

Herbstkurs 2019

Kursunterlagen

Umgang mit spontanen Rutschungen und Hangmuren



Flachgründige Rutschung und Hangmure in St. Antönien GR, Unwetter 2005, Foto: WSL

Vorwort

Liebe Kursteilnehmerinnen und Kursteilnehmer, liebe Leserinnen und Leser

Der FAN-Herbstkurs 2019 findet zum Thema „Umgang mit spontanen Rutschungen und Hangmuren“ im Kanton Appenzell Ausserrhoden statt. Wir widmen uns damit einem Spezialthema, welches unter Fachleuten auf grosses Interesse stösst. Neben zahlreichen Beiträgen aus Forschung und Praxis setzen sich die Teilnehmenden in einem Praxisteil schwergewichtig mit der Methodik der Gefahrenbeurteilung auseinander.

In der Keynote präsentiert Arthur Sandri (BAFU) die Palette an Herausforderungen bei der Beurteilung von spontanen Rutschungen und Hangmuren und die daraus resultierenden Schwierigkeiten bei der Massnahmenplanung. Sein Beitrag zeigt die Entwicklung im Umgang mit den beiden Naturgefahrenprozessen in den letzten Jahrzehnten in der Schweiz und weist auf offene und noch zu lösende Fragen hin.

Im Beitrag von Alexandru Marin (ETHZ) werden die grundlegenden bodenmechanischen Eigenschaften von flachgründigen Rutschungen beleuchtet, welche uns das notwendige Verständnis für deren Beurteilung vermitteln sollen. Dabei kommen die Problematik der Auslöse- und Einflussfaktoren, die Ansätze zur Beurteilung der Hangstabilität sowie die Feld- und Laborversuche für die Beobachtung von Rutschungen zur Sprache.

Frank Graf (SLF) erläutert die wichtige Funktion von Pflanzen im Zusammenhang mit Bodenstabilisierung und Regulierung des Wasserhaushaltes. Er zeigt auf, wie deren Wirkung gewinnbringend zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen eingesetzt werden kann.

Im Beitrag von Massimiliano Schwarz (BFH HAFL) wird spezifisch auf die Quantifizierung und Implementierung der Wurzelverstärkung in Hangstabilitätsmodellen eingegangen. Anhand einer praxisnahen Anwendung können die Teilnehmenden das Erlernte anwenden.

Roland Wyss (Büro Dr. Roland Wyss GmbH) präsentiert die Untersuchungen zur Verbesserung der Hangmurenbeurteilung, welche in den letzten Jahren durch die Arbeitsgruppe Naturgefahren AGN durchgeführt wurden. Die Methodik zur Dispositionsanalyse wird im Detail anhand eines Testbeispiels erläutert.

Peter Lehmann (ETHZ) geht auf den Einfluss von bodenhydrologischen Prozessen auf die Auslösung von flachgründigen Rutschungen und Hangmuren ein. Er führt uns dabei in das Zusammenspiel und die Verknüpfung von stärkenden und schwächenden Faktoren im Boden ein. Bekanntlich spielt der Eintrag von Wasser aus Niederschlag bei der Auslösung von flachgründigen Rutschungen eine zentrale Rolle.

Elena Leonarduzzi (ETHZ) diskutiert die Vorteile und Limitationen bei der Festlegung von Niederschlagsschwellenwerten, welche sie basierend auf einem einzigartigen Rutschungs- und Niederschlagsdatensatz in der Schweiz abgeleitet hat. Dass die Dokumentation von Ereignissen eine zentrale Rolle bei der Interpretation von Entstehung und Ablauf darstellt, ist uns allen bekannt.

Christian Rickli von der WSL präsentiert die jüngsten Entwicklungen im Zusammenhang mit der sehr umfassenden WSL-Rutschungsdatenbank anhand von beispielhaften Auswertungen zur Geologie, zur Vegetation und zum Auslauf von Hangmuren. Schlussendlich stellen sich basierend auf allen Kenntnissen über Entstehung und Auftreten der besprochenen Naturgefahrenprozesse Fragen bei der Wahl und Bemessung von Massnahmen im Auslaufgebiet. Diese Fragestellungen zu den Einwirkungsgrössen präsentiert uns Thomas Egli (Egli Engineering AG).

Der Kurs soll mit den angebotenen Beiträgen einen gewichtigen Beitrag zum besseren Umgang mit spontanen Rutschungen und Hangmuren vermitteln. Im Praxisteil wird die Methodik der Gefahrenbeurteilung für die beiden Naturgefahrenprozesse erläutert und unter fachkundiger Begleitung von Gabi Hunziker (Hunziker Gefahrenmanagement), Rachel Riner (Geotest AG), Roland Stalder (oeko-B AG), Frank Graf (SLF), Massimiliano Schwarz (BFH HAFL) und Christian Rickli (WSL) angewandt.

Die Vorbereitungsgruppe: Sandro Rittler, Gabi Hunziker, Christian Rickli, Christoph Graf

Inhalt

Spontane Rutschungen und Hangmuren - eine Herausforderung für die Beurteilung und Massnahmenplanung.....	7
Bodenmechanische Aspekte bei flachgründigen Rutschungen	9
Schutz - Wald - Struktur: Einfluss auf flachgründige Rutschungen	16
Quantifizierung und Implementierung der Wurzelverstärkung in Hangstabilitätsmodellen	26
Untersuchungen zur Verbesserung der Hangmurenbeurteilung.....	31
Einfluss bodenhydrologischer Prozesse auf die Auslösung flachgründiger Rutschungen und Hangmuren	41
Niederschlagsschwellenwerte für flachgründige Rutschungen in der Schweiz: Vorteile und Limitationen	44
Dokumentation von spontanen flachgründigen Rutschungen und Hangmuren.....	50
Zentrale Fragestellungen bei der Wahl und Bemessung von Massnahmen gegen Hangmuren im Auslaufgebiet	57

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 geo 7, Sonja Cosandey
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
Sonja Zraggen, Amt für Tiefbau, Kanton Uri
Alexandre Badoux, WSL, Birmensdorf
Martin Frei, MFrei Infra GmbH, Amriswil

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

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

Zielsetzung der FAN

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

Mitgliedschaft bei der FAN

Die Mitglieder der FAN sind Fachleute, welche sich mit Naturgefahren gemäss Zielsetzung der Arbeitsgruppe befassen. Total umfasst die FAN über 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.

Detailprogramm

Donnerstag 24. Oktober 2019

Zeit	Referentin/Referent	Themenblock/Referatstitel
08:45 09:30		Gossau - (Cartransport auf die Schwägalp) Eintreffen der Kursteilnehmer*innen „Säntis - das Hotel“, Schwägalp <i>Begrüssungskaffee</i>
10:00	Christoph Graf	Begrüssung, administrative Hinweise
10:15	Oliver Gerlach	Willkommensworte des Gastgeberkantons Appenzell Ausserrhoden
		Keynote
10:30	Arthur Sandri	Spontane Rutschungen und Hangmuren - eine Herausforderung für die Beurteilung und Massnahmenplanung
11:00	Christoph Graf	Wo brennt's - Erwartungen und Fragen zur Gefahrenbeurteilung von Hangmuren und Spontanrutschungen
		Prozesscharakteristik
11:15	Alexandru Marin	Bodenmechanische Aspekte bei flachgründigen Rutschungen
11:45		<i>Mittagessen</i>
		Wirkung des Waldes
13:00	Frank Graf	Schutz-Wald-Struktur: Einfluss auf flachgründige Rutschungen
13:30	Massimiliano Schwarz	Quantifizierung und Implementierung der Wurzelverstärkung in Hangstabilitätsmodellen
14:00	Massimiliano Schwarz	Praktische Übung im SlideforNET
15:00		<i>Pause</i>
		Disposition und Auslösemechanismen
15:30	Roland Wyss	Geologische Untersuchungen zur Verbesserung der Hangmurenbeurteilung
16:00	Peter Lehmann	Einfluss bodenhydrologischer Prozesse auf die Auslösung flachgründiger Rutschungen und Hangmuren
16:30	Elena Leonarduzzi	Niederschlagsbedingungen für die Auslösung von flachgründigen Rutschungen
17:00	Christian Rickli	Dokumentation von flachgründigen Rutschungen und Hangmuren
17:30		Abschluss des Kurstages <i>Hotelbezug</i>
19:00	Eva Frick	Abendprogramm „Säntis - der Wetterberg“, Ausstellung Vortrag „Ereignisdokumentation Lawineneignis Säntis 2019“ <i>Nachtessen</i>

Freitag 25. Oktober 2019

Zeit	Referentin/Referent	Themenblock/Referatstitel
06:30		<i>Frühstück</i>
07:30		Praxisteil mit Übungen an verschiedenen Posten
	Gabi Hunziker	Gefahrenbeurteilung Auslösegebiet
	Rachel Riner	Gefahrenbeurteilung Wirkungsgebiet
	Roland Stalder	Prävention und Verhalten im Ereignisfall
	Frank Graf Massimiliano Schwarz Christian Rickli	Waldwirkung
12:30		<i>Mittagessen</i>
		Modelle und deren Anforderungen
13:45	Brian McArdell	Rutsch- und Hangauslaufmodellierungen: Überblick und mögliche Probleme
14:15	Thomas Egli	Einwirkungsgrößen und Massnahmenplanung
		Rückblick und Ausblick
14:45	Bernard Loup Stephan Wohlwend	Spontane Rutschungen und Hangmuren: - Rückblick: Wo stehen wir heute? - Ausblick: Wo besteht Handlungsbedarf?
15:40	Christoph Graf	Schlusswort
15:45		Kursende - Cartransport ab Schwägalp - Gossau
16:46		Zugverbindung Richtung Zürich

Persönliche Notizen:

Spontane Rutschungen und Hangmuren - eine Herausforderung für die Beurteilung und Massnahmenplanung

Arthur Sandri ¹ (arthur.sandri@bafu.admin.ch)

¹ BAFU, Sektion Rutschungen, Lawinen und Schutzwald, Bern

Zusammenfassung

Spontane Rutschungen und Hangmuren standen zusammen mit Überschwemmungen am Anfang der Naturgefahrengesetzgebung im neuen Bundesstaat. Während der ersten hundert Jahre war die Sanierung der verrufenen Einzugsgebiete in den Voralpen und Alpen im Vordergrund. Beginnend mit dem Unwetter 1977 im Schächental hat eine ganze Serie von Ereignissen in den letzten 40 Jahren aufgezeigt, dass ein vertieftes Prozessverständnis noch fehlt. Andererseits haben zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten, welche diesen Ereignissen folgten, auch viele neue Erkenntnisse gebracht, welche in die Vollzugshilfe «Schutz vor Massenbewegungsgefahren» Eingang gefunden haben. Es bleiben aber noch wichtige Fragen z.B. zur Regionalisierung von Dispositionsfaktoren und Kriterien zur Bestimmung der Intensität offen.

