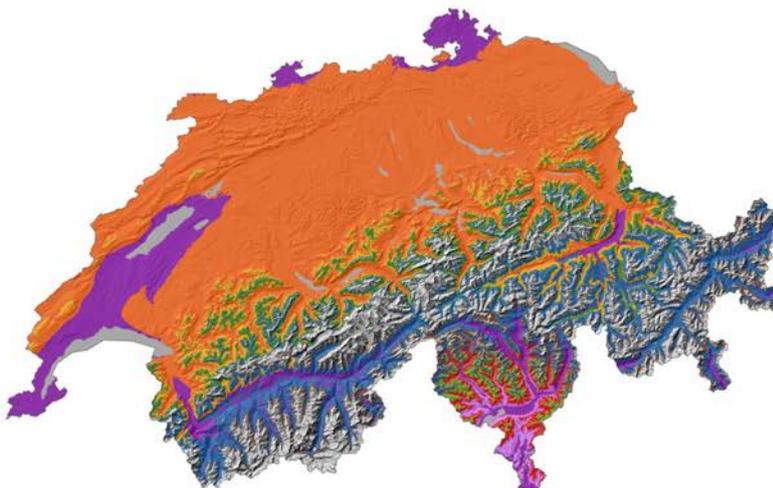
Für den Wald selbst werden unterschiedlichste Veränderungen erwartet, die durch den Klimawandel bedingt sind. So wird das künftig erwartete Klima insbesondere die Wasserverfügbarkeit und damit die Standortverhältnisse verändern. Dies hat Auswirkungen auf das Wachstum der Bäume und ihre Konkurrenz-

### Legende

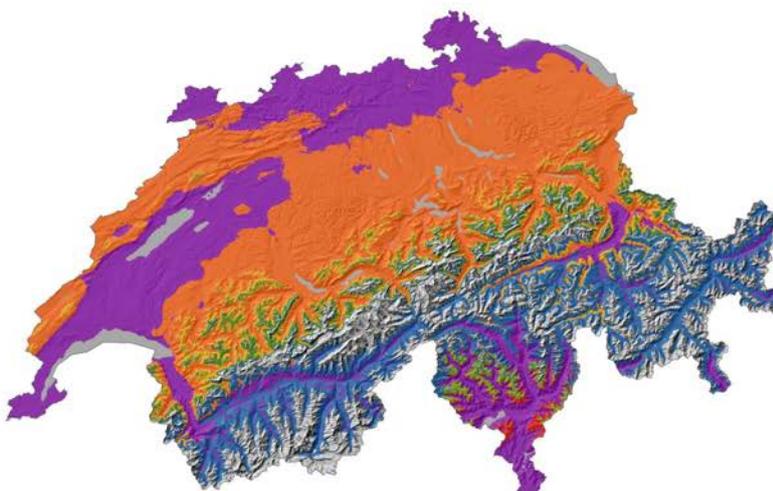
- hyperinsubrisch
- collin
- collin mit Buche
- submontan
- untermontan
- obermontan
- unter-/obermontan
- hochmontan
- subalpin
- obersubalpin



Vegetationshöhenstufen für heutiges Klima



Vegetationshöhenstufen RegCM3, Periode 2070-2099



Vegetationshöhenstufen CLM, Periode 2070-2099

Abbildung 3: Modellierung der Vegetationshöhenstufen für heutiges Klima (oben), künftiges Klima 2070-2099 mit mässigem Klimawandel, Klimamodell RegCM3 (Mitte) und künftiges Klima 2070-2099 mit starkem Klimawandel, Klimamodell CLM (unten)

verhältnisse, was langfristig zu veränderten Baumartenzusammensetzungen führen wird. Denn die Standortfaktoren Klima, Boden und Topografie bestimmen massgeblich, welche Baumarten und Waldgesellschaften (Standorttypen) an einem Ort überhaupt vorkommen und wie gut die Bäume dort wachsen. So könnte die Schutzwirkung etwa dort künftig besser werden, wo der Wald heute kältebedingt wenig dicht wachsen kann. Andererseits wird wahrscheinlich dort, wo schon heute die Trockenheit ein limitierender Faktor ist, die trockenheitsbedingte Mortalität noch zunehmen (Bebi et al. 2016). Die heute an einem Ort vorkommenden Baumarten sind deshalb an gewissen Standorten nicht geeignet und werden unter verändertem Klima empfindlich reagieren, beispielsweise eine bereits heute standortsfremde Fichtenaufforstung an trockener Lage. Zudem wird erwartet, dass der Klimawandel vermehrt Störungen im Wald mit sich bringt, wie etwa Feuer, Windwurf oder die Ausbreitung des Borkenkäfers (Bebi et al. 2016). Wo Wälder nicht oder nur wenig an die künftigen Bedingungen angepasst sind, wird dies vermutlich vermehrt zu Problemen führen. Aus diesen Gründen sind resiliente und an die lokalen, künftigen Bedingungen angepasste Wälder von besonderer Wichtigkeit.

Um die Auswirkungen des Klimawandels möglichst konkret abschätzen zu können, wurde im Rahmen des Projekts «Adaptierte Ökogramme» (Frehner et al. 2018) untersucht, wie sich die Höhenstufen und damit die Waldstandorttypen an einem Ort infolge des Klimawandels verändern und welche Baumarten in Zukunft empfohlen werden können. Die Vegetationshöhenstufen wurden dazu unter heutigem sowie künftigen Klima im Schweizer Wald modelliert. Um die Unsicherheiten in der Klimaentwicklung zu berücksichtigen, wurden zwei Klimazukünfte verwendet (mässiger Klimawandel mit Klimamodell RegCM3 sowie

stärkerer Klimawandel mit Klimamodell CLM, beide Klimaszenario A1B). Resultat dieser Modellierungen sind Karten, in denen die modellierten Vegetationshöhenstufen für die ganze Schweiz abgebildet sind für das heutige Klima sowie für die beiden berücksichtigten Klimazukünfte (Frehner et al. 2018, vergleiche Abbildung 3). Daraus abgeleitet wurden die künftigen Verbreitungspotenziale verschiedener Baumarten. So zeigt sich etwa, dass die trockenheitsanfällige Fichte künftig in gewissen Lagen kaum noch geeignete Bedingungen vorfinden wird (vgl. Abbildung 4).

### Herausforderungen für die Waldpflege

Je nach verwendeten Klimamodellen (welche eine erwartete Erwärmung von 3.1 bis 4.3 Grad Celsius abbilden) werden sich die Vegetationshöhenstufen bis Ende des 21. Jahrhunderts um rund 500 m bis 700 m nach oben verschoben. Die künftig erwarteten Standortverhältnisse werden sich also teilweise stark auf die heute noch standortgerechten Baumarten und die Waldleistungen - und damit auch auf den Schutzwald - auswirken. Die Praktiker stehen also vor grossen Herausforderungen, damit sie ihre Waldpflege bereits heute an die künftigen Bedingungen anpassen und mit den verbleibenden Unsicherheiten umgehen können. Dabei soll weiterhin nicht gegen, sondern mit der Natur gearbeitet werden. So lässt sich etwa schon heute beobach-

ten, dass wärmeliebende Arten der unteren Höhenstufen wie etwa Eichen oder Kirschen in höhere Höhenlagen vorstossen (Frehner et al. 2018).

### Schutzwaldpflege unter Berücksichtigung der zu erwarteten Klimaänderungen: Geplante Umsetzung und Ausblick

Aus den vorangehend erläuterten Erkenntnissen wird deutlich, dass die Auswirkungen des Klimawandels auch bei der Schutzwaldpflege miteinbezogen werden müssen. Wie eingangs erwähnt, werden bei der Herleitung des Handlungsbedarfs (vgl. Abbildung 2) nebst der Baumartemischung auch weitere Kriterien wie das Gefüge, Stabilitätsträger und die Verjüngung beurteilt. Für diese Beurteilung wird heute ein in der Praxis etabliertes Formular (Formular 2, siehe [www.nais-form2.ch](http://www.nais-form2.ch), vgl. Tabelle auf der nächsten Seite) verwendet. Dabei wird aktuell: 1. der heutige Standorttyp und die heute massgebende Naturgefahr ausgewählt, damit die entsprechenden Anforderungsprofile (Minimal- und Idealprofil) an den Schutzwald ersichtlich werden; 2. eine Beurteilung des heutigen Zustandes vorgenommen und 3. die künftige Entwicklung des Waldes ohne Eingriffe abgeschätzt (Prognose). Aus dem Vergleich zwischen Anforderungsprofil und vermutetem künftigen Zustand ergibt sich der Handlungsbedarf: Ein solcher besteht, wenn der erwartete Waldzustand schlechter

ist als das festgelegte Minimalprofil und wenn wirksame und verhältnismässige Massnahmen zur Verbesserung angegeben werden können (4.).

Es ist vorgesehen, dass in Zukunft bei der Herleitung des Handlungsbedarfs nebst den aktuellen Anforderungen aufgrund von Naturgefahr und Standort neu auch die künftigen Standorttypen (sowie ggf. veränderte Naturgefahrenbedingungen) mitberücksichtigt werden. Für das Ableiten von realistischen, verhältnismässigen und wirksamen Massnahmen und Etappenzielen soll dabei eine Synthese erfolgen, inwiefern der aktuelle und der künftige Standorttyp bei den Entscheidungen gewichtet werden können.

Die Umsetzung der Klimaanpassung im Schutzwald bei der Herleitung des Handlungsbedarfs wird auf Stufe Bund in der Vollzugshilfe NaiS vorgegeben. Dadurch soll auf Wunsch der Kantone ein einheitliches Vorgehen gewährleistet werden. Die Prinzipien und die konkrete Umsetzung zur Berücksichtigung des Klimawandels im Schutzwald werden aktuell im Austausch mit einer Arbeitsgruppe bestehend aus Vertretern der Kantone, Forschung, Lehre und Praxis diskutiert und konkretisiert. Die eigentliche Umsetzung der Schutzwaldpflege bleibt nach wie vor Sache der Kantone. Zunehmend wichtig wird dabei auch die trans-

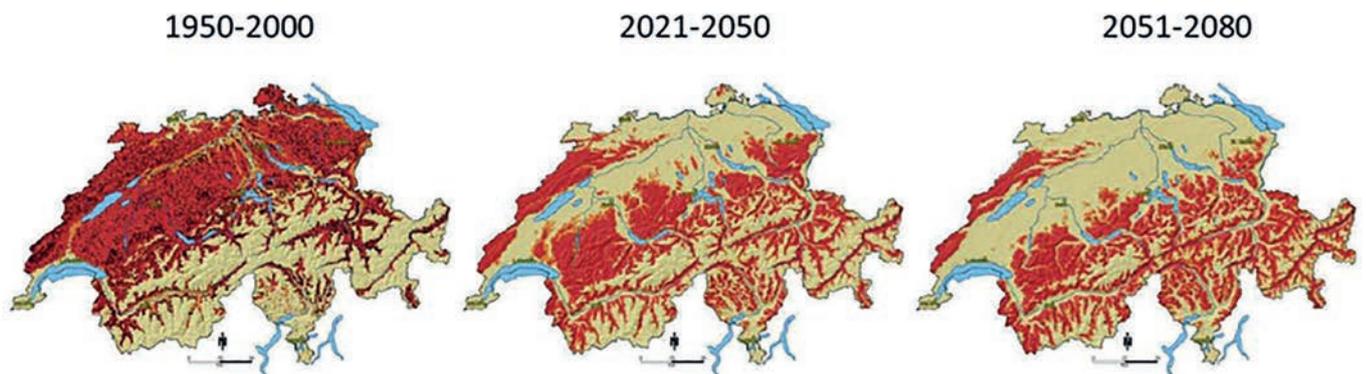


Abbildung 4: Modellierung des Fichtenareals heute und in Zukunft. Gelb weist darauf hin, dass die Fichte nicht vorkommt, Dunkelrot weist das Verbreitungsgebiet aus und Orange weist auf Unsicherheiten bezüglich der Standortbeurteilung hin.

**Beispiel zur Veranschaulichung**

An einem bestimmten Ort in der Standortregion «nördliche Randalpen» kommt auf 1350 m ü.M. (Höhenstufe obermontan) heute auf saurem Untergrund der Standorttyp «Typischer Heidelbeer-Tannen-Fichtenwald» (46) vor. Die massgebende Naturgefahr auf dem rund 40° geneigten Hang ist Lawine. Aufgrund des Klimawandels wird erwartet, dass sich die Höhenstufe verschiebt (von ober- zu untermontan) und dass sich dieser Standort demnach zu einem «Waldhirschen-Buchenwald mit Rippenfarn» (Standorttyp 8\*) entwickelt (siehe Tabelle). Nach wie vor können Lawinen bzw. Schneerutsche erwartet werden, wenn auch in geringerem Ausmass. Werden nun auch die Anforderungen des künftig erwarteten Standorttyps berücksichtigt, so ergeben sich einige Änderungen. Ziel der Schutzwaldpflege wird es deshalb sein, den heutigen Bestand in eine Richtung zu lenken, so dass er künftig die Anforderungen des Standorts 8\* erfüllen kann. Wäre beispielsweise heute ein Anteil von 60% Fichten vorhanden, müssten diese künftig zugunsten von Laubbäumen reduziert werden, um den Anforderungen langfristig zu genügen.