Historischer Kontext

Mitte des vorletzten Jahrhunderts waren viele der weitgehend entwaldeten Einzugsgebiete der Alpen und Voralpen von zahlreichen Erosionsflächen durchsetzt, welche ihren Ursprung in spontanen Rutschungen und Hangmuren hatten. Die Berichte von Culmann (1864) und Landolt (1862) legen ein beredtes Zeugnis davon ab. Das Hauptproblem bestand darin, dass diese Erosionsflächen unter der fortgesetzten Einwirkung von bewegtem Schnee,

Oberflächenerosion und Nachbrechen der Abrisskanten kaum mehr einwuchsen, sondern sich immer weiter ausdehnten und immer grössere Flächen einnahmen. In den Berichten von Culmann und Landolt wurden diese Erosionsrutschflächen hauptsächlich für die grossen Geschiebefrachten verantwortlich gemacht, welche zusammen mit den gehäuften Starkniederschlägen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts eine ganze Serie von katastrophalen Hochwasserereignissen auslösten und letztlich zu den Anfängen der Wasserbaupolizei- und Forstpolizeigesetzgebung führten. Spontane Rutschungen und Hangmuren standen zusammen mit Überschwemmungen am Anfang der Naturgefahrengesetzgebung im neuen Bundesstaat.

Bis weit in das 20. Jahrhundert stand die Stabilisierung und Wiederbewaldung dieser Erosionsrutschhänge im Vordergrund. Zahlreiche Einzugsgebiets-Sanierungsprojekte gelangten in der ganzen Schweiz zur Ausführung, die mit ihrer Kombination von wasserbaulichen und forstlichen Massnahmen bereits einen integralen Charakter hatten. Die Techniken, die dabei zur Anwendung gelangten, wurden weitgehend von den Franzosen (Restauration des terrains en montagne RTM, Demontzey et al. 1882) übernommen und weiterentwickelt. Unsere Vorfahren haben von 1868 weg während gut hundert Jahren gewaltige Anstrengungen unternommen, um die Folgen von spontanen Rutschungen und Hangmuren zu bewältigen.

Entwicklungen 1977- 2016

Die «Ereignislücke» in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts liess viele – auch Fachleute – glauben, man habe das Problem in den Griff bekommen. Das Unwetterereignis vom 31.7./1.8.1977 mit Schwerpunkt im Schächental, Kanton Uri, hat dann mit vielen grossen und kleinen Hangmuren deutlich gezeigt, dass dem bei Weitem nicht so ist und dass vor allem ein vertieftes Prozessverständnis fehlt. Das Wissen, wie solche Rutschflächen stabilisiert und begrünt werden können, war durchaus noch vorhanden. Nachdem Handarbeit aber mittlerweile sehr teuer geworden war, stand nicht mehr die Sanierung dieser Flächen im Vordergrund, sondern die Frage nach der natürlichen Entwicklung solcher Flächen bzw. die Anwendung maschineller Verbauethoden. Die Ereignisse folgten in rascher Kadenz (Pfingsten 1984 Val Müstair/Vintschgau), Hochwasser 1987 (Val Poschiavo und Zentralschweiz-Berner Oberland-Goms) und führten zu einer ersten wissenschaftlichen Analyse (Ursachenanalyse Hochwasser 1987, Teilprojekt Oberflächenerosion). Die Erkenntnisse, die daraus abgeleitet wurden, wurden z.T. was die Wirkung der Vegetation betrifft, später bestätigt, z.T. was die Bedeutung für die Feststoffproduktion anbelangt, widerlegt. Praktisch gleichzeitig wurde die für die Gefahrenbeurteilung entscheidende Publikation «Berücksichtigung der Massenbewegungs-

«gefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten» 1997 herausgegeben. Damit stand erstmals eine Methode für die Gefahrenbeurteilung zur Verfügung, die Vergleiche zwischen den verschiedenen Massenbewegungsgefahren erlaubte. Die Publikation warf auch zwei neue, entscheidende Fragen auf:

- Was bedeutet «Eintretenswahrscheinlichkeit» für spontane Rutschungen und Hangmuren?
- Wie wird die Intensität der Einwirkungen von spontanen Rutschungen und Hangmuren bestimmt?

Die Publikation enthielt zwar erste Überlegungen dazu, liess die Anwender mit der Beantwortung dieser Fragen aber weitgehend allein. Weitere Ereignisse folgten im Abstand weniger Jahre. Zuerst Sachseln im August 1997, welches eine quantitative Analyse der Vegetationswirkungen brachte (Rickli 2001). Im Sommer 2002 die Hangmuren im Napfgebiet und im Appenzell, welche die Intensitätskriterien in Frage stellten. In Lutzenberg war ein Wohnhaus bei einer Ablagerungsmächtigkeit von weniger als einem halben Meter zerstört worden. Schliesslich das Hochwasser 2005, während dem sich über 5000 Hanginstabilitäten manifestierten und welches zu diversen wissenschaftlichen Abklärungen zum Einfluss der Geologie, zu Niederschlags-Schwellenwerten und zum Potential von Bodenkarten führten.

Offene Fragen

Die weiterhin offenen Fragen veranlassten das BAFU dazu, experimentelle und numerische Grundlagen abzuklären sowie baustatische Rückrechnungen zu veranlassen. Praktisch parallel dazu hat sich die Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren der SFIG mit praktischen Verbesserungen der Hangmurenbeurteilung, insbesondere den geologisch-geotechnischen

Grundlagen befasst. Diese Standards für die Beurteilung des Lockermaterials und Festgesteins fanden Eingang in die Verbesserung der Datengrundlagen; in der öffentlichen Datenbank Hangmuren der WSL stehen gut 750 Einträge für wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung. Eine gezielte Ergänzung bei kommenden Ereignissen ist geplant. Diese Erkenntnisse wurden – soweit möglich – in die Vollzugshilfe «Schutz vor Massenbewegungsgefahren» (BAFU 2016) übernommen. Darin sind neue Kriterien zur Bestimmung der Eintretenswahrscheinlichkeit und Förderfaktoren für die Auslösung beschrieben. Damit kann die Nachvollziehbarkeit von Gefahrenbeurteilungen verbessert und der Erfahrungsaustausch unter Fachleuten gezielt gefördert werden.

Keine Neuerungen enthalten die Kriterien zur Bestimmung der Intensität, weil dafür keine gesicherten Erkenntnisse vorlagen. Wichtige Fragen zur Regionalisierung von Niederschlags-Schwellenwerten, kritischer Hangneigung, geologischen und geotechnischen Einheiten und zum Potential der Oberflächenabflusskarte für hydrologische Detailinformationen bleiben offen. Vor allem nicht geklärt ist die Frage, ob Hangmuren auch dynamische Einwirkungen auf Bauteile zur Folge haben können und welche Kriterien zur Bestimmung der Intensität zielführend wären? Damit bleibt die Beurteilung und Massnahmenplanung von spontanen Rutschungen und Hangmuren eine Herausforderung.

Quellen

Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrat über die Untersuchung der schweiz. Hochgebirgswaldungen, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859 und 1860, Bern 1862 Elias Landolt.

Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrat über die Untersuchung der schweiz.

Wildbäche, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859, 1860 und 1863, Bern 1864 Carl Culmann.

Ursachenanalyse der Hochwasser 1987, Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4, Mai 1991.

Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, Empfehlungen 1997. BRP/BWW/BUWAL 1997.

Vegetationswirkungen und Rutschungen. Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. WSL/BUWAL 2001.

Oberflächennahe Rutschungen, ausgelöst durch die Unwetter vom 15.-16.7.2002 im Napfgebiet und vom 31.8.-1.9.2002 im Gebiet Appenzell. BWG/WSL 2003.

Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. BAFU/WSL 2008.

Numerische und experimentelle Grundlagen für die Berechnung von Hangmuren. Schlussbericht WSL 2001.

Verbesserung der Hangmurenbeurteilung. Arbeitsbericht Phase 1. Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren der SFIG. Frauenfeld/Bern/Horw 2016.

Datenbank Hangmuren. Schlussbericht Phase 1. WSL 2014.

Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. BAFU 2016.

Bodenmechanische Aspekte bei flachgründigen Rutschungen

Dr. Alexandru Marin¹ (alexandru.marin@igt.ethz.ch)

¹ ETH, Institut für Geotechnik, Zürich

Zusammenfassung

Aufgrund der geographischen Bedingungen sind Rutschungen eine der wichtigsten Naturgefahren in der Schweiz. Zahlreiche Infrastrukturobjekte und Siedlungen werden dadurch bedroht und infolgedessen ist der Umgang mit solchen Ereignissen von besonderer Bedeutung. Die Erkennung und Abschätzung der Gefährdung sowie die Planung von Massnahmen können nur auf der Grundlage eines klaren Verständnisses der bodenmechanischen Zusammenhänge solcher Prozesse gelingen. Somit befasst sich dieser Beitrag mit einer kurzgefassten Einführung in die bodenmechanischen Aspekte von Rutschungen. Nach einer allgemeinen Definition von Rutschungen und Hangmuren wird die Problematik der Auslöser und Einflussfaktoren vertieft betrachtet. Anschliessend werden die meist verwendeten Ansätze zur Beurteilung der Hangstabilität erläutert und die Labor- sowie Feldversuche für die Beobachtung von Rutschungen zusammengefasst.