Bestandes- und Einzelbaummerkmale	<b>Minimalprofil:</b> <b>Aktueller</b> Standorttyp 46 Typ. Heidelbeer-Tannen-Fichtenwald <b>Aktuelle</b> Naturgefahr: Lawine	<b>Minimalprofil:</b> <b>Künftiger</b> Standorttyp 8* Waldhirschen-Buchenwald mit Rippenfarn <b>Künftige</b> Naturgefahr: Lawine
<b>Mischung</b> <i>Art und Grad</i>	Tanne: 40-90% Fichte: 10-60%  Samenbäume: Vogelbeere: bis 20% Buche: bis 20%	Tanne: 30-60% Laubbäume: 40-70% davon Buche: 30-70% Fichte: 0-30%
<b>Gefüge</b> , vertikal <i>Durchmesserstreuung</i>	Genügend <i>entwicklungsfähige</i> Bäume in mind. 2 versch. Durchmesserklassen pro ha	Genügend <i>entwicklungsfähige</i> Bäume in mind. 2 versch. Durchmesserklassen pro ha
<b>Gefüge</b> , horizontal <i>Deckungsgrad</i> <i>Lücken</i> <i>Stammzahl</i>	Einzelbäume (Ta) sowie Rotten oder Kleinkollektive (Fi) <b>Lückenzlänge in Falllinie: &lt; 40 m</b> <b>Falls Lü-Länge grösser: Lü-Breite &lt; 5m</b> <b>DG &gt; 50%</b>	- <b>Lückenzlänge in Falllinie: &lt; 40 m</b> <b>Falls Lü-Länge grösser: Lü-Breite &lt; 5m</b> <b>DG &gt; 50%</b>
<b>Stabilitätsträger</b> <i>Kronenentwicklung</i> <i>Schlankheitsgrad</i> <i>Zieldurchmesser</i>	Kronenzlänge mind. 1/2 Schlankheitsgrad < 80 Lotrechte Stämme mit guter Verankerung, nur vereinzelt starke Hänger	Mind. 1/2 der Kronen gleichmässig geformt  Lotrechte Stämme mit guter Verankerung, nur vereinzelt starke Hänger
<b>Verjüngung</b> <b>Keimbett</b>	Alle 15 m (50 Stellen/ha) Moderholz oder erhöhte Kleinstandorte mit Vogelbeer-Wäldchen oder Mineralerde vorhanden  Fläche mit starker Vegetationskonkurrenz < 1/2	Fläche mit starker Vegetationskonkurrenz < 1/3
<b>Verjüngung</b> <b>Anwuchs</b> <i>(10 bis 40 cm Höhe)</i>	Bei Deckungsgrad < 0.6 mind. 10 Ta pro a (im ø alle 3 m) vorhanden In Lücken Fi und Vb vorhanden	Bei Deckungsgrad < 0.7 mind. 10 Bu pro a (im ø alle 3 m) vorhanden
<b>Verjüngung</b> <b>Aufwuchs</b> <i>(40 cm Höhe bis 12 cm Brusthöhendurchmesser)</i>	Pro ha mind. 30 Verjüngungsansätze (im ø alle 19 m) oder Deckungsgrad mind. 4% Mischung zielgerecht	Pro ha mind. 1 Trupp (2-5 a, im ø alle 100 m) oder Deckungsgrad mind. 3% Mischung zielgerecht

Auszug der Minimal-Anforderungen aus Formular 2 NaiS. Blau: Anforderungen des Standorttyps Zukunft, Rot: Anforderungen aufgrund der Naturgefahr.

parente und nachvollziehbare Dokumentation der zugrunde liegenden Überlegungen und Entscheide sein. Mit dem Einbezug des Klimawandels gewinnt die Schutzwaldpflege an Komplexität und bereits bestehende Unsicherheiten werden grösser. Es ist deshalb kaum möglich, einen – heute ohnehin nicht exakt zu definierenden – Zielzustand zu forcieren. Vielmehr wird es darum gehen, mit einer angepassten Schutzwaldpflege den Bestand in eine Richtung zu lenken, welche auch unter veränderten klimatischen Bedingungen möglichst gut und nachhaltig vor Naturgefahren schützt. Als Hilfsmittel für die Wahl geeigneter Baumarten kann dazu beispielsweise die TreeApp ([www.tree-app.ch](http://www.tree-app.ch)) beigezogen werden. Diese erlaubt es den Waldfachpersonen, auf Basis des heutigen Standorts Informationen zum künftig erwarteten Standorttyp und den dazugehörigen Baumartenempfehlungen herzuleiten und zu nutzen. Der Praxis steht damit ein hilfreiches Orientierungsinstrument und eine Entscheidungshilfe für die waldbauliche Umsetzung der Forschungserkenntnisse hinsichtlich Baumarten zur Verfügung. Nebst der zielgerichteten Anpassung der Baumarten an die künftig erwarteten Standortbedingungen stellt dabei auch die Erhöhung der Baumartenvielfalt eine wichtige Handlungsstrategie dar, welche zur Risikominderung beitragen kann (Frehner et al. 2018). Ein breites, auf die Standortverhältnisse angepasstes und «klimafittes» Baumartenspektrum ist dabei erwünscht (Bebi et al. 2016).

## Literatur

Bebi P., Bugmann H., Lüscher P., Lange B., Brang P. (2016): Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In: Pluess AR., Augustin S., Brang P. (eds): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Stuttgart, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, S. 269–285.

Frehner M., Brang P., Kaufmann G., Küchli C. (2018): Standortkundliche Grundlagen für die Waldbewirtschaftung im Klimawandel. WSL Ber. 66: 43 S.

Frehner M., Wasser B., Schwitter R. (2005/09): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern, Bundesamt für Umwelt.

Losey, S. und Wehrli, A. 2013 Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. p. 29 und Anhänge. Bundesamt für Umwelt, Bern.

# Rutschung Brienz/Brinzauls (GR): Sondierstollen zur Prüfung der Wirksamkeit einer Tiefendrainage

Reto Thöny <sup>1</sup> (reto.thoeny@btgeo.ch)

Daniel Figi <sup>1</sup> (daniel.figi@btgeo.ch)

Thomas Breitenmoser <sup>1</sup> (thomas.breitenmoser@btgeo.ch)

Stephan Frank <sup>2</sup>, Andri Largiadèr <sup>3</sup>, Andreas Huwiler <sup>3</sup>, Christoph Nänni <sup>4</sup>

<sup>1</sup> BTG Büro für Technische Geologie AG, Sargans

<sup>2</sup> Dr. von Moos AG, Zürich

<sup>3</sup> Amt für Wald und Naturgefahren, Graubünden

<sup>4</sup> Tiefbauamt, Graubünden

## Résumé

Les conditions géologiques et hydrogéologiques, les processus mécaniques et hydrauliques associés et les facteurs d'influence dans le substrat des grands glissements sont souvent complexes, toujours spécifiques au site et fréquemment non vérifiables dans la mesure requise pour le problème. Cela représente un défi majeur pour la sélection et la planification de mesures d'assainissement réussies, qui visent à la fois un haut degré d'efficacité et un impact minimal sur l'environnement.

Néanmoins, en raison des dimensions spatiales des grands glissements, les mesures d'assainissement visent généralement à modifier les conditions hydrogéologiques et hydrauliques du terrain. Sur la base des résultats des investigations détaillées en cours, on considère que des drainages profonds offrent le plus de chances de succès pour assainir le glissement de Brienz. Dans le contexte actuel, les exigences relatives à des drainages profonds requièrent une procédure par étapes comprenant une évaluation détaillée de l'état de situation, une analyse des risques et une étude des variantes sur la base d'une modélisation numérique avant que les investigations préliminaires pour la planification du projet de la mesure d'assainissement puissent être lancées. Dans le cas d'un drainage profond, l'expérience a montré que cette procédure peut durer plusieurs années sans que l'on sache si la capacité de drainage du sol aura

un effet suffisamment positif de ralentissement sur les mouvements du glissement. Le temps nécessaire à cet effet n'est pas disponible à Brienz/Brinzauls.

En raison de l'augmentation constante de la vitesse des glissements de terrain ces dernières années jusqu'à plus de 1,3 m par an, le développement actuel de Brienz/Brinzauls n'est plus acceptable pour les habitants, les services publics et les exploitants d'infrastructures. Des mesures doivent être prises pour améliorer la situation le plus rapidement et le plus durablement possible. La construction d'une galerie d'exploration, en cours de planification et qui débutera au printemps 2021, et les investigations associées ont pour but d'explorer et de caractériser les conditions géologiques et hydrogéologiques. Il s'agit d'un test in-situ pour évaluer la capacité de drainage au moyen d'un drainage profond.

## Zusammenfassung

Die geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse und die damit zusammenhängenden, mechanischen und hydraulischen Prozesse und Einflussfaktoren im Untergrund von Grosshangbewegungen sind oft komplex, stets ortsspezifisch und häufig nicht im für die Fragestellung erforderlichen Masse eruiert. Für die Wahl und Planung von erfolgreichen Sanierungsmassnahmen, bei welchen gleichzeitig eine hohe Wirksamkeit und eine minimale Auswirkung auf die Umwelt angestrebt wer-

den, stellt dies eine grosse Herausforderung dar. Gleichwohl zielen Sanierungsmassnahmen von Grosshangbewegungen, aufgrund der räumlichen Dimensionen, in den meisten Fällen auf Veränderung der hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse im Untergrund ab. Bei der Rutschung Brienz werden, basierend auf den bisherigen Ergebnissen der laufenden Detailuntersuchungen, einer Sanierung mittels Tiefendrainagemassnahmen zurzeit die grössten Erfolgchancen zugerechnet. Die planerischen Vorgaben von Tiefendrainagemassnahmen erfordern im heutigen Kontext ein schrittweises Vorgehen, das eine detaillierte Zustandsbeurteilung, eine Risikoanalyse sowie ein auf numerischen Modellierungen basierendes Variantenstudium beinhaltet, bevor mit den Voruntersuchungen für die Projektierung der Sanierungsmassnahme begonnen werden kann. Im Falle einer Tiefenentwässerung kann sich dieses Vorgehen erfahrungsgemäss über mehrere Jahre hinweg ziehen, ohne die Gewissheit zu haben, ob die Drainierbarkeit des Untergrundes einen ausreichend positiven, verlangsamenden Effekt auf die Rutschbewegungen ausübt. Die dafür benötigte Zeit ist in Brienz/Brinzauls nicht vorhanden.

Aufgrund der stetig zunehmenden Rutschgeschwindigkeiten in den vergangenen Jahren auf aktuell über 1.3 m pro Jahr ist die gegenwärtige Entwicklung in Brienz/Brinzauls für Bewohner, Versorgungs- und Infrastrukturbetreiber nicht mehr tragbar und verlangt nach

Massnahmen, welche eine möglichst rasche und langanhaltende Verbesserung der Situation bringen. Mit dem derzeit in Planung befindlichen und im Frühjahr 2021 beginnenden Bau eines Sondierstollens und den damit verbundenen Untersuchungen sollen im Sinne eines in-situ Versuches die geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse des stabilen, anstehenden Gebirges unterhalb der Rutschung sowie der Rutschmasse selbst erkundet und charakterisiert sowie hinsichtlich der Drainierbarkeit mittels Tiefenentwässerung beurteilt werden.

## Einleitung

Die Rutschung Brienz/Brinzauls befindet sich im Zentrum von Graubünden zwischen Lenzerheide und Tiefencastel (Abb. 1). Zur Überwachung möglicher Gefährdungsszenarien (z.B. Bergsturz, Felssturz) wird die gesamte Grosshangbewegung seit 2009 systematisch überwacht. Aufgrund der seit 2017 stark beschleunigenden Bewegungen im Untergrund des Dorfes Brienz/Brinzauls sowie den oberhalb davon befindlichen Felsmassen sind Anfang 2018 geologische Detailuntersuchungen zum Verständnis der Rutschung und Anfang 2020 umfassende Machbarkeitsabklärungen hinsichtlich möglicher Sanierungsmassnahmen gestartet worden. Der Fokus liegt dabei auf dem unteren Bereich der Grosshangbewegung, welcher mit der Ortschaft Brienz mit knapp 100 Einwohnern sowie den bestehenden Infrastruktur-, Versorgungs- und Verkehrsanlagen ein erhebliches Schadenpotential aufweist.

Ziel einer zukünftigen Sanierungsmassnahme ist eine möglichst rasche Verlangsamung der Geländebewegungen im Siedlungsgebiet auf unter 10 cm/Jahr. Die seit 2018 laufenden geologischen Detailuntersuchungen (BTG, 2019, 2020a) geben zahlreiche Hinweise auf gespannte Grundwasserverhältnisse im sta-

bilien Felsuntergrund unterhalb wie auch teils innerhalb der Rutschmasse. Untersuchungen von ähnlichen Hanginstabilitäten vergleichbarer Disposition und Grösse identifizierten erhöhte Wasserdrücke im Untergrund überwiegend als Hauptursache der Rutschbewegungen und erzielten im Falle einer Sanierung mit Tiefendrainagemassnahmen stets eine positive Wirkung (BTG, 2020b).

Mit einem Sondierstollen als Sofortmassnahme sollen die geologisch-geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse sowie die Drainierbarkeit des stabilen, anstehenden Gebirges unterhalb der Rutschung sowie der Rutschmasse selbst erkundet werden. Im Idealfall kann mit den Erkundungs- und Untersuchungsmaßnahmen (Stollenvortrieb im Gebirge unterhalb der Rutschung mit nach oben gerichteten Drainage- und Sondierbohrungen) bereits ein positiver Effekt auf die Rutschbewegungen, d.h. eine messbare Verlangsamung, erzielt und damit der Nachweis für die Wirksamkeit einer Tiefenentwässerung am Standort Brienz/Brinzauls erbracht werden.

## Rutschung Brienz/Brinzauls Geologie

Die gesamte Südflanke vom Piz Linard bis zum Fluss Albula ist von geomorphologischen Phänomenen und Prozessen einer tiefgründigen Grosshangbewegung geprägt, welche in verschiedenen Hangbereichen unterschiedlich aktiv sind. Der ausbauchende Hangbereich unterhalb von ca. 1'200 m ü. M., auf welcher das Dorf Brienz/Brinzauls liegt, wird als Rutschung Dorf bezeichnet und die Felswände und Ausbruchsflächen oberhalb des Dorfes bis auf ca. 1'800 m ü. M. als Rutschung Berg (vgl. Abb. 1).

Die tektonische Situation im Gebiet der Grosshangbewegung ist komplex und gekennzeichnet von mehreren, übereinander geschobenen und später wieder abgeschobenen Zwischendecken. Generell liegen in der Südflanke des Piz Linards grob geklüftete Kalke und Dolomite sowie Rauwacken (Arlberg-Dolomit und Raibler Schichten der Rothornschuppe und Silvrettadecke) über gering durchlässigen, kalkigen Tonschiefern (Allgäu-Schiefer der

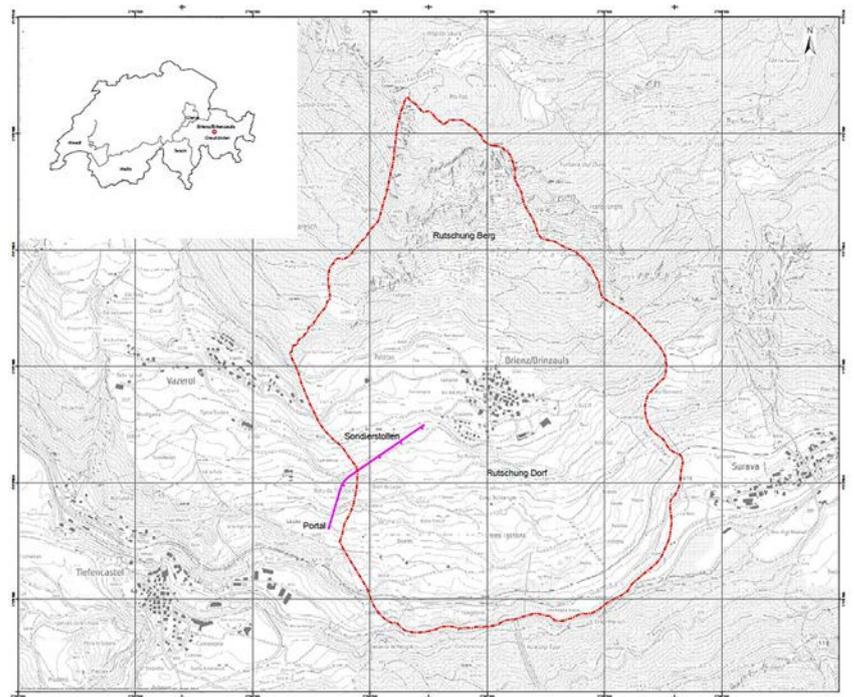


Abbildung 1: Situation mit der Umrandung der Rutschung Brienz/Brinzauls (rot) und der geplanten Linieneinführung des Sondierstollens (Quelle: BTG Büro für Technische Geologie AG, 2021a).