Einleitung

Hangrutschungen stellen weltweit eine erhebliche Gefahr dar. Gemäss der Weltbank (Dilley et al., 2005) leben ca. 300 Millionen Menschen in Gebieten, die dieser Gefahr ausgesetzt sind, und fast ein Viertel davon (ca. 66 Millionen) befinden sich in Hochrisikogebieten (Abb. 1a). In der Schweiz weist ca. 6 – 8% der Gesamtfläche des Landes instabile Hänge auf. Die am meisten gefährdeten Gebiete sind der Alpenraum, die Voralpen zwischen Genfer- und Bodensee sowie Teile des Juras (Abb. 1b). Siedlungen, Verkehrsinfrastruktur sowie Gas- und Stromleitungen sind durch das zunehmende Auftreten solcher Ereignisse stark betroffen.

Um das Risiko und die eventuellen Auswirkungen von Rutschungen abschätzen zu können, ist die Betrachtung solcher Prozesse aus bodenmechanischer Sicht von besonderer Bedeutung. Nur ein klares Verständnis der grundlegenden Aspekte von Rutschungen ermöglicht die Entwicklung von komplexen

Untersuchungs- und Risikoabschätzungsmodellen. In dieser Hinsicht befasst sich dieser Beitrag, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, mit grundlegenden Elementen von Rutschungen wie z.B. Definition, Auslöser und Einflussfaktoren, allgemeine Beurteilung der Stabilität und erforderliche Feld- und Laboruntersuchungen.

Definition der Rutschungen

BAFU (2015) definiert Rutschungen als hangabwärts gerichtete Bewegungen von Hangteilen aus Fest- und/oder Lockergestein auf einer Gleitfläche. Aus dieser Definition wird deutlich, dass die Hauptelemente einer Rutschung die Rutschmasse und die Gleitfläche sind. Wenn die Rutschmasse einen hohen Wassergehalt w aufweist (z.B. $w > w_L$ wobei w_L die Fließgrenze bezeichnet – d.h. das Wassergehalt, bei dem der Boden in einem flüssigen Zustand übergeht) und sich mit einer erhöhten Geschwindigkeit auf der Gleitfläche nach unten bewegt, wird diese als Hangmure bezeichnet. Eine allgemeine Darstellung der

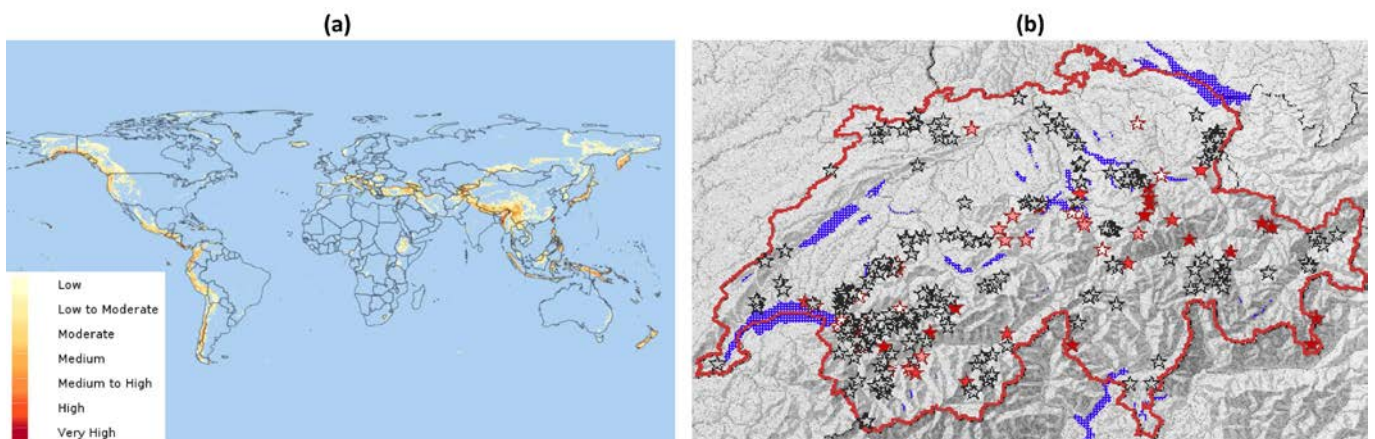


Abbildung 1: (a) Globale und (b) nationale Rutschungsgefährdung (Quelle: Dilley et al., 2005 und BRP et al., 1997).

Hauptelemente von Rutschungen sowie eine typische Erscheinung von Hangmuren können der Abb. 2 entnommen werden. Im Gegensatz zu Murgängen besteht die Rutschmasse bei Hangmuren aus Hangmaterial und die Gleitfläche bildet die Trennfläche zwischen der flüssigen Masse und der Hangoberfläche.

Die in Abb. 2a dargestellten Hauptmerkmale einer Rutschung spielen eine wichtige Rolle bei der frühzeitigen Erkennung eines potentiellen Hangversagens. Die Entwicklung von Zugrissen, Abriss- oder auch Querspalten im Bereich des Böschungskopfs deutet in der Regel darauf hin, dass die Rutschmasse sich in einem extrem labilen Zustand befindet und ein Hangversagen zu erwarten ist. Dies war auch der Fall bei dem spektakulären Hangrutsch aus Otomura, Japan von 2010 (Fujisawa et al., 2010). Nur aufgrund der Früherkennung solcher Merkmale haben die lokalen Behörden und die Autobahnadministration die Auswirkungen dieser Rutschung minimieren können. Das Zerstörungspotential einer Rutschung begrenzt sich nicht nur auf den Bereich der Rutschmasse, sondern ist auch am Rutschungsfuss sehr hoch. Durch ihre extrem langen Auslaufstrecken, die von 10 – 20 m bis über 200 m erreichen können (BAFU & WSL, 2007), verursachen Hangmuren oft grosse Schäden. Abschätzungen der Reichweite und Mächtigkeit von Hangmuren stossen oft an die Grenzen von Berechnungsmodellen und die Resultate müssen zwingend mit gut dokumentierten Fällen verglichen werden.

Die schematische Darstellung der Rutschung aus Abb. 2a kann auch für die mechanische Betrachtung dieses Massenbewegungsprozesses verwendet werden. Die hangabwärts gerichtete Bewegung der Rutschmasse deutet darauf hin, dass die treibenden Kräfte gravitativer Art sind. Die rückhaltenden Kräfte werden entlang der Gleitfläche mobilisiert und haben zwei Komponenten: Kräfte der inneren Reibung und gegebenenfalls kohäsive Kräfte



Abbildung 2: (a) Hauptelemente einer allgemeinen Rutschung (nach USGS, 2004) und (b) typische Erscheinung von Hangmuren (Quelle: Kanton NW, 2005).

zwischen den Bodenkörnern. In diesem Zusammenhang sind Faktoren wie die Verteilung der effektiven und normalen Spannungen, das Wurzelwerk des Bewuchses oder die Entwicklung der Porenwasserdrücke im Bereich der Gleitfläche für den Versagensmechanismus von entscheidender Bedeutung.

Auslöser und Einflussfaktoren

Die Auslöser und Einflussfaktoren von Rutschungen sind mit dem Versagensmechanismus stark verbunden. Einerseits können sie die treibenden und andererseits die rückhaltenden Kräfte, die auf der potentiellen Rutschmasse wirken, beeinflussen. Die Struktur und Art des Bodens, die Vegetation oder das Grundwasser und der Niederschlag haben einen wesentlichen Einfluss auf die mobilisierbare Scherfestigkeit des Bodens. Die Geometrie des Hanges, allfällige Erosionsprozesse oder Geländeänderungen sowie die lokale Seismizität beeinflussen die treibenden Kräfte und können zusätzliche Belastungen auf dem Hang induzieren.

Wie erwähnt, bestimmt die Struktur und Art des Bodens die mobilisierbare Scherfestigkeit und deren Entwicklung mit zunehmenden Verformungen. Allgemein kann die Scherfestigkeit τ_f mithilfe der bekannten Bruchkriterien von Mohr-Coulomb oder Tresca definiert werden. Jedoch wird der Einfluss der Dehnungen erst bei näherer Betrachtung deutlich (Abb. 3). Dicht gelagerte Sande erreichen zuerst aufgrund von Dilatanz einen Maximalwert der Festigkeit τ_{max} und erst bei höheren Dehnun-

gen, wenn konstante Volumen Bedingungen herrschen, den kritischen Wert τ_{cv} . Im Gegensatz dazu wird der kritische Wert τ_{cv} bei locker gelagerten Sanden aufgrund des kontraktanten Verhaltens direkt erreicht. Nebst der Lagerungsdichte spielen auch die vorherrschenden Spannungszustände eine wesentliche Rolle: niedrige Spannungen ermöglichen dilatantes Verhalten wobei höhere Spannungen die Dilatanz verhindern und eventuell zu einer Kornzertrümmerung in der Gleitfläche führen.

Bei tonigen Böden beeinflusst der Überkonsolidierungsgrad den Maximalwert der Scherfestigkeit τ_{max} und bei hohen Dehnungen kann eine Abnahme der Scherfestigkeit bis zum Residualwert τ_{res} auftreten. Dies lässt sich mit der Umlagerung von Tonpartikeln vom ungestörten in den gestörten Zustand, bei welchem sich die Tonpartikel parallel zur Scherfläche ausbilden, erklären. Ein weiterer wesentlicher Faktor, der die Scherfestigkeit in tonigen Böden beeinflussen kann, ist die Plastizität, wie z.B. Skempton (1954, 1957) gezeigt hat.