Ela-Decke) und Gesteinen der Arosener Zone; als tiefste tektonische Einheit folgen zur Albula hin Kalk- und Tonschiefer (nordpenninischer Flysch).

### Geologische Detailuntersuchungen

Seit Anfang 2018 laufen unter der Leitung der BTG Büro für Technische Geologie AG umfassende Detailuntersuchungen zur Erarbeitung eines repräsentativen, geologisch-kinematischen Modells der gesamten Grosshangbewegung. Die noch laufenden Untersuchungen fokussierten anfänglich auf die Rutschung Dorf und wurden im Jahr 2020 auf die Rutschung Berg ausgeweitet. Die bisherigen Untersuchungsergebnisse (BTG, 2019, 2020a) haben gezeigt, dass Tiefenerkundungen für ein verlässliches geologisch-kinematisches Modell und das Prozessverständnis unabdingbar sind. Die bis zu 340 m tiefen Kernbohrungen und die darin eingebauten Messinstrumente (Inklinometer, Glasfaser-, TDR-, Temperaturmesskabel, Porenwasserdruckgeber) sowie die zahlreichen geophysikalischen Oberflächen- und Bohrlochuntersuchungen (Seismik, Geoelektrik, Bohrloch-Logging) lieferten grundlegende Erkenntnisse zum geologischen, hydrogeologischen und geotechni-

schen Aufbau der instabilen Felsmassen und deren Bewegungsmechanismen.

Aufgrund der derzeit noch laufenden geologisch-hydrogeologischen Detailuntersuchungen sind die der Grosshangbewegung zu Grunde liegenden mechanischen und hydraulischen Prozesse und Einflussfaktoren noch nicht vollständig erkannt und verstanden. Infolge der durch die zunehmenden Bewegungsraten der Rutschung Dorf (aktuell auf über 1.3 m pro Jahr) gegebenen Dringlichkeit, muss mit der Projektierung und dem Bau des Sondierstollens jedoch bereits vor Abschluss der Detailuntersuchungen begonnen werden.

### Sondierstollen

#### Projektierung

Mit einem 635 m langen Sondierstollen südwestlich des Dorfes Brienz (Abb. 1) und damit verbundenen Sondier-, Drainage- und Überwachungsbohrungen (BTG, 2021b) sollen die geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse des stabilen, anstehenden Gebirges unterhalb der Rutschung Dorf sowie der Rutschmasse selbst erkundet und charakterisiert sowie hinsichtlich der Drainierbarkeit mittels Tiefenentwässerung beurteilt werden. Der

Sondierstollen stellt daher keine Sanierungsmassnahme dar, sondern dient im Rahmen eines grossmassstäblichen in-situ Versuches der vorgängigen Wirksamkeitsprüfung einer Tiefenentwässerung der Rutschung Dorf (BTG, 2020d). Zeigt der Sondierstollen eine verlangsamende Wirkung auf die derzeit sehr hohen Rutschbewegungen, ist dieser darauf ausgelegt, in einer späteren Phase zu einem Drainagestollen ausgebaut resp. erweitert zu werden. Die Lage des Portalstandortes und der Verlauf der Linienführung des Sondierstollens sind das Resultat einer umfassenden Variantenstudie (BTG, 2020c). Sowohl die neusten Erkenntnisse aus den laufenden geologischen Detailuntersuchungen als auch die aktuellen Geländedeformationsanalysen der Überwachungsmessungen sind in die Standortevaluation eingeflossen. Folglich handelt es sich bei der projektierten Linienführung um den aus heutiger Sicht erfolversprechendsten Standort bezüglich des Nachweises der Wirksamkeit einer Tiefenentwässerung im Gebiet der Rutschung Dorf. Der Sondierstollen wurde bewusst ausserhalb des Siedlungsgebiets geplant, um das Risiko von allfälligen negativen Auswirkungen (differenzielle Geländesetzungen) möglichst klein zu halten.

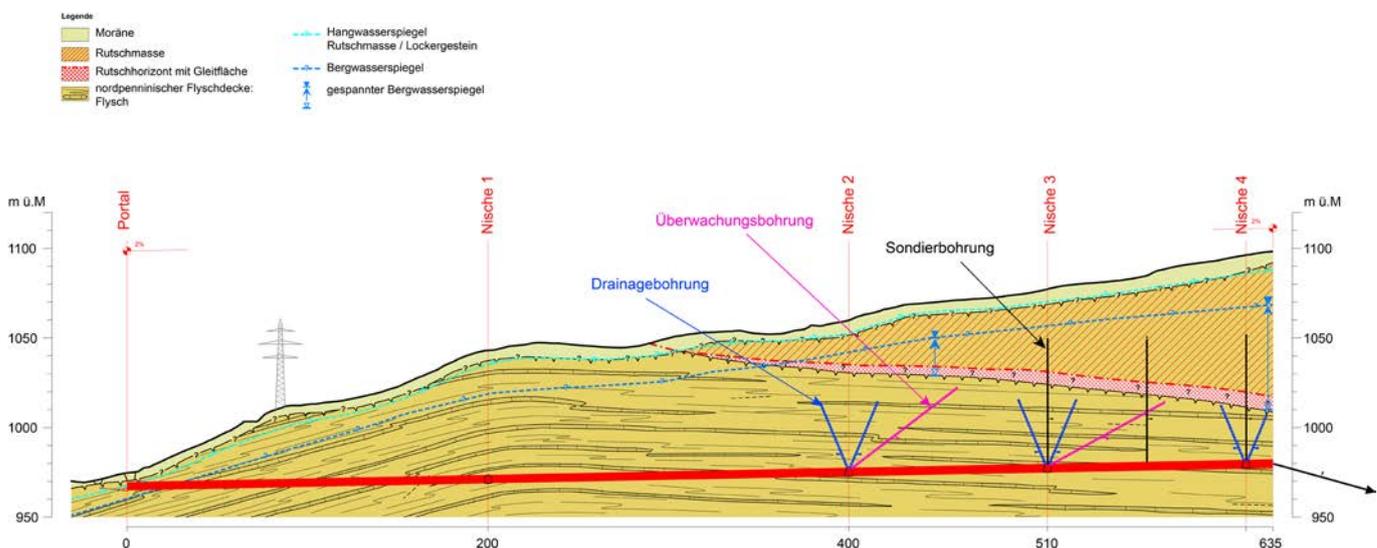


Abbildung 2: Geologisches Prognoseprofil entlang des Sondierstollens (rot) mit den geplanten Sondier-, Drainage- und Überwachungsbohrungen (Quelle: BTG Büro für Technische Geologie AG, 2021a).

Die eigentliche Bauphase des Sondierstollens erstreckt sich vom Spätsommer 2021 bis Spätsommer 2022 und beinhaltet den Stollenvortrieb, die Erstellung der talseitig angeordneten Bohrnischen sowie die daraus erstellten Drainage- und Überwachungsbohrungen ins stabile Gebirge. Der Sondierstollen wird im steigenden Vortrieb erstellt, damit im Stollen anfallendes Bergwasser frei auslaufen kann. Der Vortrieb erfolgt im Sprengvortrieb (Hufeisenprofil mit gekrümmten Paramenten und einer Gesamthöhe von 4.8 m, Ausbruchquerschnitt 17 m<sup>2</sup>) und verläuft durchgehend im unbewegten, stabilen Fels (Flysch) unterhalb der Rutschmasse (Amberg Engineering AG, 2020).

**Untersuchungskonzept**

Aufgrund der noch nicht abgeschlossenen geologischen Detailuntersuchungen und der teils noch lückenhaften Kenntnisse der in-situ Verhältnisse im Untergrund von Brienz/Brinzauls, sollen die mit den bisherigen Sondierbohrungen nicht ermittelbaren geologischen und hydrogeologischen Datengrundlagen mit Hilfe zusätzlicher Untersuchungen aus dem Sondierstollen und daraus erstellten Sondierbohrungen (vgl. Abb. 3) erhoben werden. Diese Untersuchungen beinhalten sowohl hydrogeologische, hydraulische und hydrochemische in-situ Messungen und Laboranalysen als auch geologisch-geotechnische und geomechanische in-situ und Laborversuche (BTG, 2021b). Ziel dieser Untersuchungen ist die Erlangung von grundlegenden Erkenntnissen hinsichtlich einer Sanierung der Rutschung Dorf mittels Tiefendrainage-Massnahmen. Die Erhebung einer repräsentativen und umfassenden Datengrundlage ist zudem für allfällige hydro-mechanische Modellierungen in einer nachfolgenden Projektphase von zentraler Bedeutung.

Das Untersuchungskonzept aus dem Sondierstollen sieht ein zweiphasiges Vorgehen

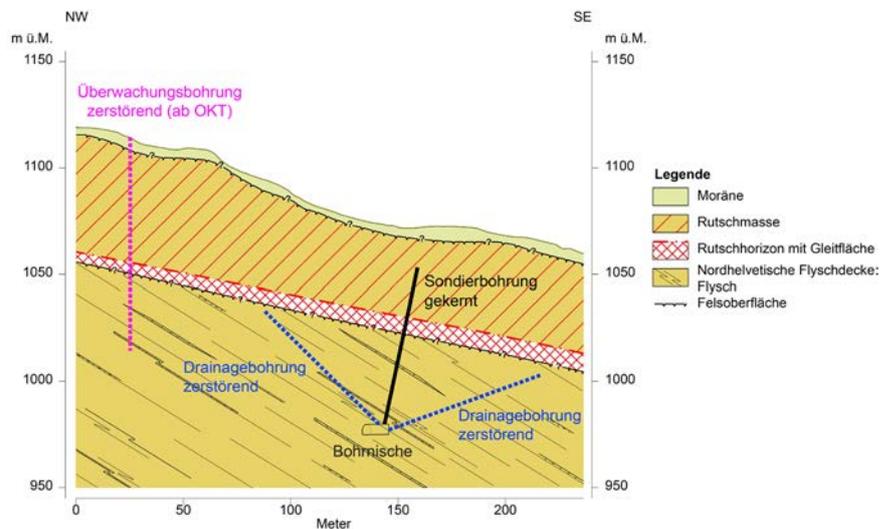


Abbildung 3: Geologisches Querprofil mit der geplanten Lage des Sondierstollens resp. der Bohrnischen sowie schematischer Darstellung dazugehöriger Sondier-, Drainage- und Überwachungsbohrungen (Quelle: BTG Büro für Technische Geologie AG, 2021b).

vor. In der ersten Phase soll einzig die Drainierbarkeit des stabilen Gebirges unterhalb der Rutschung Dorf untersucht werden. Dies erfolgt vorwiegend mittels hydraulischer Charakterisierung der geologischen Strukturen und Wasserzutritte während dem Stollenvortrieb und der aus den Bohrnischen erstellten und instrumentierten Drainage- und Überwachungsbohrungen (vgl. Abb. 2 und 3). Nach Abschluss des Stollenvortriebs beginnt die zweite Phase, in welcher die Drainierbarkeit der Rutschmasse untersucht wird. Dies erfolgt mittels steil nach oben gerichteter Sondierbohrungen durch den basalen Rutschhorizont in die Rutschmasse (vgl. Abb. 2 und 3). In diesen Bohrungen werden ebenfalls hydraulische Versuche durchgeführt und das aus den Bohrungen anfallende Wasser untersucht und überwacht. Das zweiphasige Vorgehen zielt darauf ab, dass sich sowohl die positiven wie auch allfällige negative Auswirkungen einer Tiefenentwässerung innerhalb und unterhalb der Rutschung sowohl zeitlich als auch räumlich eindeutig zuordnen lassen.

**Überwachungskonzept**

Mit einem auf den Sondierstollen abgestimmten Überwachungskonzept (BTG, 2021b) sol-

len der Wirkungsradius und der Wirkungsgrad sowie allfällige positive wie auch negative Auswirkungen einer Gebirgsdrainage auf das Rutschgebiet räumlich und zeitlich überwacht und für eine Nachweiserbringung der Wirksamkeit und Funktionstüchtigkeit messtechnisch erfasst werden. Das zeitlich abgestufte Untersuchungsprogramm (vgl. Untersuchungskonzept) soll dabei gewährleisten, dass sich zeitlich und räumlich überlagernde Drainageeffekte im stabilen Gebirge und in der darüber liegenden Rutschmasse mit räumlich getrennten Überwachungsmessungen entflechten und deren Wirksamkeit sich dadurch eindeutig zuordnen lässt. Die Überwachungsmessungen sind bezüglich ihrer Bedeutung den Untersuchungen im und aus dem Sondierstollen heraus gleichzustellen.

Folgende, durch die drainierende Wirkung des Sondierstollens und daraus erstellter Drainage- und Sondierbohrungen induzierte, mechanische und hydraulische Auswirkungen resp. Gefährdungen werden im Zusammenhang mit einer Tiefenentwässerung als massgebend erachtet und vor, während und nach Abschluss aller baulichen Tätigkeiten messtechnisch überwacht (BTG, 2021b):

- Die Überwachung der Geländebewegungen erfolgt mittels permanenter (GNSS-Stationen) und periodischer GPS-Messungen.
- Die Wasserzutritte in den Sondierstollen und den daraus erstellten Drainagebohrungen werden systematisch gemessen, beprobt und im Labor analysiert.
- Veränderungen der hydraulischen Verhältnisse, insbesondere der Wasserdrücke resp. Wasserspiegelhöhen innerhalb und unterhalb der Rutschung werden mittels zahlreicher in Überwachungsbohrungen eingebauter Porenwasserdruckgeber (PWD) permanent aufgezeichnet und überwacht.
- An der Geländeoberfläche werden zur Überwachung von mittels Tiefendrainage induzierten Geländesetzungen sowohl punktuelle Messungen (geodätisches Nivellement) als auch flächendeckende Messungen (photogrammetrische oder LiDAR-Messungen) durchgeführt.
- Um allfällige negative Auswirkungen einer Tiefendrainage auf Oberflächenquellen nachweisen zu können, werden diese im potenziellen Einflussbereich des Sondierstollens projektspezifisch überwacht.
- Im schlechtesten Fall wird die Wirksamkeit der Tiefenentwässerung widerlegt, indem entweder der Fels oder die Rutschmasse nicht ausreichend drainiert werden können oder allfällige Porenwasserdruckabsenkungen keine Verlangsamung der Rutschbewegungen zur Folge haben. In diesem Falle müssen alternative Untersuchungs- und/oder Sanierungsmassnahmen geprüft werden (BTG, 2020d).
- Beim dritten Szenario wird eine eingeschränkte Verlangsamung der Rutschgeschwindigkeiten erreicht. Einerseits kann es aufgrund einer ungenügenden Gebirgsdrainierbarkeit zu einer räumlich beschränkten, d.h. nur sehr lokal auftretenden Verlangsamung der Rutschbewegungen kommen. Andererseits ist eine grossräumige Absenkung der Porenwasserdrücke denkbar, wobei die Verlangsamung insgesamt aber zu gering ausfällt. In diesen Fällen wären weitere Untersuchungen wie hydromechanische Modellierungen oder die Prüfung von Massnahmenkombinationen erforderlich.

Erste Aussagen zu den Auswirkungen einer Tiefenentwässerung werden frühestens im Frühjahr/Sommer 2022 erwartet. Je nach Befund kann mit der Projektierung eines Drainagegestollens als eigentliche Sanierungsmassnahme bestenfalls im Sommer 2022 begonnen werden.

### **Diskussion möglicher Eintretensszenarien**

Die möglichen Auswirkungen des Sondierstollens können vereinfacht mit den folgenden drei Eintretensszenarien beschrieben werden:

- Im besten Fall wird mit dem Sondierstollen und den daraus ausgeführten Sondier- und Drainagebohrungen bereits eine bedeutende Absenkung der Porenwasserdrücke im Untergrund erreicht, die zu einer signifikanten Verlangsamung der Rutschung führt. Der Wirksamkeitsnachweis einer Tiefenentwässerung wäre dementsprechend erbracht und die Planungsgrundlagen für die eigentliche Sanierungsmassnahme eines Entwässerungstollens sind vorhanden.

### **Literatur**

Amberg Engineering AG. 2020: Sondierstollen Rutschung Brienz. Bauprojekt, Technischer Bericht. Chur.

BTG Büro für Technische Geologie AG. 2019. Rutschung Brienz/Brinzauls GR. Geologische Grundlagenerhebung: Zusammenstellung der bislang durchgeführten Untersuchungen, Zwischenbericht 1 (Nr. 5897-1). Sargans.

BTG Büro für Technische Geologie AG. 2020a. Rutschung Brienz/Brinzauls GR. Geologische Grundlagenerhebung: Zusammenstellung der bislang durchgeführten Untersuchungen, Zwischenbericht 2 (5897-2). Sargans.

BTG Büro für Technische Geologie AG. 2020b. Rutschung Brienz/Brinzauls GR. Literaturstudie Sanierung, Geologischer Bericht (5897-4). Sargans.

BTG Büro für Technische Geologie AG. 2020c. Rutschung Brienz/Brinzauls GR. Projektskizze geologische Machbarkeit Sondierstollen – Stufe Voruntersuchung, Geologischer Bericht (5897-6). Sargans.

BTG Büro für Technische Geologie AG. 2020d. Rutschung Brienz/Brinzauls GR. Massnahmenbeurteilung für Sanierung, Geologischer Bericht (5897-7). Sargans.

BTG Büro für Technische Geologie AG. 2021a. Rutschung Brienz/Brinzauls GR. Sondierstollen: Geologische Grundlagen – Stufe Bauprojekt. Geologisch-geotechnischer Bericht (5897-9). Sargans.

BTG Büro für Technische Geologie AG. 2021b. Rutschung Brienz/Brinzauls GR. Sondierstollen: Geologisches Untersuchungs- und Überwachungskonzept, Geologischer Bericht (5897-10). Sargans.

# Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren im Hochgebirge

Holger Frey <sup>1</sup> (holger.frey@geo.uzh.ch)

<sup>1</sup> Geographisches Institut, Universität Zürich, Zürich

## Résumé

Dans les régions montagneuses glaciaires, les dangers naturels sont souvent composés d'une série de processus. Les divers éléments et processus réagissent aux changements climatiques sur des échelles de temps différentes. En particulier, le recul des glaciers et l'augmentation des températures de subsurface dans les régions de pergélisol ont une influence directe sur la disposition des dangers. On peut partir du principe que le changement climatique accroît fondamentalement la probabilité d'événements liés aux dangers naturels en montagne. De premières preuves existent déjà à ce sujet. À l'inverse, il est toutefois difficile d'attribuer des événements individuels au changement climatique. En effet, les situations concrètes sont toujours influencées par divers autres facteurs qui ne sont pas directement liés au climat. Actuellement, les paysages de haute montagne sont dans un état dynamique, au-delà de l'horizon historique de l'expérience. Cela représente un défi majeur pour l'évaluation des situations de danger et nécessite des approches de l'évaluation des dangers orientées vers l'avenir et basées sur des scénarios.

## Zusammenfassung

Naturgefahren in vergletscherten Gebirgsregionen setzen sich häufig aus ganzen Kaskaden von Prozessen zusammen. Zudem reagieren die verschiedenen Elemente und Prozesse in Hochgebirgslandschaften auf unterschiedlichen Zeitskalen auf klimatische Veränderungen. Vor allem der Gletscherrückzug und der

Anstieg von Untergrundtemperaturen in Permafrostgebieten haben einen direkten Einfluss auf die Gefahrendisposition. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Klimawandel grundsätzlich die Wahrscheinlichkeit von Naturgefahrenereignissen im Gebirge erhöht, wofür auch bereits erste Evidenzen bestehen. Umgekehrt ist es jedoch schwierig, einzelne Ereignisse dem Klimawandel zuzuschreiben, weil konkrete Situationen immer auch von verschiedenen weiteren Faktoren ohne direkten Klimabezug beeinflusst werden. Aktuell befinden sich Hochgebirgslandschaften in einem dynamischen Zustand, jenseits des historischen Erfahrungshorizontes. Dies stellt eine grosse Herausforderung für die Evaluation von Gefahrensituationen dar und verlangt nach zukunftsgerichteten, szenarienbasierten Ansätzen für die Gefahrenbeurteilung.

## Einleitung

Hochgebirgsregionen sind weltweit stark vom Klimawandel betroffen und werden sich auch in Zukunft rasch und nachhaltig verändern (Hock et al., 2019). Während der Rückzug der Gebirgsgletscher ein bekannter und viel beachteter, direkter Indikator für den fortschreitenden Klimawandel ist, führen steigende Temperaturen und sich ändernde Niederschlagsverhältnisse aber auch zu weiteren, weniger gut sichtbaren Veränderungen im Gebirge. Diese sich kumulierenden Veränderungen beeinflussen auch die Naturgefahrensituation nachhaltig. Vor allem bei Grossereignissen, wie zum Beispiel dem Bergsturz am Pizzo Cengalo 2017 (Walter et al., 2020; Abbildung 1), drängt sich die Frage auf, ob diese Ereignisse eine direkte Folge des Klimawandels sind und ob in Zukunft häufiger



Abbildung 1: Anrisszone und Ablagerungen des Felssturzes am Pizzo Cengalo vom 23. August 2017. (© Foto: Andrea Badrutt, Chur)

oder mit grösseren Naturgefahrenereignissen zu rechnen ist.

In diesem Beitrag wird der Einfluss des Klimawandels auf verschiedene Elemente und Prozesse von Hochgebirgslandschaften zusammengefasst und analysiert, wie sich diese Veränderungen auf die Naturgefahrensituation auswirken. Nebst allgemeinen Überlegungen wird auch auf die Zuschreibung von konkreten Ereignissen zum Klimawandel eingegangen und schliesslich eine Reihe konkreter Implikationen für die Gefahren- und Risikobeurteilung im Hochgebirge abgeleitet.

## Neue Situationen im Hochgebirge

Die verschiedenen Elemente einer Hochgebirgslandschaft reagieren auf unterschiedlichen Zeitskalen auf Klimaänderungen. Gletscher reagieren, je nach Grösse, mit einer Verzögerung von einigen Jahren bis mehreren Jahrzehnten auf klimatische Veränderungen. Aufgrund des langsamen Prozesses der Wärmediffusion ändern sich die Temperaturen im Untergrund nur zögerlich, Permafrost in der Tiefe kann somit noch lange bestehen bleiben.

### Gletscherrückzug

Als Folge des Gletscherrückzugs ändern sich Hochgebirgsregionen von glazial geprägten zu periglazial geprägten Landschaften, in denen Schutt und mögliches Eis im Untergrund die geomorphologischen Prozesse dominieren (Carrivick & Heckmann, 2017). Gleichzeitig bilden sich in den von den Gletschern freigegeben Gebieten neue Seen, und bestehende Gletscherseen wachsen. Diese Seen stellen einerseits attraktive neue Landschaftselemente dar und bieten Möglichkeiten für die Wasser- und Energieversorgung, stellen aber auch neue potenzielle Gefahrenquellen dar (Haeberli et al., 2016). Ausbrüche von Gletscherseen können zu Schäden auch in über hundert

Kilometern Entfernung führen und stellen die weitreichendste Gletschergefahr dar. Der Gletscherschwund führt auch zu langfristigen Veränderungen der Spannungsfelder in Felswänden, die von den schwindenden Gletschern freigelegt werden. Solche Druckentlastungen können auch nach Jahren, Jahrhunderten oder gar Jahrtausenden (als Folge des Rückzugs der eiszeitlichen Gletscher) zu Felsstürzen führen (z.B. Eberhardt et al., 2004).

Eine Erwärmung am Bett eines bis anhin kalten, steilen Hängegletschers kann zum Auftreten von flüssigem Wasser führen, was einen solchen Gletscher destabilisieren kann (Faillettaz et al., 2015). Durch Veränderungen der Gletscherlängen und Lage der Zungen ändert sich auch die Disposition für Eislawinen, auch bei weniger steilen Gletschern: Zieht sich ein Gletscher in eine Steilstufe zurück, kann er potenziell instabil werden und zu einem Gletscherabbruch führen. Bei fortschreitendem Rückzug wird die Gletscherzunge diese Steilstufe aber wieder verlassen und entsprechend wird auch die Gefahr von Eislawinen wieder verschwinden. Es ist wichtig festzuhalten, dass gewisse Veränderungen der Hochgebirgslandschaft auch zur Entspannung einer Gefahrensituation führen können.

### Temperaturanstieg im Untergrund

Permafrost deckt in den Alpen ein Gebiet ab, das etwa doppelt so gross ist wie die Gletscherfläche (Boeckli et al., 2012). Steigende mittlere Jahrestemperaturen in der Luft führen auch zu einer Erhöhung der Temperaturen im Untergrund, diese Erwärmung wirkt jedoch mit zunehmender Tiefe verzögert. Die thermischen Bedingungen in eisreichem Permafrost, wie er typischerweise in Schutthalden und Moränen vorkommt, ist stark abhängig von der Schneebedeckung. Es ist davon auszugehen, dass es viele Jahrzehnte dauern wird, bis dieses Untergrundeis vollständig aufgetaut sein wird (Etzelmüller, 2013). Die Entwicklung des Per-

mafrosts in steilen Felswänden ist hingegen nur geringfügig von der Schneebedeckung beeinflusst. Vor allem in exponierten Graten und Gipfellagen können 3D Effekte zudem zu einer beschleunigten Erwärmung, auch in grösseren Tiefen, führen, weil die Wärme von verschiedenen Seiten eindringt (Noetzi & Gruber, 2009). In grösseren Tiefen wird der Permafrost im Innern der Berge noch mehrere Jahrhunderte bestehen, näher an der Oberfläche können sich hingegen grössere Gebiete erwärmen. Studien haben gezeigt, dass Felswände mit warmem Permafrost, also mittleren Untergrundtemperaturen zwischen  $-1.5^{\circ}\text{C}$  und  $0^{\circ}\text{C}$ , die grösste Anfälligkeit für Felsstürze aufweisen (Davies, 2001). Entsprechend führt eine Erhöhung der mittleren Lufttemperatur dazu, dass diese tendenziell kritischen thermischen Bedingungen sich einerseits über grössere Höhenbereiche erstrecken, andererseits auch in zunehmenden Tiefen anzutreffen sind. Die Untergrundtemperaturen im Fels beeinflussen zudem die Bedingungen in Rissen und Klüften von Felswänden. Durch advektive Prozesse kann Kluftwasser sehr effizient Wärme auch in grössere Tiefen transportieren (Hasler et al., 2011). Grundsätzlich reduzieren steigende Luft- und damit (verzögert) steigende Untergrundtemperaturen die Stabilität von Felswänden im Permafrost. Advektive Prozesse in häufig eisgefüllten Klüften können auch zu raschen und tiefgründigeren Destabilisierungen führen (Gruber & Haeberli, 2007).

### Zunahme von Starkniederschlagsereignissen

Gemäss «CH2018», den Klimaszenarien für die Schweiz, ist in Zukunft mit einer Zunahme von extremen Niederschlagsereignissen zu rechnen (NCCS, 2018). Im Hochgebirge bedeutet dies eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Murgänge. Die zunehmende Dynamik in periglazial geprägten Gebieten und die damit verbundene, erhöhte Produktion von Locker-

material verstärkt diese Problematik zusätzlich, wie das Beispiel Ritzlihorn-Spreitgraben in Guttannen eindrücklich zeigt (Huggel et al., 2012).

### Klimawandel und Gefahrensituation

Aufgrund der oben beschriebenen, klimabedingten Veränderungen der Hochgebirgslandschaften, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Wahrscheinlichkeiten für Naturgefahrenereignisse mit dem fortschreitenden Klimawandel grundsätzlich erhöhen (Hock et al., 2019). Gletscherrückzug und Permafrostdegradation führen zu nachhaltigen Veränderungen im Hochgebirge und zu einer Zunahme der Landschaftsdynamik. Gewisse Studien geben Hinweise auf eine bereits jetzt beobachtbare Zunahme von Massenbewegungen in Gebirgsregionen die, zumindest teilweise, durch den Klimawandel bedingt sein dürfte (Huggel et al., 2012). Auch von einem systemtheoretischen Standpunkt betrachtet ist davon auszugehen, dass die Hochgebirgssysteme, die aktuell weit von einem Gleichgewichtszustand entfernt sind, eine erhöhte Dynamik aufweisen.