Die mobilisierbare Scherfestigkeit und damit die rückhaltenden Kräfte, die eine potentielle Rutschung stabilisieren, werden auch durch die Vegetation beeinflusst. Beispielsweise haben Rickli & Graf (2009) nach der Untersuchung von mehr als 500 Rutschungen in der Schweiz festgestellt, dass mit Wald bewachsene Hänge bei höheren Neigungen als Unbewachsene versagen.

Die stabilisierende Wirkung von Vegetation besteht aus zwei Hauptkomponenten: (1) dem Bewehrungseffekt (Waldron, 1977; Wu et al.,

1979; Wu et al., 1988; Wu & Watson, 1998), bei dem das Wurzelwerk wie ein Bewehrungsnetz wirkt und Zugspannungen aufnimmt, die üblicherweise von „unbewehrtem“ Boden nicht aufgenommen werden können; (2) der Erhaltung des teilgesättigten Zustands des Hangmaterials durch Interzeption des Niederschlags im Bereich des Laubdaches (Leung et al., 2015; Ng et al., 2016) und Evapotranspiration des Wurzelwerks (Biddle, 1983; Blight, 2003). Dadurch wird die Sättigung des Bodens verringert und dementsprechend die kapillaren Saugspannungen zwischen Bodenpartikeln und infolgedessen die Scherfestigkeit des Bodens τ_f erhöht. Der Einfluss des Grundwassers und des Niederschlags auf die Scherfestigkeit des Bodens steht in engem Zusammenhang mit den Po-

renwasserdrücken und dem Sättigungsgrad des Bodens. In der Natur ist der Boden meistens teilgesättigt und besteht aus drei Phasen: Körner, Porenwasser und Porenluft. Durch die Oberflächenspannung an den Kontaktflächen Wasser-Luft entstehen im Porenwasser Saugspannungen, die die scheinbare Kohäsion erzeugen (Ho & Fredlund, 1982). Wie Springman et al. (2012) aus ihren Feldversuche in Gruben (VS), Tössegg (ZH) und Rüdlingen (SH) schliessen, verschwinden die Saugspannungen und damit auch die scheinbare Kohäsion, wenn der Boden durch Grundwasserspiegelerhöhungen, Niederschlag oder Schneeschmelze gesättigt wird. Weiterhin kann eine Top-Down oder Bottom-Up Sättigung des Bodens abhängig von der vorhandenen Schichtung und Bodendurchlässigkeit

auftreten. Demzufolge kann die potentielle Gleitfläche aktiviert werden und der Hang versagen (Abb. 4). Dies ist der Hauptauslöser von oberflächennahen Rutschungen und Hangmuren, die während starken Niederschlagsereignissen auftreten. Eine weitere kritische Auswirkung einer Grundwasserspiegelerhöhung auf den Versagensmechanismus ist die Zunahme der Porenwasserdrücke und die dementsprechende Abnahme der effektiven Spannungen. Obwohl der Reibungswinkel oder die effektive Kohäsion des Bodens dadurch nicht markant beeinflusst wird, führt die Abnahme der effektiven Normalspannungen auf der Gleitfläche zu einer Reduktion der rückhaltenden Kräfte. Die Geometrie und Lage des Hanges sowie allfällige Geländeänderungen beeinflussen ebenfalls die treibenden Kräfte, die auf der Rutschmasse wirken. Zusätzlich können Ausbuharbeiten oder Erosionsprozesse destabilisierende Entlastungen im Bereich des Böschungsfusses verursachen (z.B. Gysi, 1999; Sterba et al., 2000).

Zu guter Letzt muss die lokale Seismizität in dieser Zusammenfassung der Faktoren, die Rutschungen beeinflussen oder auslösen können, erwähnt werden. Die Erdbebenanregung und die damit verbundenen Trägheitskräfte wirken durch die Erhöhung der treibenden Kräfte destabilisierend und induzieren permanente Hangverformungen. Solche Verformungen können nicht mit den traditionellen Grenzgleichgewichtsmethoden zur Beurteilung der Hangstabilität, die im nächsten Kapitel kurz beschrieben werden, abgeschätzt werden. Dazu stehen Ansätze zur Verfügung, die auf Erdbebenzeitverläufe basieren, wie z.B. das klassische Verfahren von Newmark (1965) oder die Finite-Elemente-Methoden (FE-Methoden). Zusätzlich kann die Erdbebenanregung durch ihren zyklischen Charakter auch eine Erhöhung der Porenwasserdrücke erzeugen,

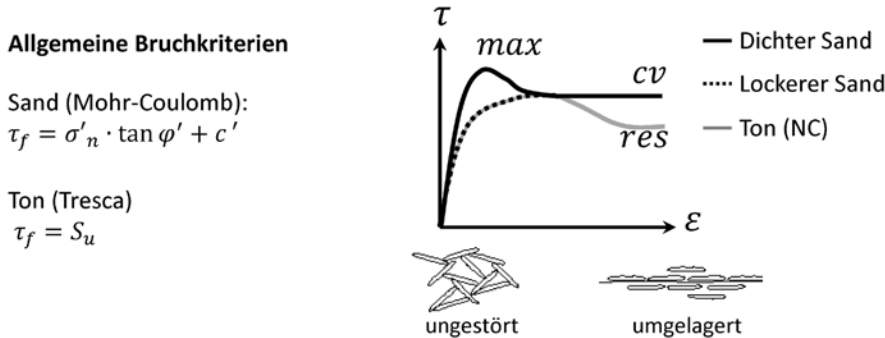


Abbildung 3: Allgemeine Bruchkriterien und effektiv mobilisierbare Scherfestigkeit in sandigen und tonigen Böden in Abhängigkeit der Dehnungen.

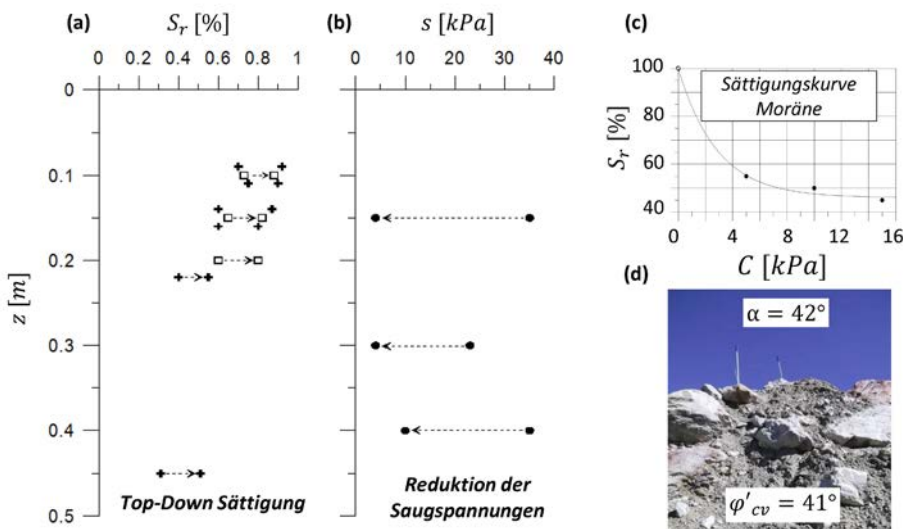


Abbildung 4: Auswirkung des Niederschlags auf die Hangstabilität: (a) Zunahme der Sättigung S_r ; (b) Abnahme der Saugspannungen s ; (c) Aufsättigungskurve aus dem Labor; (d) Versagen des 42° steilen Moränehangs in Gruben (VS) (Quelle: nach Springman et al., 2003).

insbesondere in lockeren, feinkörnigen Böden geringer Durchlässigkeit, die verflüssigungsfähig sind (Sarma, 1975). Diese Erhöhung der Porenwasserdrücke führt zu einer Reduktion der rückhaltenden Kräfte und einer Destabilisierung des Hanges.

Beurteilung der Hangstabilität

Für die Beurteilung der Hangstabilität können üblicherweise zwei unterschiedliche Ansätze verwendet werden: Grenzgleichgewichtsmethoden, die das Gleichgewicht der treibenden und rückhaltenden Kräfte betrachten oder FE-Methoden, die die Verteilung der Spannungen und die Entwicklung der Dehnungen im Hang modellieren.

Grenzgleichgewichtsmethode

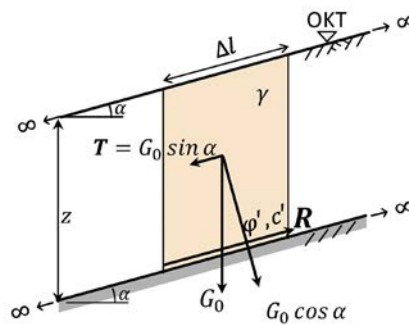
Die Grenzgleichgewichtsmethoden basieren auf einer Unterteilung der Gleitmasse in Lamellen, die auf einer vorbestimmten Gleitfläche abgleiten können. Die Berechnungen erfolgen unter der Annahme eines ebenen Dehnungszustandes. Als Eingabeparameter benötigen diese Methoden die Geometrie des Hanges (z.B. Neigung α), die Lage des Grundwasserspiegels, das Raumgewicht γ sowie die Scherfestigkeitsparameter (effektiver Reibungswinkel φ' und effektive Kohäsion c' oder undrainierte Scherfestigkeit S_u) des Bodens. Für die Beurteilung der Stabilität muss auch mindestens eine Gleitfläche vorgegeben werden. Das Resultat der Beurteilung ist der Sicherheitsfaktor für jede vorgegebene Gleitfläche, wobei die Gleitfläche mit dem tiefsten Sicherheitsfaktor als kritisch bezeichnet wird. Der Ansatz der unendlichen hangparallelen Gleitfläche ist eine der meist verwendeten Grenzgleichgewichtsmethoden. Dabei wird die Rutschmasse als unendlich ausgedehnt und die Gleitfläche als hangparallel angenommen. Gemäss Wu & Sidle (1995), Griffiths et al. (2011) oder Milledge et al. (2012) kann die Stabilität von oberflächennahen Translations-

rutschungen mit langen und wenig mächtigen Rutschmassen anhand dieser Methode mit genügend Genauigkeit beurteilt werden. Da die Gleitfläche hangparallel ist, ist nur die Betrachtung einer einzigen Lamelle der Länge Δl aus der Rutschmasse erforderlich. Abb. 5 zeigt eine schematische Darstellung dieses Ansatzes und die Definition des Sicherheitsfaktors für einen Boden mit drainiertem Verhalten.