### Zuschreibung von Einzelereignissen an den Klimawandel

Umgekehrt ist es jedoch schwierig, einzelne Ereignisse dem Klimawandel zuzuschreiben. Dieses sogenannte Attributierungsproblem hat damit zu tun, dass es in den Kausalketten

von Klimawandel zu Naturgefahrenereignissen eine Vielzahl an Störfaktoren gibt. Das Beispiel eines Gletscherseeausbruchs soll dies illustrieren (Abbildung 2):

Während die ersten drei Elemente dieser Kette, also anthropogen verursachte Treibhausgasemissionen, Klimawandel und Gletscherrückzug noch eine sehr hohe Kausalität haben, kommen auch in diesem Teil der Kette schon atmosphärische und glaziologische Faktoren zum Tragen, welche den direkten Zusammenhang verzögern oder verwässern. Noch viel stärker beeinflussen topographische, geologische und geomorphologische Störfaktoren den Kausalzusammenhang zwischen Gletscherrückzug und einem möglichen Seeausbruch: Wo ein See entsteht und wie gross er werden kann, ist zu einem grossen Teil von geologischen und tektonischen Faktoren abhängig; ob bzw. wann der See ausbricht, hängt unter anderem von den geotechnischen Eigenschaften seines Dammes und dem auslösenden Prozess ab, wobei letzterer wiederum vom Klima beeinflusst sein kann oder auch nicht. Aufgrund dieser zahlreichen Störfaktoren ist es sehr schwierig, diese Kausalkette umzukehren und im Falle eines Ereignisses – hier ein Gletscherseeausbruch – auf die Rolle des Klimawandels bzw. der anthropogenen Treibhausgase zurückzuschliessen.

Auch für Stürze aus Permafrostgebiet lassen sich ähnliche Kausalketten aufzeichnen, wobei ebenfalls Störfaktoren bei jedem Kettenele-

ment auftreten. Bei solchen Ereignissen können klimabedingte Veränderungen der Permafrostverhältnisse eine entscheidende Rolle spielen und einen Sturz verursachen (z.B. tauendes Permafrost-Eis in Klüften), ein Ereignis zumindest begünstigen (z.B. durch veränderte Bedingungen in Klüften) oder aber auch nur eine sehr marginale Rolle spielen neben anderen geotechnischen Faktoren ohne direkten Klimabezug.

Diese Schwierigkeit der Attributierung trifft nicht nur auf komplexe Kausalketten wie bei einem Seeausbruch oder einem Felssturz aus Permafrost zu, auch bei Naturereignissen, welche direkter mit dem Klima zusammenhängen, wie zum Beispiel Starkniederschläge oder Wirbelstürme, sind solche Zuschreibungen nur bedingt möglich.

### Weitere Risikofaktoren

Werden auch mögliche Schäden betrachtet, also das Risiko eines Ereignisses, kommen zahlreiche weitere soziale, ökonomische, institutionelle, politische, juristische und kulturelle Faktoren hinzu, welche keinen Bezug zum Klima haben, das Risiko aber massgebend beeinflussen. Zukünftige sozioökonomische Veränderungen und der zunehmende Ausbau von Infrastruktur und damit des Schadenpotenzials in Gebirgsregionen dürften einen grösseren Einfluss auf die Risiken haben als die Naturgefahren und deren klimabedingte Veränderungen an und für sich (Petley, 2010; Hock et al., 2019).

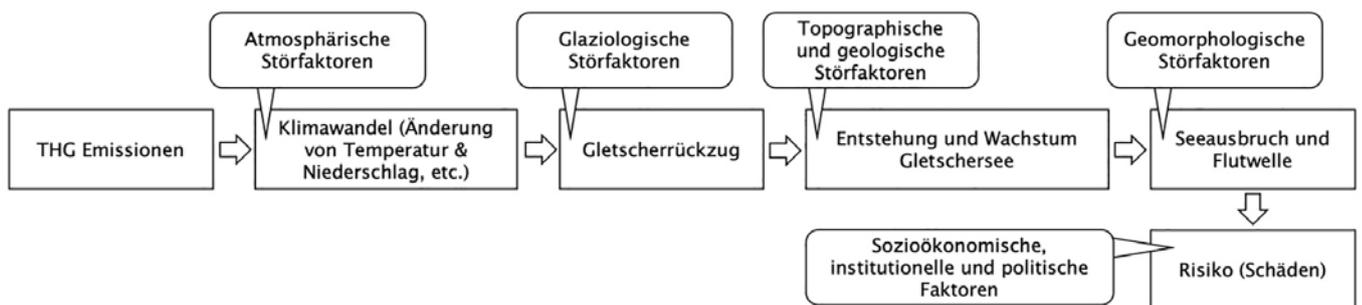


Abbildung 2: Kausalkette zwischen Treibhausgas (THG) Emissionen und Gletscherseeausbruch, mit den nicht-klimatischen Störfaktoren zu jedem Kettenelement. (Angepasst aus Huggel et al., 2020)

## Implikationen für die Gefahrenbeurteilung

Wie eingangs beschrieben, befinden sich die alpinen Gebirgsumgebungen aktuell in einem Zustand jenseits des historischen Erfahrungshorizontes. In Zukunft werden sich die Verhältnisse weiter von den historischen Bedingungen und von vergangenen Gleichgewichtszuständen wegbewegen. Erkenntnisse aus vergangenen Ereignissen können darum, aufgrund veränderter Rahmenbedingungen, häufig nicht direkt für die Beurteilung aktueller Gegebenheiten genutzt werden. In vielen Fällen fehlen solche Erfahrungen komplett, wie das Beispiel eines neu gebildeten Gletschersees anschaulich illustriert.

Naturgefahren im Hochgebirge setzen sich in vielen Fällen, vor allem bei mittleren und grossen Ereignissen, aus ganzen Kaskaden von Prozessen zusammen. Nicht zuletzt weil die einzelnen Prozesse und Faktoren auf unterschiedlichen Zeitskalen auf klimatische Veränderungen reagieren, stellt dies eine grosse Herausforderung für die Szenarienbildung dar. Die Wahrscheinlichkeiten von solchen Szenarien sind sehr schwer bis gar nicht zu quantifizieren. Dies wird weiter erschwert durch den Umstand, dass viele Prozesse häufig einmalige Ereignisse sind, sich also nicht wiederholen können, wie zum Beispiel der Abbruch einer instabilen Felspartie oder eine Breschenbildung in einem Moränendamm. Szenarien müssen darum häufig in qualitativen Wahrscheinlichkeiten (z.B. klein, mittel, gross) statt absoluten Jährlichkeiten oder Wiederkehrperioden beschrieben werden. Auch die Modellierung von Szenarien solcher Prozesskaskaden mit physikalisch basierten numerischen Modellen stellt eine Herausforderung an sich dar und erfordert untereinander kompatible Modelle von angemessener Komplexität (Frey et al., 2016 in FAN Agenda 2/2016). Mehrere Grosseignisse haben gezeigt, dass der Einbezug

bzw. die Mobilisierung von grösseren Mengen von Wasser den Ablauf beschleunigen und vor allem die Reichweite und das Ausmass von solchen Prozessketten extrem erweitern kann. Ein spezielles Augenmerk bei der Gefahrenbeurteilung und Szenarienbildung muss daher auf vorhandene Wasserkörper, wie neu entstehende oder wachsende Gletscherseen, gerichtet werden. Verschiedene Ereignisse haben jedoch gezeigt, dass auch ohne den Einbezug von Seen zum Teil unerwartet grosse Wassermassen mobilisiert werden können.

## Fazit

Die Wahrscheinlichkeit für Naturgefahrenereignisse im Hochgebirge wird durch den Klimawandel grundsätzlich erhöht. Dies ist vor allem auf den Rückzug der Gletscher und erhöhte Untergrundtemperaturen im Zusammenhang mit Permafrost zurückzuführen. Umgekehrt lassen sich Einzelereignisse, wenn überhaupt, nur sehr bedingt dem Klimawandel zuschreiben, weil bei den Kausalzusammenhängen zwischen dem Klimawandel und einem konkreten Ereignis auch zahlreiche andere Faktoren hineinspielen. Aktuelle Situationen im Hochgebirge liegen jenseits des historischen Erfahrungshorizontes; zudem setzen sich vor allem grössere Naturereignisse häufig aus ganzen Kaskaden von Prozessen zusammen. Dies stellt grosse Herausforderungen für die Gefahrenbeurteilung und Szenarienbildung dar.

## Literatur

Boeckli, L., A. Brenning, S. Gruber, & J. Noetzli (2012), Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics, *The Cryosphere*, 6, 807–820, doi:10.5194/tc-6-807-2012.

Carrivick, J. L., & T. Heckmann (2017), Short-term geomorphological evolution of proglacial systems, *Geomorphology*, 287(C), 3–28, doi:10.1016/j.geomorph.2017.01.037.

Davies, M., O. Hamza, & C. Harris (2001), The Effect of Rise in Mean Annual Temperature on the Stability of Rock Slopes Containing Ice-Filled Discontinuities, *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 137–144.

Etzel Müller, B. (2013), Recent Advances in Mountain Permafrost Research, *Permafrost and Periglacial Processes*, 24, 99–103, doi:10.1002/ppp.1772.

Failetta, J., M. Funk, & C. Vincent (2015), Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives, *Reviews of Geophysics*, (53), 203–224, doi:10.1002/2014RG000466.

Frey, H., C. Huggel, D. Schneider, Y. Schaub, J. García Hernández, & C. Portocarrero (2016), Prozesskaskaden und ihre Modellierung, *Agenda FAN*, 2/2016, 3–7.

Gruber, S., & W. Haeberli (2007), Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change, *Journal of Geophysical Research*, 112, 10, doi:10.1029/2006JF000547.

Haeberli, W., M. Buetler, C. Huggel, T. L. Friedli, Y. Schaub, & A. J. Schleiss (2016), New lakes in deglaciating high-mountain regions

- opportunities and risks, *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-016-1771-5.
- Hasler, A., S. Gruber, M. Font, & A. Dubois (2011), Advective Heat Transport in Frozen Rock Clefs: Conceptual Model, Laboratory Experiments and Numerical Simulation, *Permafrost and Periglacial Processes*, 22(4), 378–389, doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199610)10:10<1305::AID-HYP462>3.0.CO;2-F.
- Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Kääb, S. Kang, S. Kutuzov, A. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove, & H. Steltzer (2019), High Mountain Areas. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].
- Huggel, C., J. J. Clague, & O. Korup (2012), Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 77–91, doi:10.1002/esp.2223.
- Huggel, C., M. Carey, A. Emmer, H. Frey, N. Walker-Crawford, & I. Wallimann-Helmer (2020), Anthropogenic climate change and glacier lake outburst flood risk: local and global drivers and responsibilities for the case of lake Palcacocha, Peru, *Natural Hazards and Earth System Science*, 20(8), 2175–2193, doi:10.5194/nhess-20-2175-2020.
- NCCS (2018), CH2018 – *Klimaszenarien für die Schweiz*. National Centre for Climate Services, Zürich. 24 S. ISBN-Nummer 978-3-9525031-0-2.
- Noetzli, J., & S. Gruber (2009), Transient thermal effects in Alpine permafrost, *The Cryosphere*, 3, 85–99.
- Petley, D.N. (2010), On the impact of climate change and population growth on the occurrence of fatal landslides in south, east and SE Asia. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, 43, 487–496.
- Walter, F., F. Amann, A. Kos, R. Kenner, M. Phillips, A. de Preux, M. Huss, C. Tognacca, J. Clinton, T. Diehl, & Y. Bonanomi (2020), Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows, *Geomorphology*, 351(C), 106933, doi:10.1016/j.geomorph.2019.106933.

# Monitoring and Hazard Management at the Spitze Stei Rockslide, Kandersteg

Christian Kienholz <sup>1</sup> ([christian.kienholz@geotest.ch](mailto:christian.kienholz@geotest.ch))

Rachel Riner <sup>1</sup> ([rachel.riner@geotest.ch](mailto:rachel.riner@geotest.ch))

Kaspar Graf <sup>1</sup> ([kaspar.graf@geotest.ch](mailto:kaspar.graf@geotest.ch))

Daniel Tobler <sup>1</sup> ([daniel.tobler@geotest.ch](mailto:daniel.tobler@geotest.ch))

Nils Hählen <sup>2</sup> ([nils.haehlen@be.ch](mailto:nils.haehlen@be.ch))

Jörg Häberle <sup>2</sup> ([joerg.haerberle@be.ch](mailto:joerg.haerberle@be.ch))

<sup>1</sup> GEOTEST AG, Zollikofen

<sup>2</sup> Amt für Wald und Naturgefahren, Kanton Bern, Interlaken

## Zusammenfassung

Die Rutschung Spitze Stei oberhalb des Oeschinensees im Berner Oberland umfasst ~20 Mio. m<sup>3</sup> Felsmaterial, vorwiegend Kalkstein und Mergel. Die 0,5 km<sup>2</sup> große Rutschung, in einer Höhe zwischen 2200 m ü. M. und 2900 m ü. M. gelegen, wurde im Sommer 2018 nach einer Zunahme der Steinschlagaktivität und dem Auftreten ausgedehnter Risse im Gipfelbereich des Spitze Stei erkannt. Die Permafrostdegradation im oberen Bereich der Rutschung hat wahrscheinlich die bereits bestehende Instabilität aufgrund der Lithologie und Struktur des Untergrunds (gefaltete Kalkstein- und Mergelschichten, die nach Nordwesten abfallen) verschärft. Im Jahr 2018 wurden umfassende Gefahrenbeurteilungen eingeleitet und wahrscheinliche Sturzscenarien definiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Sturzereignisse vom Spitze Stei das Gebiet um den Oeschinensee direkt bedrohen, wobei nachfolgende Sekundärprozesse das Dorf Kandersteg erreichen können. Zunehmende Rutschgeschwindigkeiten lassen vermuten, dass in den nächsten Jahren grosse Sturzereignisse auftreten können. Um die Vorhersage und Frühwarnung zu verbessern, wurde eine redundante Überwachung der Rutschung eingerichtet, die sich unter anderem auf GNSS-, geodätische, Radar-, Kamera- und Bohrlochmessungen stützt. Die Überwachungsmaßnahmen und das entsprechende Gefahrenmanagement werden in diesem Beitrag beschrieben.