Für die Beurteilung der Stabilität allgemeiner Rotationsrutschungen, deren Versagensmechanismus vom hangparallelen Gleiten abweicht, kann beispielsweise der vereinfachte Ansatz von Bishop verwendet werden. Bei dieser Methode wird eine kreisförmige Gleit-

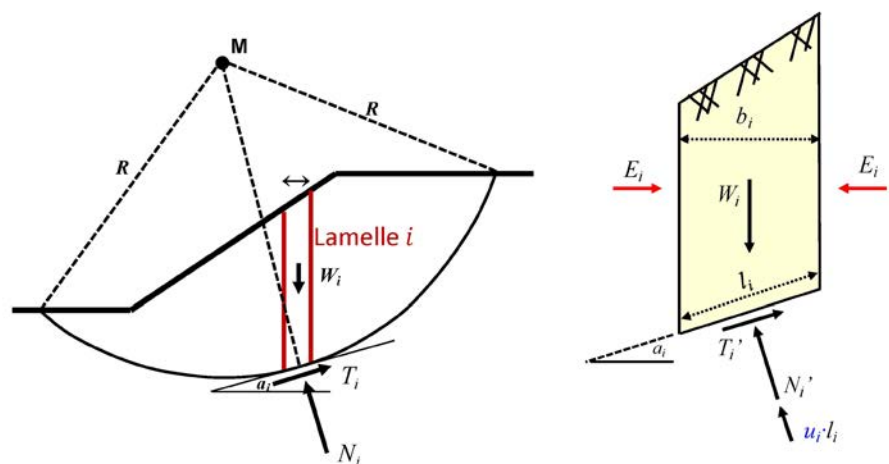
fläche vorgegeben und die Rutschmasse in Lamellen unterteilt. Die Scherkräfte zwischen den Lamellen werden in den Gleichgewichtsgleichungen vernachlässigt. Aus dem Gleichgewicht der Momente um das Zentrum des Kreises, der die Gleitfläche beschreibt, ergibt sich der Sicherheitsfaktor der Böschung iterativ (Abb. 6).

Die Vorteile der Grenzgleichgewichtsmethoden sind die einfachen mechanischen Grundlagen und ihre relativ unkomplizierte Anwendung. Die Erfahrung zahlreicher erfolgreicher Anwendungsfälle hat die Robustheit dieser Methoden nachgewiesen. Jedoch können anhand solcher Analysen keine Aussagen über die Verteilung der Spannungen in einer



$$SF = \frac{R}{T} = \frac{\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \varphi' + c'}{\gamma \cdot z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha}$$

Abbildung 5: Schematische Darstellung des Ansatzes der hangparallelen Gleitfläche und Sicherheitsfaktor SF für einen Boden mit drainiertem Verhalten.



$$SF = \frac{1}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum \left\{ \frac{[c'_i \cdot b_i + W_i \left(1 - \frac{u_i \cdot b_i}{W_i}\right) \tan \varphi'_i] \cdot \sec \alpha_i}{1 + (\tan \alpha_i \cdot \tan \varphi'_i / SF)} \right\}$$

Abbildung 6: Schematische Darstellung des vereinfachten Ansatzes nach Bishop und der daraus entstehende Sicherheitsfaktor SF.

Rutschmasse gemacht werden. Darüber hinaus ist die Lage der Gleitfläche mit grossen Unsicherheiten behaftet, da sich diese als subjektiven Eingabeparameter erweisen kann.

Finite-Elementen-Methoden

Die FE-Methoden basieren auf der Modellierung des Bodenverhaltens (Entwicklung der Dehnungen und der Spannungen) im ganzen Hang anhand realistischer Stoffgesetze. Der untersuchte Hang wird mithilfe von finiten Elementen diskretisiert und dem Gravitationsfeld und allfälligen zusätzlichen Belastungen ausgesetzt. Eine realistische Spannungsverteilung wird generiert und die Entwicklung der Dehnungen nach den verwendeten Stoffgesetzen modelliert.

Die Eingabeparameter schliessen neben der Geometrie die Bodenkennziffern ein, die bei der Anwendung der verschiedenen Stoffgesetze erforderlich sind. Im Gegensatz zu den Grenzgleichgewichtsmethoden beinhalten die Resultate der FE-Methoden den kritischen Versagensmechanismus, die aktuelle Verteilung der Spannungen und Dehnungen sowie den Sicherheitsfaktor, wenn ein Festigkeitsreduktionsverfahren (Dawson et al., 1999; Griffiths & Lane, 1999; Jeremic, 2000) durchgeführt wird.

Die Vorteile solcher Methoden sind die realistische Betrachtung der Verteilung der Spannungen und Dehnungen im ganzen Hang sowie die sich daraus ergebende kritische Gleitfläche, die ein Ergebnis der Analyse ist. Unter Verwendung geeigneter Stoffgesetze können sehr komplexe Mechanismen realitätsnah modelliert werden. In diesem Zusammenhang sollten die Anwender hohes Fachwissen und Erfahrung mit sich bringen, was ein Hauptnachteil der Methode darstellen kann.

Labor- und Feldversuche

Zur Beurteilung und Beobachtung der Hangstabilität sollten geotechnische Labor- und Feldversuche durchgeführt werden. Diese ermöglichen die Abschätzung der Bodenkennziffern, die entweder für die Bestimmung der treibenden und rückhaltenden Kräfte für Grenzgleichgewichtsansätze oder für die Identifizierung und Kalibrierung der Stoffgesetze der FE-Methoden erforderlich sind. Bodenparameter wie Scherfestigkeit, Steifigkeit, Durchlässigkeit, Raumgewicht, Lagerungsdichte usw. können anhand von standardisierten Laborversuchen abgeschätzt werden. Dabei müssen die Abschätzungen mit Ergebnissen geeigneter Feldversuche kontrolliert und gegebenenfalls angepasst werden.

Mögliche Laborversuche für die Bestimmung der Scherfestigkeit sind: Triaxial-, Direktscher- und einfache Scherversuche. Dazu können noch verschiedene Feldversuche angeordnet werden: Drucksondierungen (Cone Penetration Test, CPT oder Standard Penetration Test, SPT), in-situ Scherversuche, Flügelversuche usw. Zur Bestimmung der Steifigkeit, die eine wesentliche Rolle bei der Abschätzung der zu erwartenden Hangverformungen spielt (z.B. via FE-Methoden), kann man die Ergebnisse aus Triaxial- oder Oedometerversuchen verwenden.

Diesbezüglich werden im Feld oft Presiometerversuche oder Drucksondierungen durchgeführt. Die Durchlässigkeit des Bodens lässt sich im Labor mithilfe des Durchlässigkeitsversuchs mit konstanter Druckhöhe und im Feld mit dem Pumpversuch abschätzen.

Von besonderer Bedeutung ist die Beobachtung der Hangstabilität, damit die richtigen Massnahmen im Fall einer Rutschungsauslösung eingeleitet werden können. In diesem Zusammenhang können verschiedene Beobachtungssysteme für die Überwachung des Verhaltens eines Hangs unter unterschiedlichen Bedingungen, wie z.B. saisonale Wettereinflüsse, menschlich induzierten Geländeänderungen, Erdbeben, usw., eingesetzt werden. Eine schematische Darstellung von möglichen Beobachtungssystemen, die vom Institut für Geotechnik (IGT) der ETH Zürich erfolgreich implementiert wurden (Teyssie, 2005; Thielen, 2007; Askarinejad, 2012) ist in Abb. 7 ersichtlich.

Nebst den traditionellen Vermessungsstationen oder photogrammetrischen Methoden können bei der Aufnahme von oberflächigen Hangverformungen d [m] Fernüberwachungssysteme (Satelliten) oder faseroptische Dehnungsmessungssysteme, Extensometer sowie Dehnmessstreifen eingesetzt werden. Für

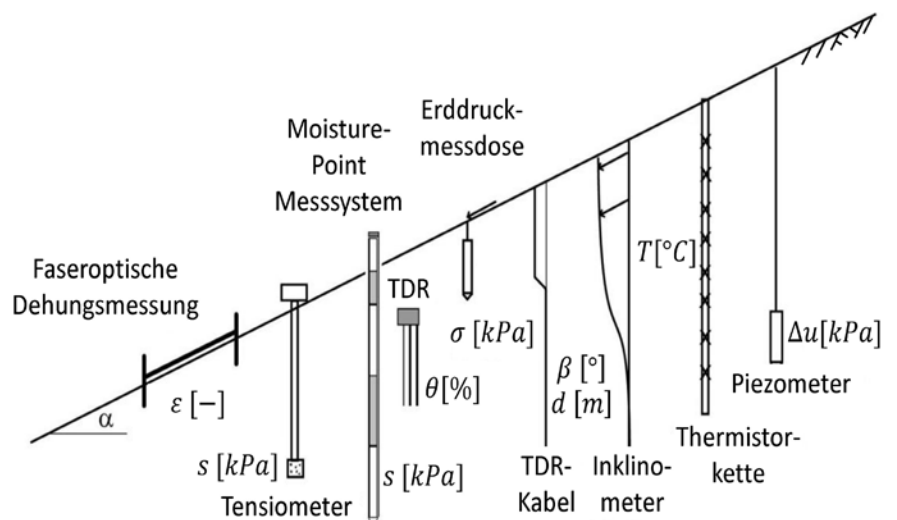


Abbildung 7: Schematische Darstellung von möglichen Systemen zur Beobachtung der Hangstabilität.

Tiefenmessungen der Verformungen oder bei der Identifizierung einer aktiven Gleitflächen können Time-Domain-Reflectometry-Kabel (TDR-Kabel), Inklinometer oder faseroptische Systeme verwendet werden.

Wie in den vorherigen Kapiteln erwähnt, kann die Entwicklung der Porenwasserdrücke und des Wassergehalts für die Hangstabilität entscheidend sein. Für die Beobachtung von Saugspannungen s [kPa] können Tensiometer oder Moisture-Point-Systeme (MP) benutzt werden, wobei die Änderungen der Porenwasserdrücke Δu [kPa] mit Piezometer gemessen werden können. TDR-Sonden werden für die Abschätzung des volumetrischen Wassergehalts θ [%] eingesetzt. Zusätzlich können Thermistorketten und Wetterstationen für die Beobachtung der Bodentemperatur T [°C] und der klimatischen Bedingungen (Lufttemperatur und Feuchtigkeit, Niederschlag, Sonnenstrahlung, Wind, usw.) installiert werden.

Fazit

Der Beitrag gibt einen groben Überblick über Rutschungen und deren bodenmechanischen Aspekte und weist auf die Komplexität dieser Massenbewegungen und deren tiefgreifenden Auswirkungen in der Gesellschaft hin. Aus den zahlreichen unterschiedlichen Auslöser und Einflussfaktoren erweisen sich die hydraulischen Bedingungen, die seismischen Einwirkungen und die menschlichen Tätigkeiten als sehr wichtig. Die Hangstabilität kann mithilfe von Ergebnissen aus Labor- und Feldversuchen sowie mechanisch kompatiblen Ansätzen beurteilt werden. Oft sind geeignete Beobachtungssysteme erforderlich, um bestehende Beurteilungsmodelle zu kalibrieren und negative Auswirkungen in kritischen Situationen zu minimieren.

Quellen

- Askarinejad, A. (2012) Failure mechanisms in unsaturated silty sand slopes triggered by rainfall. ETH Diss. No. 21423, ETH Zurich.
- BAFU & WSL (2007) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Eds. Bezzola, G.R & Hegg, C. Bundesamt für Umwelt Bern, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft Birmensdorf.
- BAFU (2015) Rutschungen - Faktenblätter Gefahrenprozesse. Bundesamt für Umwelt, Abteilung Gefahrenprävention. Bern.
- Biddle, P.G., (1983) Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils. *Géotechnique*, 33: 107–126.
- Blight, G.E. (2003) The vadose zone soil-water balance and transpiration rates of vegetation. *Géotechnique*, 53: 55–64.
- BRP, BWW & BUWAL (1997) Empfehlungen 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Raumplanung BRP, Bundesamt für Wasserwirtschaft BWW, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. Reihe Naturgefahren. Bern.
- Dawson, E.M., Roth, W.H. & Drescher, A. (1999) Slope stability analysis by strength reduction. *Géotechnique*, 49 (6): 835-840.
- Dilley, M., Chen, R.S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A.L., Arnold, M., Agwe, J., Buys, P., Kjekstad, O., Lyon, B. & Yetman, G. (2005) Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. World Bank, Washington, D.C.
- Fujisawa, K., Marcato, G., Nomura, Y. & Pasuto, A. (2010) Management of a typhoon-induced landslide in Otomura (Japan). *Geomorphology*, 124 (3-4): 150-156.
- Griffiths, D. V., Huang, J. & DeWolfe, G.F. (2011) Numerical and analytical observations on long and infinite slopes. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 35: 569–585.
- Griffiths, D.V. & Lane, P.A. (1999) Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, 49 (3): 387-403.
- Gysi, H.J. (1999) Geschichte und Sanierung eines permanenten Einschnittes in einem Kriechhang. Gemeinschaftsveranstaltung Hochschule Rapperswil HRS, Rapperswil, Schulungszentrum TFB, Wildeg, Veranstaltung 4401, Rapperswil.
- Ho, D.G. & Fredlund, D.G. (1982) A multistage triaxial test for unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal*, 5(1): 18-28.
- Jeremi, B. (2000) Finite element methods for 3D slope stability analysis. In: D.V. Griffiths, et al. (Eds.), *Slope stability 2000 – Proceedings of sessions of Geo-denver 2000*, ASCE: 224-239. New York.
- Kanton NW (2005) Hangmurren bei Oberriickenbach (NW). Kantonale Führungsstab Nidwalden.
- Leung, A.K., Garg, A. & Ng, C.W.W. (2015) Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil. *Engineering Geology*, 193: 183–197.

- Milledge, D.G., Griffiths, D. V., Lane, S.N. & Warburton, J. (2012) Limits on the validity of infinite length assumptions for modelling shallow landslides. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37: 1158–1166.
- Newmark, N.M (1965) Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. *Géotechnique*, 15(2): 139-160.
- Ng, C.W.W., Garg, A., Leung, A.K. & Hau, B.C.H. (2016) Relationships between leaf and root area indices and soil suction induced during drying–wetting cycles. *Ecological Engineering*, 91: 113–118.
- Rickli, C., & Graf, F. (2009) Effects of forests on shallow landslides - case studies in Switzerland. *Forest Snow and Landscape Research*, 82(1): 33-44.
- Sarma, S.K. (1975) Seismic stability of earth dams and embankments. *Géotechnique*, 25 (4): 743-761.
- Skempton, A. W. (1954) Discussion: Sensitivity of clays and the c/p ratio in normally consolidated Soils. In: *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Separate 478: 19–22.
- Skempton, A. W. (1957) Discussion on the planning and design of the new Hong Kong airport. In: *Proceedings of the institution of civil engineers* 7: 305-307.
- Springman, S. M., Askarinejad, A., Casini, F., Friedel, S., Kienzler, P., Teysseire, P. & Thielen, A. (2012) Lessons learnt from field tests in some potentially unstable slopes in Switzerland. *Acta Geotechnica Slovenica* 9(1): 6–29.
- Springman, S.M., Jommi, C. & Teysseire, P. (2003) Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history. *Géotechnique*, 53(1): 3-10.
- Sterba, I., Lang, H.-J. & Amann, P. (2000) The Brattas Landslide in St. Moritz. *International Symposium of the International Society of Rock Mechanics and Rock Engineering*, Melbourne, Australia.
- Teysseire, P. (2005) *Geotechnische Eigenschaften von Moränen*. ETH-Diss. No. 16322, ETH Zurich.
- Thielen, A. (2007) *Einfluss der Bodensättigung auf die Stabilität von Hängen*. ETH Diss. No. 17303, ETH Zurich.
- USGS (2004) *Landslide Types and Processes*. Factsheet 2004-3072 of the US Geological Survey.
- Waldron, L.J. (1977) The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41: 843-849.
- Wu, T.H. & Watson, A. (1998) In situ shear tests of soil blocks with roots. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(4): 579-590.
- Wu, T.H., Mckinnel, W.P. & Swanston, D.N. (1979) Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 16: 19-33.
- Wu, T.H., McOmber, R.M., Erb, R.T. & Beal, P.E. (1988) Study of Soil-Root Interaction. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 114: 1351-1375.
- Wu, W. & Sidle, R.C. (1995) A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins. *Water Resources Research*, 31: 2097–2110.
- Yildiz, A. (2018) *Quantification of Biological Effects on Soil Stability*. ETH Diss. No. 25328. ETH Zurich.

Schutz – Wald – Struktur: Einfluss auf flachgründige Rutschungen

Frank Graf¹ (graf@slf.ch)
 Alexander Bast¹ (alexander.bast@slf.ch)
 Christian Rickli² (christian.rickli@wsl.ch)
 Peter Bebi¹ (bebi@slf.ch)

¹ WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, 7260 Davos Dorf
² Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 8903 Birmensdorf

Zusammenfassung

Pflanzen übernehmen wichtige Funktionen in der Bodenstabilisierung sowie zur Regulierung des Wasserhaushalts und erhöhen so auch die Wasserspeicherkapazität, welche für die Verhinderung flachgründiger Rutschungen entscheidend ist. Ein 3-Stufen-Filter und eine Multi Faktor Analyse, mit Aspekten der Bodenmechanik, Vegetation und Topographie, konnten von über 200 Rutschungen mehr als 90% erklären. Scherparameter, Wassergehalt und Porenziffer nehmen grossen Einfluss und sind wiederum mit der Waldstruktur gekoppelt. Hinsichtlich der Verhinderung flachgründiger Rutschungen erhöht eine gute Waldstruktur nicht nur die Bodenstabilität, sondern beeinflusst auch den Bodenwasserhaushalt positiv. Diesbezüglich «optimale» Wälder weisen eine hohe 3^D-Diversität auf: ober- und unterirdische Vielfalt an Arten, Alter, horizontaler und vertikaler Struktur sowie Durchwurzelung und Wurzelarchitektur in unterschiedlichen Sukzessions- und Entwicklungsstufen.

Einleitung

In den letzten Jahren verursachten flachgründige Rutschungen nicht selten grossen Schaden, im Wert von über Fr. 100 Millionen durch einzelne Unwetter, und haben auch Menschenleben gefordert (Bezzola & Hegg 2007, 2008).