## Résumé

Le glissement de Spitze Stei au-dessus du lac d'Oeschinen dans l'Oberland bernois implique ~20 millions de m<sup>3</sup> de matériaux rocheux, principalement du calcaire et de la marne. Le glissement de 0,5 km<sup>2</sup>, dont l'altitude varie entre 2200 m et 2900 m au-dessus du niveau de la mer, a été détecté en été 2018 suite à une augmentation de l'activité de chutes de pierres et à l'apparition de fissures étendues dans la zone sommitale du Spitze Stei. La dégradation du pergélisol dans la partie supérieure du glissement a probablement exacerbé l'instabilité préexistante en raison de la lithologie et de la structure du substratum rocheux (nappes calcaires et marneuses plissées plongeant vers le nord-ouest). Des évaluations complètes des dangers ont été lancées en 2018 et des scénarios probables d'avalanches rocheuses ont été définis. Les résultats indiquent que les avalanches de roches de Spitze Stei menacent directement la zone autour du lac d'Oeschinen, avec des processus secondaires associés atteignant le village de Kandersteg. L'augmentation de la vitesse du glissement suggère que de grandes avalanches de pierres se produiront dans les années à venir. Afin d'améliorer l'état de préparation, une surveillance redondante de l'éboulement a été mise en place, en s'appuyant sur des mesures GNSS, géodésiques, radar, caméra et forage, entre autres mesures de surveillance. Les mesures de surveillance et la gestion des dangers correspondants sont détaillées dans cet article.

## Summary

The Spitze Stei slide above Lake Oeschinen in the Bernese Oberland involves ~20 Mio. m<sup>3</sup> of rock material, predominantly limestone and marl. The 0.5 km<sup>2</sup> slide, which ranges in elevation between 2200 m a.s.l. and 2900 m a.s.l., was detected in summer 2018 following an increase in rockfall activity and appearance of extensive cracks in the peak area of Spitze Stei. Permafrost degradation in the upper reaches of the slide likely exacerbated the pre-existing instability due to the lithology and structure of the bedrock (folded limestone and marl nappes dipping northwest). Comprehensive hazard assessments were initiated in 2018 and probable rock avalanche scenarios defined. Results indicate that rock avalanches from Spitze Stei threaten the area around Lake Oeschinen directly, with associated secondary processes reaching the village of Kandersteg. Increasing velocities across the slide suggest that large rock avalanches may occur within the next years. To improve preparedness, redundant monitoring of the slide has been implemented, relying on GNSS, geodetic, radar, camera, and borehole measurements, among other monitoring measures. The monitoring measures and the corresponding hazard management are detailed in this paper.

## Introduction

The Spitze Stei rockslide above Lake Oeschinen in the Kandersteg region (Bernese Alps, Switzerland) comprises an area of ~0.5 km<sup>2</sup>, ranging in elevation between 2200 m a.s.l.

and 2900 m a.s.l. (Figure 1a). The slide encompasses two distinct rock formations within the Doldenhorn Nappe: the Öhrli Formation, consisting of limestone and marl above approximately 2600 m a.s.l. (Fig. 1c, d) and the Zementstein Formation, consisting of marly and clayey schist below 2600 m a.s.l. The layers dip at an angle of approximately 30° in NW-direction. In the upper portion of the rockslide, bedrock is exposed at the surface; in the lower portion, the bedrock is covered by scree.

The regional geologic setting contributes to an unstable pre-disposition, which has led to large rock avalanches in the past. A rock avalanche with a volume of roughly 800 Mio. m<sup>3</sup> occurred to the west of the current instability (Fisistock Bergsturz, annotation 2 in Figure 1a, c) ~3200 years b.p. (Tinner et al., 2005; Singeisen et al., 2020). The area below the current instability (annotation 3 in Figure 1a, c) was subject to a large rock avalanche ~2300 year b.p. (Oeschinensee Bergsturz, Köpfler et al., 2018). This rock avalanche dammed current Lake Oeschinen.

The uppermost portions of the slide area (above ~2800 m a.s.l.) lie within permafrost, as suggested by modeling (Kenner et al., 2019) and confirmed by in-situ Electrical Resistivity Tomography surveys (Hilbich and Hauck, 2019), borehole measurements (Geotest, 2020b), and direct observations of freshly exposed permafrost ice (Figure 1d; Geotest 2020e). Below 2800 m a.s.l., some ice-rich permafrost persists, most notably in the Eastern portion of the slide area, where an active small rock glacier is present. While the rock glacier has moved for decades, other portions of the Spitze Stei instability began moving in the early 2000s, as shown by retrospective analyses of space-borne radar data via InSAR-analyses (Caduff et al., 2021) and airborne orthoimages via feature tracking (Geotest, 2020c). Acceleration over the past decade has

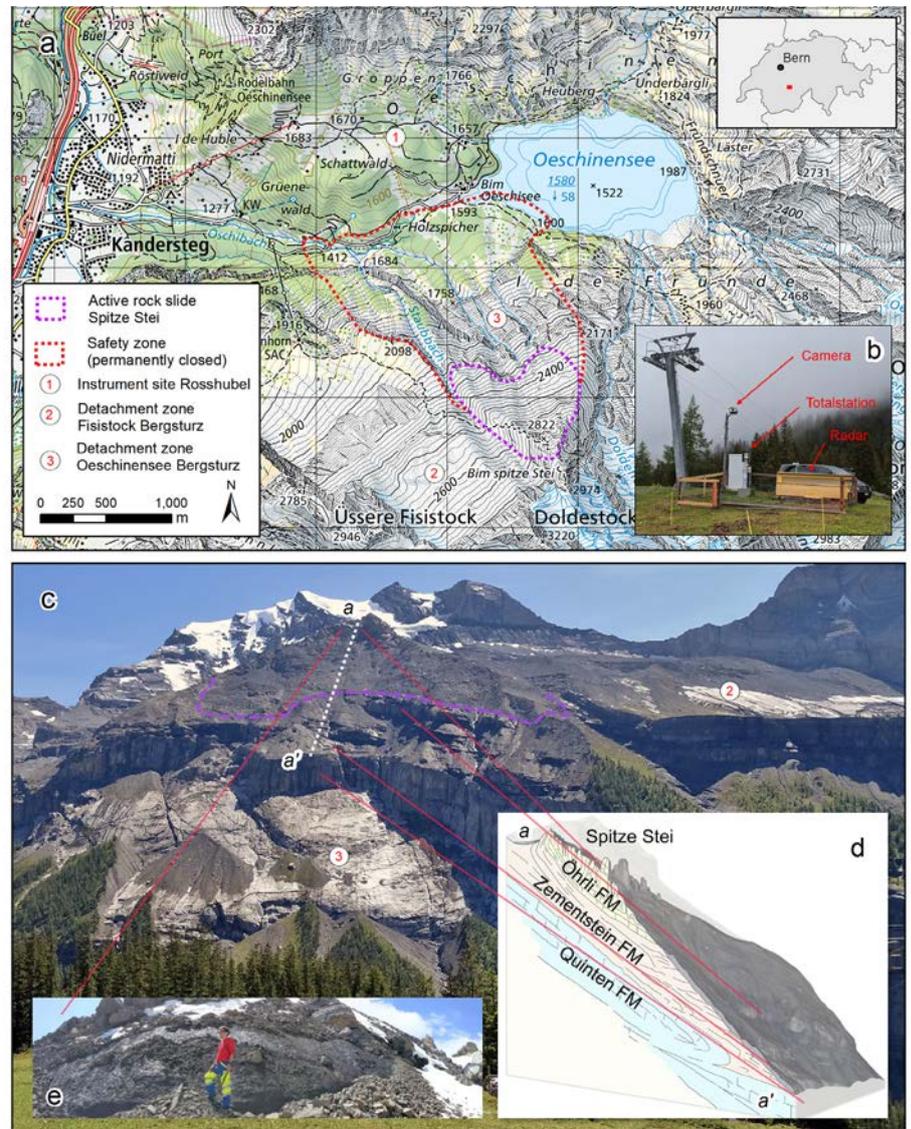


Figure 1: a) Overview map of the Spitze Stei rockslide near Kandersteg. b) Photograph of the instrument site at Rosshubel (annotation 1 in a). c) Photograph of the slide area, taken from the Rosshubel instrument site. d) Block diagram showing the main geologic formations at Spitze Stei. The white dotted line a – a' in c) indicates the cross-section. e) Freshly exposed permafrost ice in the peak area of Spitze Stei.

been strong and non-linear (Figure 2) and accompanied by an expansion of the size of the unstable perimeter (Caduff et al., 2021; Geotest, 2020c). More and growing fractures in the exposed bedrock, increasingly tilted blocks, and more frequent rockfall events from the Spitze Stei area have been clear signs of the progressing destabilization.

Today's unstable situation is likely caused by several factors (Geotest, 2019a,b; CSD and SLF 2020). A folded and faulted lithological sequence of competent and incompetent for-

mations and the aforementioned rock avalanches to the west and below Spitze Stei led to an unfavorable pre-disposition. Processes such as ice segregation / ice wedge growth further weakened the bedrock at Spitze Stei over centuries. More recently, degrading permafrost due to climate warming facilitated the routing of water to the slide surface, a process that likely contributed considerably to the observed destabilization. Finally, high mass removal rates at the toe of the instability caused a local unloading that may have further accelerated the destabilization process.

The hazard situation at Spitze Stei has been assessed since 2018, relying on a growing body of field data and observations (Geotest 2019a,b, Geotest 2020e). The derived initial 3D-model of the unstable rock mass suggests a total volume of ~20 Mio. m<sup>3</sup> in several compartments with distinct displacement rates (Figure 3). Linked scenarios for the primary process rock avalanche cover avalanche volumes from 200'000 m<sup>3</sup> to 20 Mio. m<sup>3</sup> (Geotest 2019b, Geotest 2020a).

While the primary process (including pressure waves and potentially triggered flood waves in Lake Oeschinen) is expected to threaten areas at Lake Oeschinen and along Oeschibach (Figure 4), it reaches the outskirts of Kandersteg only in the case of the largest events and choosing pessimistic parameters within the used RAMMS and DAN-3D models (Geotest 2019a,b, Geotest 2020a). However, potentially triggered secondary and tertiary processes (e.g., debris flows originating in the deposits of the primary process, flooding of the Kander due to debris flows in Oeschibach) expand the affected parameter across larger parts of Kandersteg (NDR Consulting and Hunziker Gefahrenmanagement, 2020; Hunziker, Zarn & Partner, 2020).

Given the destructive potential of the Spitze Stei slide, extensive monitoring measures have been implemented since 2018 (Geotest 2020a). The goal of the monitoring is to detect large rock avalanches (> 200'000 m<sup>3</sup>) that may affect areas outside the permanently closed safety zone (Figure 1a). Detection should occur at least 24 hours before the events, independent of environmental conditions. The monitoring measures and the corresponding hazard management are detailed next.

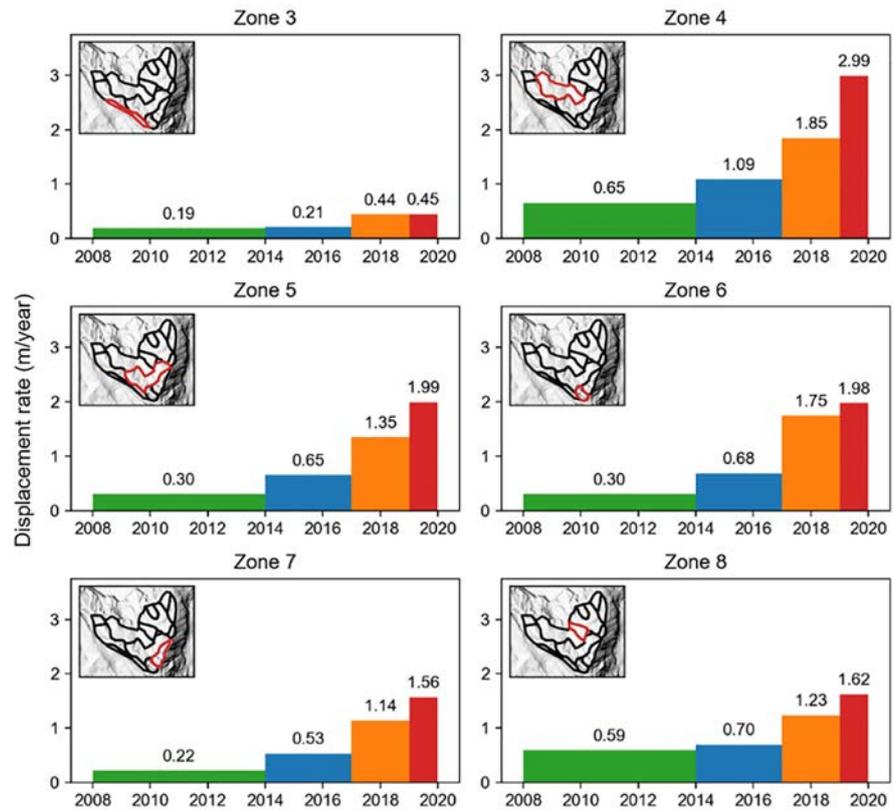


Figure 2: Evolution of displacement rates (m/year) for selected zones of the Spitze Stei slide, derived from feature tracking on a time series of aerial orthoimages captured after 2008 (Geotest, 2020c). Left and right sides of the bars indicate the years of the aerial images compared. Bar heights and annotations show the averaged displacement rates derived for each zone. Zone locations are outlined red in the inset maps.

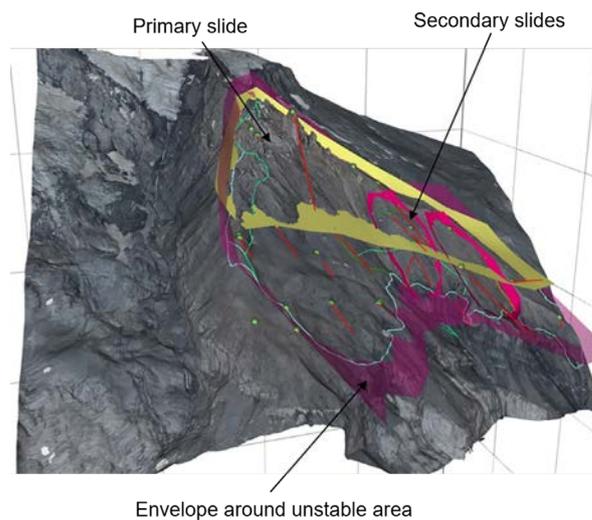


Figure 3: Initial 3D-model of the unstable rock mass (Geotest 2019b). The peak area of Spitze Stei with its exposed Öhrli-limestone is part of the compartment annotated "Primary slide" (yellow sliding surface), encompassing a volume of approximately 5 Mio. m<sup>3</sup>, and moving at rates of up to 3 m/year. In the central and western flank of the instability, secondary shallower slides exist in the scree (pink sliding surfaces). The corresponding volumes reach an estimated 1 Mio. m<sup>3</sup>, with annual displacements exceeding 4 m. The envelope around the unstable perimeter (purple sliding surface) comprises a volume of 20 Mio. m<sup>3</sup>. The portions located outside primary- and secondary slides are moving slower, at rates of generally < 1 m/year.