Die Verbesserung bestehender sowie die Errichtung neuer Schutzmassnahmen ist unbe-

stritten und wird aufgrund der Klimaveränderung in Zukunft immer wichtiger. In diesem Rahmen spielt die Vegetation allgemein und der Wald im Speziellen eine tragende Rolle. Die Schutzfunktionen intakter Waldbestände zur Verhinderung flachgründiger Rutschungen sind seit alters her bekannt und Grundlagen sowie Empfehlungen zur Pflege von Schutzwäldern gut dokumentiert, wie beispielsweise in der Wegleitung «Nachhaltigkeit im Schutzwald, NaiS» (Frehner et al. 2005).

Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere die Struktur des Waldes und deren massgebliche Auswirkung auf stabilitätsrelevante Pflanzenfunktionen sowie das Bodengefüge das Schutzpotential vor flachgründigen Rutschungen entscheidend beeinflussen können. Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 68 (www.nfp68.ch/de) konnte mit dem Projekt SOSTANAH¹ gezeigt werden, dass gut gepflegte und strukturierte Wälder besser vor flachgründigen Rutschungen schützen (Moos et al. 2016, Graf et al. 2017, Bebi et al. im Druck). Als Basis für die Untersuchungen diente unter anderem der Bestandescode, welcher die vier Parameter Deckungsgrad, Entwicklungsstufe, Schichtung und Mischung beinhaltet und in der Praxis zur Beschreibung des Waldzustandes verwendet wird.

Nicht unterwartet waren und sind grossflächige Entwaldungen sowie die Vernachlässigung der Waldpflege vielerorts Hauptursache

von erheblichen Schadenereignissen (Landolt 1862, Kaiser 1967, Rickli 2001, Bezzola & Hegg 2007, 2008).

Interzeption, (Evapo-) Transpiration, hydraulische Konduktivität, Wasserspeichervermögen sowie die Bodenarmierung und –aggregation zählen zu den entscheidenden Pflanzenfunktionen, welche zur Boden- und Hangstabilität beitragen und mit den Parametern des Bestandescodes, respektive der Waldstruktur erfasst werden (Graf et al. 2017, 2019). Pflanzen beeinflussen einerseits als Individuen und andererseits im Verbund als Vegetationsdecke unterschiedliche Prozesse, welche zur Erhöhung der Hangstabilität beitragen. Neben der Bodenentwässerung und Regulierung des Wasserhaushalts durch Interzeption und Evapo-Transpiration mit den entsprechenden Auswirkungen auf das Wasserspeichervermögen, sind sie auch an der Bildung stabiler Bodenaggregate beteiligt und nehmen damit Einfluss auf die Bodenstruktur. Pflanzen tragen zudem zur mechanischen Stabilisierung von Bodenmaterial im Rahmen der Wurzelverstärkung bei (Schwarz et al. 2012). Mit dem Eintrag von organischem Material kurbeln sie den Nährstoffkreislauf an und fördern dadurch Sukzession und Diversität.

Nachfolgend werden die i) bodenstabilisierenden Pflanzen-Funktionen kurz vorgestellt, ii) Resultate der Anwendung eines sogenannten 3-Stufen-Filters für die retrospektive Analyse flachgründiger Rutschungen und statistische

¹ www.nfp68.ch/de/projekte/themenschwerpunkt-4-bodeninformation-und-steuerung/bodenstabilitaet

Auswertungen mittels einer Multi Faktor Analyse (MFA) präsentiert sowie iii) erste Ergebnisse einer Studie zu Waldstruktur und Bodenwasserhaushalt vorgestellt.

Boden stabilisierende Pflanzenfunktionen

Das Zurückhalten von Niederschlag durch das Kronendach eines Waldes beträgt zwischen 10 und 40% (Hörmann et al. 1996). Allerdings können diese Werte räumlich stark variieren und sind abhängig von der Intensität des Regenereignisses, der Waldgesellschaft und Waldstruktur. Die Interzeption von Nadelwäldern ist generell höher als jene von Laubbeständen (Loshali & Sing 1992, Liu 1997, Park 2000, Price & Carlyle-Moses 2003, Deguchi et al. 2006). Das Interzeptionspotential ist positiv mit der Blatt-/Nadelfläche korreliert (Astton 1979) und dadurch mit der Sukzession der Pflanzengesellschaften gekoppelt.

Die Transpiration wird neben abiotischen (z.B.: Strahlung, Feuchtigkeit, Temperatur, Wind, ...) insbesondere durch biotische Faktoren (z.B.: Artenzusammensetzung, Entwicklungsstand, Deckungsgrad, ...) beeinflusst und ist entsprechend mit der Waldstruktur verknüpft. Es existiert eine positive Beziehung zwischen der transportierten Wassermenge und der Biomasse, widerspiegelt durch Wurzeln und Spross. Die reine Bodenverdunstung (Evaporation) nimmt zwar mit zunehmendem Deckungsgrad ab, wird jedoch vermehrt durch die Interzeptionsverdunstung abgelöst.

Ein weiterer von der Biomasse und damit von der Waldstruktur abhängiger Prozess ist die hydraulische Konduktivität. Dabei wird Wasser von feuchteren, meist tiefer gelegenen Bodenregionen, zu solchen in trockeneren, meist oberflächennahen Bereichen verlagert. Dort gewährleistet die entsprechende Erhöhung der Bodenfeuchtigkeit einerseits die Funktionalität von Feinwurzeln und Mikroorganismen, insbesondere während Trockenperioden. An-

dererseits dient dieser Feuchtigkeitspuffer als zusätzliche Quelle für die Transpiration. Die Verfügbarkeit wasserlöslicher Nährstoffe wird dadurch ebenfalls erhöht und damit einhergehend auch das Wachstum und Überleben der Pflanzen sowie assoziierter Organismen, wie beispielsweise der Mykorrhizapilze (Querejeta et al. 2008, Bauerle et al. 2008).

Mit fortschreitender Sukzession verstärkt sich die positive Rückkopplung zwischen diesen sich ergänzenden Prozessen und steigert so die Effizienz der Bodenentwässerung. Auf bewachsenem Boden ist die gesamte Verdunstung nach einem Niederschlag aufgrund der Interzeptionsverdunstung relativ hoch, während Trockenphasen aufgrund der gehemmten Bodenverdunstung gering. Die oberirdische Biomasse übernimmt zusammen mit der Streuschicht somit eine zusätzliche Pufferfunktion für die Bodenfeuchtigkeit (Gigon 1975).

Neben Bodeneigenschaften wie Gesamtporosität und Bodenart (Anteile Sand, Schluff und Ton), bestimmen hauptsächlich die Wurzeln das Wasserspeichervermögen vegetationsbedeckter Böden. In Abhängigkeit der Wurzelmorphologie erhöht sich das Wasserspeicherpotential mit der Zunahme der Durchwurzelungsdichte (Bader 2014, Ng et al. 2015). Mit zunehmendem Fassungsvermögen des Bodens wiederum sinkt die Wahrscheinlichkeit der Sättigung über eine kritische Schwelle während eines Unwetters und damit die Auslösung flachgründiger Rutschungen.

Biomasse und insbesondere Wurzeln haben aber nicht nur einen bedeutenden Einfluss auf die Hydrologie, sondern auch auf die mechanische Stabilisierung des Bodens. Mit zunehmender Durchwurzelung werden die Bodenstruktur verändert und potentielle Gleitebenen durchwachsen. Die größeren Wurzeln ($\phi \geq 2\text{mm}$) bewirken dabei einen zusätzlichen Armierungseffekt – häufig als Wurzelverstärkung bezeichnet (Schwarz et al. 2012). Vorab

durch die Feinwurzeln ($\phi < 2\text{mm}$) sowie das grossräumige und feinverzweigte Hyphennetzwerk assoziierter Pilzpartner (Mykorrhiza) werden Bodenaggregate geformt und verfestigt und so eine nachhaltig stabile Bodenmatrix und Porenstruktur aufgebaut. Dabei fördert eine hohe Diversität an Pflanzen, namentlich der Wurzelmorphologie, und entsprechend der Pilzpartner die Stabilität des Bodengefüges (Pohl et al. 2009, 2014, Ghestem et al. 2014, Graf et al. 2017, 2019). Dies ist wiederum eine wesentliche Voraussetzung für eine ausreichende Rückhaltekapazität von Wasser und Nährstoffen und somit für Pflanzenwachstum und -entwicklung (Graf et al. 2019).

In der Kombination tragen diese Wurzelwirkungen durch die hydrologischen, mechanischen und strukturellen Veränderungen im Boden nachhaltig zur oberflächennahen Stabilisierung von Hängen bei und dadurch zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen.

Retrospektive Analyse flachgründiger Rutschungen (3-Stufen-Filter)

Nach wie vor fehlt eine zuverlässige Methode zur Erfassung von Waldwirkungen gegen flachgründige Rutschungen mit einfach zu erhebenden Parametern, welche es erlaubt verlässliche Vorhersagen für die Rutschungswahrscheinlichkeit zu treffen. Für ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen Waldstruktur und der Auslösung flachgründiger Rutschungen wurden deshalb im Rahmen des NFP 68 Projekts SOSTANAH 218 Rutschungen, welche während den Unwettern 1997 (Sachseln), 2002 (Napf, Appenzell) und 2005 (Entlebuch, Napf, Prättigau) im Waldgebiet ausgelöst wurden, retrospektiv analysiert. Mit Hilfe eines 3-Stufen-Filters konnten über 95% der Ereignisse erklärt werden. Der Filter berücksichtigt Aspekte der Bodenmechanik (Scherparameter, Hangneigung, Grenzgleichgewichtsmethode), Vegetation (NaiS, Bestan-

descode, Lückenlänge nach Moos et al. 2016) und Topographie (Geländeformen nach Rickli et al. 2008). Mit dem bodenmechanischen Kriterium konnten nahezu 50%, mit jenem der Vegetation weitere 40% und mit der Topographie zusätzlich 7% der Ereignisse erklärt werden (Graf et al. 2017). Die Grenzwerte für die verschiedenen Kriterien waren:

Grenzgleichgewichtsmethode

Hangneigung α nicht mehr als 5° steiler als der Reibungswinkel Φ' (Grenzgleichgewichtsmethode; Graf et al. 2009, Yildiz et al. 2015)

Topographie

Geländeform (Falllinien-Horizontal-Profil) ist nicht konvex-flach, flach-konkav oder konvex-konkav (Rickli et al. 2008)

Vegetation (Wald)

- Mehrschichtige Bestände; gute Abstufung von Baumhöhe und -alter
- Gesamtdeckungsgrad (gesamte Vegetation) > 60%; Kronendeckung (Bäume > 3m) > 40%; nachfolgend wird die Kronendeckung als Deckungsgrad bezeichnet
- Nadelholzanteil < 80%
- Möglichst artenreiche Bestände in Entwicklungsstufen Stangen- oder Baumholz

Die Informationen zu den verwendeten Parametern stammen aus der WSL Rutschungsdatenbank², in welcher mehr als 700 Ereignisse ausführlich dokumentiert sind. Die Charakterisierung der Vegetation, respektive der betroffenen Waldbestände, basiert auf dem Bestandescode (Tab. 1), welcher in Rickli et al. (2008) beschrieben ist.