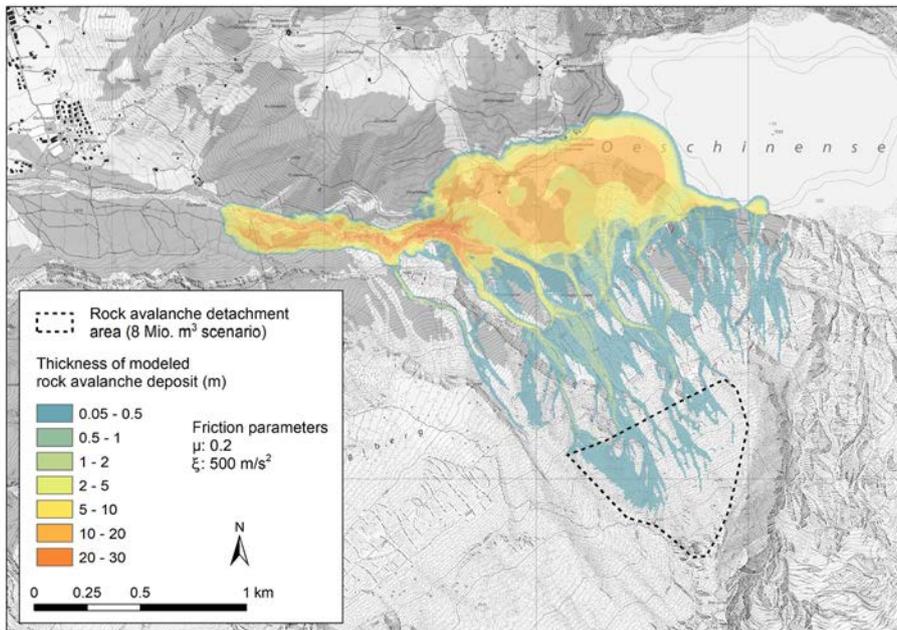


Figure 4: RAMMS-modeled deposition-thickness for an 8 Mio. m<sup>3</sup> release, using friction parameters of  $\mu = 0.2$  and  $\zeta = 500 \text{ m/s}^2$ .

### Monitoring

The monitoring of Spitze Stei relies on multiple technologies (Figure 5). Deployment of several independent systems achieves redundancy and eliminates the impact of technology-specific weaknesses (Table 1).

Automatic geodetic measurements (i.e., remote surveying of prisms installed in the slide area) and GNSS measurements are the mainstay of the year-round monitoring of Spitze Stei, providing data at half-hourly (geodetic measurements) to hourly (GNSS) intervals. While geodetic measurements can achieve high accuracy (mm to cm-level) at Spitze Stei despite the large (2 – 3 km) distance between total station and reflectors, the total station used for the surveying requires a clear view of the prisms surveyed. Clouds between total station and prisms prevent measurements, as does snow covering the prisms. Reference prisms placed in stable terrain next to the slide are mandatory to correct for atmospheric perturbations, which can reduce the measurement accuracy significantly if not corrected for. GNSS provide accurate information (mm to cm-level) year-round in all weather conditions,

however, given the extensive hardware (GNSS-box, mast with solar panel and antennas) exposed in the rockfall zone, installing and maintaining a GNSS-network is more costly than maintaining a geodetic network of similar size. At Spitze Stei, the GNSS network is thus less dense than the geodetic network (28 prisms vs. 13 GNSS as of spring 2021) and spatially biased towards the upper, less exposed portions of the instability (Figure 6).

Unlike geodetic and GNSS measurements, which provide point information, terrestrial ra-

dar provides spatially distributed velocity information across the instability. Also, radar requires no installations in the slide area, and can sense through clouds that prevent geodetic measurements and checks via time-lapse cameras. However, certain conditions (e.g., melting snow in the slide area, high thermal activity between radar instrument and slide) may prevent reliable radar measurements due to temporal decorrelation of the measured phase signal, while geodetic and GNSS measurements work well under similar conditions. Another slight drawback is the fact that radar interferometry provides 1D speeds in line-of-sight (LOS) of the radar only, compared to the 3D-velocities provided by both GNSS and geodetic measurements (Table 1). At Spitze Stei, a terrestrial radar is deployed from late spring to fall, when displacement rates are highest and surface conditions most suitable for measurements (little to no snow). Like the total station for geodetic measurements, the radar is placed at the Rosshubel instrument site at 2 – 3 km distance from the slide (annotation 1 in Figure 1a). The postprocessing-algorithm, specifically adapted to cope with the challenging conditions at Spitze Stei (large distance between radar and slide, high thermal activity), considers hundreds of measurements taken over multiple hours to achieve the targeted mm-level accuracy.

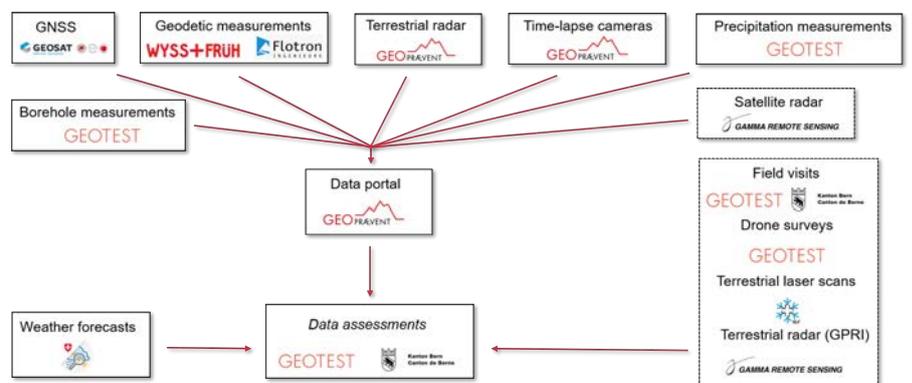


Figure 5: Overview of the monitoring setup at Spitze Stei. Boxes with solid outlines show high-frequency (hourly to sub-hourly) measurements incorporated into the short-term monitoring. Boxes with dotted outlines show lower-frequency measurements used primarily for the longer-term monitoring. The latter data are collected on a multi-day (satellite radar) to multi-month schedule (e.g., drone surveys, terrestrial laser surveys, field visits) and typically not hosted on the central data portal.

Table 1: Key strengths (+) and weaknesses (-) of the main monitoring systems deployed at Spitze Stei.

	Geodetic measurements	GNSS	Radar	Camera
+	<ul style="list-style-type: none"> <li>High accuracy (mm- to cm-level)</li> <li>Inexpensive instruments (surveying prisms) deployed in the slide area</li> <li>Measurement of 1D (distance only, most accurate) or 3D-motion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High accuracy (mm- to cm-level)</li> <li>Measurements of 3D-motion</li> <li>Measurements independent of weather conditions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spatially distributed measurements</li> <li>No instruments in the slide area, measurements before, during, and after events possible</li> <li>Measurements possible in cloudy conditions</li> <li>Accuracy very high (mm-level) under ideal conditions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spatially distributed measurements</li> <li>No instruments in the slide area; measurements before, during, and after events possible</li> <li>Deployment costs relatively low</li> </ul>
-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Measurements require clear view between prisms and total station (clear weather, prisms snow-free)</li> <li>Only point measurements</li> <li>Replacement of lost prisms after events requires field work</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Expensive instruments deployed in the slide area</li> <li>Replacements/repairs require field work</li> <li>Only point measurements</li> <li>Mobile network required at GNSS-locations for data transmission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Speeds only in radar line-of-sight, 3D-velocities require radar constellation</li> <li>Accuracy reduced under challenging conditions (e.g., strong thermal activity)</li> <li>Deployment expensive (high instrument costs, complex processing, large data amounts)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Measurements require clear view between slide and camera</li> <li>Displacement measurements less sensitive than those from geodetic, GNSS, and radar</li> <li>Mobile network required at camera locations</li> </ul>

Time-lapse camera systems built around full frame, high-resolution cameras are currently installed at Spitze Stei at the Rosshubel site to provide a front view of the slide, and at east-ridge to provide a close-up view of the peak area and the west flank (Figure 6). Images are taken at hourly intervals. Recent developments hard- and software provide useful High Definition Range (HDR) images even in lowest-light conditions. The key benefits of time-lapse images are providing near-real time information regarding in-situ conditions (weather, snow cover) and documenting slides and rock-

fall events. Quantitative analyses of time-lapse images (feature tracking) further support the short-term motion monitoring and early warning. However, since tracking on oblique photos lacks the sensitivity of GNSS-, geodetic, and radar-measurements, subtle and short-lived accelerations prior to an event may go unnoticed using camera data alone. While tracking on images provides spatially distributed information within the camera's field of view, 3D-motion is only derivable with multiple cameras installed in constellation, something not currently implemented at Spitze Stei.

The monitoring also relies on in-situ precipitation measurements conducted at the west ridge of Spitze Stei, as well as temperature and water pressure measurements conducted in three 30 to 40 m deep boreholes in the periphery of the instability (Figures 5, 6). Water input is a key driver for the seasonal accelerations observed at the slide (Geotest, 2019b), stressing the importance of quantifying local precipitation for monitoring purposes. Borehole measurements are important for the long-term monitoring of the underground temperature development, however, also benefit the short-term monitoring at Spitze Stei. For example, quickly rising temperatures in the upper borehole sections in spring indicate the infiltration of water into the previously frozen ground, hinting at an imminent acceleration of the shallow slide portions. Pressure gauges placed in the boreholes measure water levels directly.

The monitoring data discussed above is hosted centrally on redundant data servers (Figure 5). The corresponding webportal provides interactive instrument-specific plots of the data; upon exceedance of preset thresholds, it also triggers automatic warnings to the personnel in charge of the data assessments. While mainly based on the collected high-frequency data, these assessments also rely on observations and data collected on a multi-day (satellite radar) to multi-month schedule (e.g., drone surveys, terrestrial laser surveys, field visits), which are part of the long-term monitoring (Figure 5).

## Hazard management

In addition to ensuring continuous operation of the monitoring systems, Geotest assesses the incoming monitoring data with respect to the hazard development from primary processes (rock avalanches) and secondary processes (e.g., debris flows in Oeschibach). Any requi-

red actions are initiated in collaboration with the Amt für Wald und Naturgefahren (AWN) of the Kanton of Bern, as defined in the underlying safety concept (Geotest, 2020a). The course of complex actions like evacuations is defined in separate handbooks (Geotest, 2020d).

Geotest maintains a year-round duty service, with the personnel on duty checking data and instrument health on a regular schedule, generally three times a day, and whenever automatic warnings are issued by the data portal upon exceedance of preset thresholds. As part of this task, Geotest compiles and shares weekly reports among a group of state, municipal and private decision makers and stakeholders. These reports summarize the developments of the past week (observed velocities, notable events) and provide an outlook on the following week, including hazard levels for both primary and secondary processes.

To facilitate the recurring data assessment and reporting tasks, Geotest has programmed routines that provide overview panels that complement the instrument-specific plots available on the central Spitze Stei data portal. For example, these panels group data from different sensors by spatial zones, provide key displacement numbers in addition to the visual plots, and feature required auxiliary information (e.g., preset thresholds, current time, Figure 8). These panels are designated for the personnel on duty and deliberately kept separate from the portal so as not to clutter it. Though largely based on data from the central portal, the routines also include data from other sources, such as measurements and forecasts available via BAFU's Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren (GIN) Application Programming Interface (API). The GIN-API allows for gaining access to precipitation measurements and forecasts of nearby

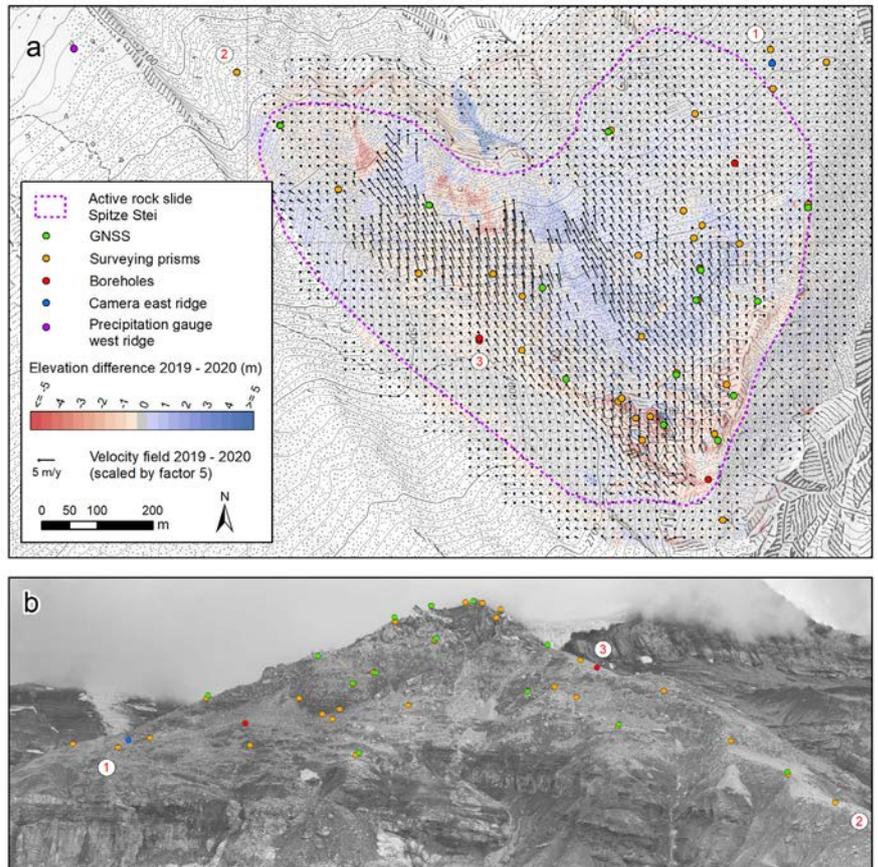


Figure 6: a) Map of Spitze Stei, showing instrument locations as colored dots. The velocity field derived for the 2019 – 2020 period is shown for reference, as are the elevation changes measured over the same period. In areas without velocity vectors, material displacements due to slides or rock fall events (visible as dark red and dark blue areas in the elevation change raster) prohibited feature tracking. b) Oblique view of the slide area, with instrument locations marked as dots. Annotations 1 through 3 are provided for spatial orientation.

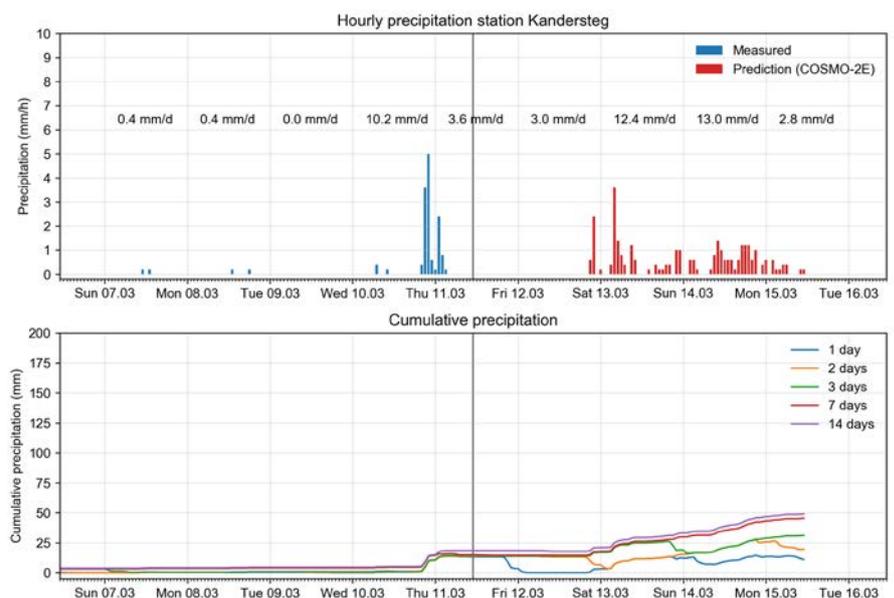


Figure 7: a) Measured and COSMO-2E-predicted hourly precipitation for the weather station at Kandersteg. Daily precipitation sums are annotated in the plot. The vertical gray line shows the current time. b) Cumulative precipitation sums computed across measured and predicted precipitation. Plots like these are updated every thirty minutes.

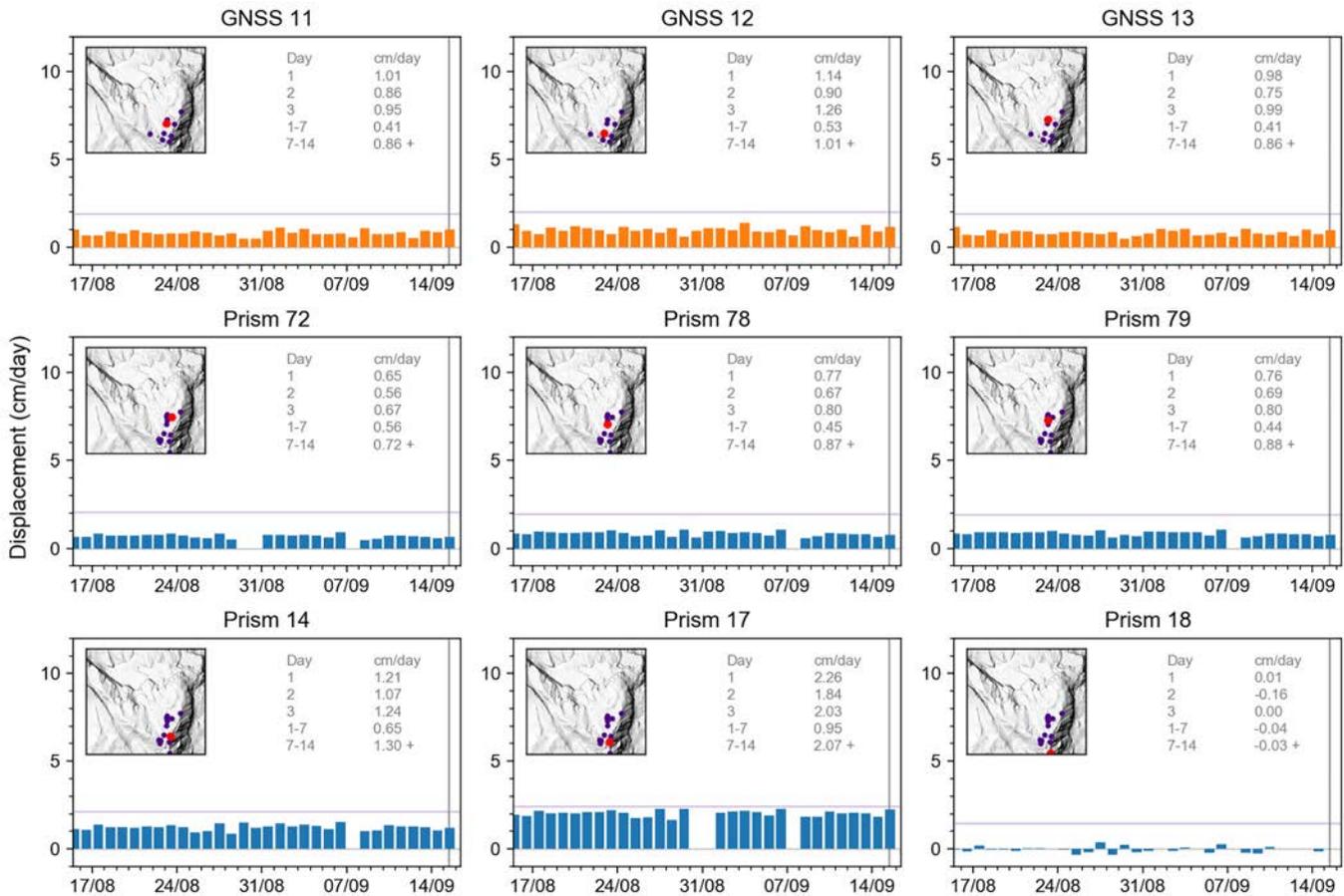


Figure 8: Daily averaged velocities for GNSS and surveying prisms installed in the peak zone of Spitze Stei, period mid-August to mid-September 2020. The figure shown is part of a larger overview panel.

weather stations that are not part of the Spitze Stei monitoring network. The API-data can be processed to derive customized quantities that combine measurements and predictions (e.g., cumulative precipitation over predefined periods, Figure 7). Observational data has allowed linking events (e.g., material releases at Spitze Stei, debris flow events in Oeschibach) to precipitation thresholds, making such thresholds useful for the assessment of both primary and secondary processes.

## Events 2020

While no major events occurred during 2020, the combination of deployed instruments and technologies allowed us to detect the small events that did occur. The collapse of an isolated 10'000 m<sup>3</sup> pillar (Figure 9) in the peak area of Spitze Stei in October 2020 was pi-

cked up by two reflectors installed at the pillar, which showed directional change and acceleration over the course of several days prior to the collapse. The acceleration was also picked up by the radar and time-lapse data. The imminent collapse of the rock pillar was discussed in the weekly report on behalf of the municipality. No measures were mandated since the event was to affect the permanently closed safety zone only.

Several smaller slides (volumes of a several 1'000 m<sup>3</sup> each) occurred in the lower portion of the west flank in the secondary scree slides. The material of one of the releases (18. June 2020) was remobilized into a debris flow in Oeschibach within 24 hours, depositing some material in the Oeschibach channel outside the permanently closed safety zone. The cor-

responding accelerations in the scree at the Spitze Stei west flank were captured by radar measurements, announcing the upcoming release. The radar data also allowed for monitoring the velocity development following the material releases (Figure 10), which has proven a key advantage of this monitoring method (renewed acceleration towards second releases can be detected). Having the uppermost section of the Oeschibach (called Chalberspissibäche) covered by time-lapse data from the Rosshubel instrument site allowed for confirming material deposition and temporary stabilization in the uppermost reaches of Oeschibach. The remobilization during the following night was not immediately detected given the lack of monitoring equipment in the channel at the time.



Figure 9: Collapse of a 10'000 m<sup>3</sup> rock pillar in the peak area of Spitze Stei in October 2020 captured by the time-lapse camera installed at the east ridge location.

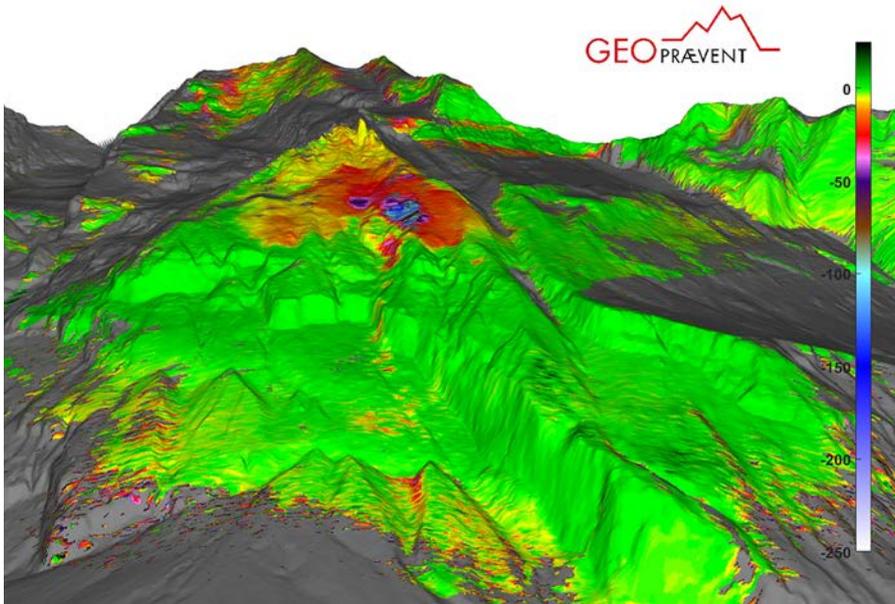


Figure 10: Radar LOS-speeds (mm/day) as detected after the slide event of 18 June 2020. Blue-brown colors indicate fast-moving zones, with LOS-speeds of up to 15 cm/day.

instruments installed on-site. Given the hazard potential coming from Spitze Stei, the resources invested into the monitoring are worthwhile. Importantly, the collected data not only benefit the short-term monitoring but also improve the system understanding, by providing key time series for the corresponding analyses.

## Conclusions

In 2020, the monitoring of the Spitze Stei rockslide reached its targets for spatial and temporal coverage, redundancy and data processing. The combination of deployed instruments and technologies allowed us to detect the small events that occurred in 2020. This makes us confident in our ability to detect larger events within the targeted 24-hour period. Such larger events are expected to have longer acceleration periods and larger footprints, populated by several of our instruments deployed.

2021 efforts will focus on maintenance and strategic local additions of instruments at the Spitze Stei slide. We will also re-assess the monitoring of the underlying Oeschibach, which currently consists of an array of time-lapse cameras placed along the channel. Maintenance work at Spitze Stei is substantial, given the large displacement rates observed (which, for example, require occasional reorientation of the surveying prisms towards the total station) and rockfall and avalanche events, which occasionally damage or destroy

## Literature

- Caduff R., Strozzi T., Hählen N., Häberle J. (2021): Accelerating Landslide Hazard at Kandersteg, Swiss Alps; Combining 28 Years of Satellite InSAR and Single Campaign Terrestrial Radar Data. In: Vilímek V., Wang F., Strom A., Sassa K., Bobrowsky P.T., Takara K. (eds) Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk. WLF 2020. ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60319-9\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60319-9_29)
- CSD and SLF (2020): Zweitmeinung zu geologischem Modell, Szenarien und Wirkungsbereiche «Spitze Stei», Kandersteg, Bern, Bericht Nr. BE09940.100.
- Geotest (2019a): «Kandersteg, «Spitze Stei», Expertenbericht Phase A und B», Bericht Nr. 1418139.1.
- Geotest (2019b): «Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement, Ergebnisse und Auswertungen 2019», Bericht Nr. 1418139.2.
- Geotest (2020a): «Kandersteg, «Spitze Stei», Sicherheitskonzept Gemeinde», Bericht Nr. 1418139.6.
- Geotest (2020b): «Kandersteg, «Spitze Stei», Permafrostuntersuchungen», Bericht Nr. 1418139.9.
- Geotest (2020c): «Kandersteg, «Spitze Stei», Auswertung historische Orthophotos», Bericht Nr. 1418139.11.
- Geotest (2020d): «Kandersteg, «Spitze Stei», Notfallkonzept.
- Geotest (2020e): «Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement, Datenerhebungen und Auswertungen 2020», Bericht Nr. 1418139.12.
- Hilbich C. and Hauck C. (2019): Geophysikalische Untersuchungen im Gebiet des «Spitze Stei», Berner Oberland, Juli 2019. Technical Report, University of Fribourg.
- Hunziker, Zarn & Partner (2020): «Spitze Stei» Tertiärprozesse: Auswirkungen auf die Kander in Kandersteg, Projekt A-1124.
- Kenner, R., Noetzli, J., Hoelzle M., Raetzo H., Phillips M. (2019): Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps. *The Cryosphere* 13: 1925–1941. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-13-1925-2019>
- Köpfli P., Grämiger L. M., Moore J. R., Vockenhuber C., Ivy-Ochs S. (2018): The Oeschinensee rock avalanche, Bernese Alps, Switzerland: a co-seismic failure 2300 years ago? *Swiss J Geosci*
- NDR Consulting and Hunziker Gefahrenmanagement (2020): Spitze Stei Sekundärprozesse, Faktenblätter und Erläuterungen.
- Singeisen C., Ivy-Ochs S., Wolter A., Steinemann O., Akçar N., Yesilyurt S., Vockenhuber C. (2020): The Kandersteg rock avalanche (Switzerland): integrated analysis of a late Holocene catastrophic event. *Landslides*
- Tinner W., Kaltenrieder P., Soom M., Zwahlen P., Schmidhalter M., Boschetti A., Schlüchter C. (2005): Der nacheiszeitliche Bergsturz im Kandertal (Schweiz): Alter und Auswirkungen auf die damalige Umwelt. *Eclogae Geol Helv* 98:83–95. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00015-005-1147-8>



*Rutschung Spitze Stei, Kandersteg. Foto: Valentin Raemy*



*Rutschung Spitze Stei, Kandersteg. Foto: Valentin Raemy*



*Reste der Wysstanni-Lawine im Tschärzistal (Saanen BE). Der Wasserüberlauf wurde völlig von der Lawine vom 03.02.21 aufgefüllt und hat dem Druck standgehalten. Foto am 23.05.21, Jean-Jacques Thormann*