Im Rahmen der Abgrenzung von Waldstruktur-Typen für einen «optimalen» Schutz vor flachgründigen Rutschungen nach NaiS (Frehner et al. 2005), Rickli (2001), Rickli et al. (2008) und den Ergebnissen aus dem NFP 68 Projekt «SOSTANAH» (Graf et al. 2017) ist zu beachten, dass die Kronendeckung (nachfolgend

als Deckungsgrad bezeichnet) allgemein von der Höhenlage beeinflusst wird. So kann in der subalpinen Stufe auch ein minimaler Deckungsgrad von > 40% ausreichend sein, falls der Gesamtdeckungsgrad (gesamte Vegetation) > 80% ist. Ein sehr hoher Deckungsgrad (> 80%), kann sich insofern negativ auf den Schutz vor flachgründigen Rutschungen auswirken, falls er im Zusammenhang mit einschichtigen, gedrängten Beständen steht, was insbesondere die natürliche Verjüngung (Bebi et al. 2012) und den Bodenwasserhaushalt beeinträchtigt (siehe Abschnitt «Waldstruktur und Bodenwasserhaushalt»). Zudem können aus unserer Perspektive zum aktuellen Zeitpunkt im Zusammenhang mit der Entwicklungsstufe «Jungwuchs» noch keine wissenschaftlich standhaften Resultate präsentiert werden.

In Anlehnung an BUWAL (1996) wurden neben dem Bestandescode im Rahmen der Untersuchungen des Unwetters von Sachseln 1997 drei Waldzustandskategorien definiert Rickli (2001), mit vereinfachten Abgrenzungskriterien zur Unterscheidung von «gutem» (W1), «mässigem» (W2) und «schlechtem» (W3) Waldzustand. Dementsprechend sind in einem «guten» Wald wenig Bestandeslücken sowie die Baumarten und das Bestandesgefüge standortgemäss, wohingegen in einem «mä-

ssigen» Wald einige Bestandeslücken vorhanden sowie Baumarten und Bestandesgefüge nicht standortgemäss sind. Mit «schlechtem» Waldzustand werden ehemalige Schadenflächen und aufgelöste Bestände bezeichnet.

Basierend auf der Bodenklassifikation gemäss USCS (SN670010b 2011) wurden im Hinblick auf das Versagen drei Bodentypen mit Bodenmaterial unterschieden, welches vorwiegend durch i) Reibung (R), ii) Saugspannung (S) oder eine iii) Kombination (K) von beiden stabilisiert wird (siehe Tab. 4).

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Anwendung des 3-Stufen-Filters wurden zudem die Kriterien und Grenzwerte für einen «optimalen» Wald zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen angepasst, wobei insbesondere die Waldzustandskategorien (W1 – W3) miteinbezogen wurden. Diese erlauben es, zumindest bis zu einem gewissen Grad, auch die Vorgeschichte des Waldes zu integrieren und namentlich Störungen wie Windwurf, Kalamitäten durch Borkenkäfer oder Pilze aber auch Schäden durch Lawinen und andere Naturgefahren zu berücksichtigen. Es hat sich deutlich gezeigt, dass die Störungsgeschichte im Hinblick auf die Auslösung von flachgründigen Rutschungen einen beträchtlichen Einfluss auf

*Tabelle 1: Bestandescode-Parameter mit den verschiedenen Stufen nach Rickli et al. (2008).
Grau: Unbestockte Flächen, in den (statistischen) Auswertungen nicht berücksichtigt
Orange: Stufen für «optimalen» Schutz vor flachgründigen Rutschungen gemäss NaiS (Frehner et al. 2005), Rickli (2001) Rickli et al. (2008) und «SOSTANAH» (Graf et al. 2017)
Blau: In Abhängigkeit der Höhenlage und Schichtung (siehe vorhergehenden Text)
Violett: Ungenügende Angaben; in den (statistischen) Auswertungen nicht berücksichtigt*

Schichtung		Entwicklungsstufe	
0xxx	unbestockt	x0xx	unbestockt
1xxx	einschichtig	x1xx	Jungwuchs / Dichtung
2xxx	mehrschichtig	x2xx	Stangenholz
3xxx	gut strukturiert	x3xx	Baumholz I (BHD 20-35)
		x4xx	Baumholz II (BHD 35-50)
		x5xx	Baumholz III BHD >50)
		x6xx	gut strukturierter Bestand
Mischung		Deckungsgrad (DG; Kronendeckung)	
xx0x	unbestockt	xxx0	unbestockt
xx1x	> 80% Nadelholz	xxx1	gedrängt (DG = 90%)
xx2x	Mischbestand	xxx2	normal (DG = 80%)
xx3x	> 80% Laubholz	xxx3	locker (DG = 60%)
		xxx4	lückig (DG = 40%)
		xxx5	aufgelöst (DG = 20%)

² <https://hangmuren.wsl.ch/login.html> ; Rickli et al. im Druck

die Schutzwirkung von Waldbeständen ausübt (Bebi et al. im Druck).

Somit fließt im angepassten und empfohlenen Kriterienkatalog für einen «optimalen» Schutzwald der Waldzustand mit W1 ein und die Grenzwerte für die «Entwicklungsstufe» beinhalten Stangenholz und ältere Bestände, für die «Mischung» einen Nadelholzanteil

< 80%, für die «Schichtung» mehrschichtige oder stufige Bestände sowie für den «Deckungsgrad» in Abhängigkeit der Höhenstufe und Schichtung Werte von mehr als (40%) 60% und weniger als 80% (90%).

Fallbeispiel «Sachseln 1997»

Von den untersuchten Rutschungen, welche während des Unwetters in Sachseln 1997 im Wald ausgelöst wurden, standen für 107 Ereignisse alle Kriterien und Grenzwerte des erweiterten und angepassten Kriterienkatalogs zur Verfügung. Die retrospektive Analyse mit dem entsprechend ergänzten 3-Stufen-Filter hat gezeigt, dass nur in sieben Fällen eine Rutschung ausgelöst wurde, obwohl alle Kriterien ausnahmslos erfüllt waren (Tab. 2). Interessant ist dabei die Tatsache, dass diese sieben Rutschungen alle an Hängen von 40° oder steiler auftraten und die Differenz zwischen Hangneigungs- und Reibungswinkel zwischen 7° und 17° Grad variierte, womit das 5°-Kriterium teilweise deutlich überschritten wurde (Graf et al. 2009).

Auf die sehr vereinfachende Annahme von Normalverteilung für Hangneigungs- (α) und Reibungswinkel (Φ') der sieben Ereignisse gestützt und einem Schwellenwert für die Eintretenswahrscheinlichkeit einer Rutschung von $\leq 1\%$, ergibt sich ein Grenzwert für die Hangneigung von $\alpha \approx 38^\circ$, was in etwa dem Mittelwert der Hangneigung der restlichen 100 Rutschungen entspricht. Unter diesen Voraussetzungen kann spekuliert werden, dass Hänge mit «optimalen» Waldbeständen bis zu einer Hangneigung von $\alpha = 38^\circ$ einem

Unwetter wie jenem von Sachseln (1997) standhalten, unabhängig vom betroffenen Bodenmaterial und somit vom Reibungswinkel Φ' . Für den Fall «Sachseln 1997» lassen daraus abgeleitete Resultate vermuten, dass

Tabelle 2: Hangrutschungen mit «optimalem» Schutzwald mit Angaben zu Meereshöhe, Hangneigungs- (α) und Reibungswinkel (Φ'), Bodenklassifikation (USCS), Bodentyp (B-Typ, S: Saugspannung; K, Kombination Saugspannung / Reibung; Tab. 4), Zustand (W1: guter Waldzustand) sowie den Parametern des Bestandescode (Entwicklungsstufe, Mischung, Deckungsgrad, Schichtung). Orange: empfohlene Bedingungen erfüllt (+); Stufen gemäss Tab. 1 Blau: Deckungsgrad >80%; erfüllt in Abhängigkeit der Höhenlage und Schichtung (\pm , siehe Tab. 1)

m.ü.M [m]	α [°]	Φ' [°]	USCS [-]	B-Typ [-]	Zustand [-]	Entwicklungsstufe [-]	Mischung [-]	Deckungsgrad [-]	Schichtung [-]
750	44	27.0	OL	S	W1	+	+	+	+
860	40	33.0	GC-GM	K	W1	+	+	+	+
900	40	32.7	CL-ML	S	W1	+	+	±	+
980	43	33.0	GC-GM	K	W1	+	+	±	+
990	42	27.0	OL	S	W1	+	+	±	+
990	43	27.0	OL	S	W1	+	+	±	+
1220	41	27.0	OL	S	W1	+	+	+	+

solche Wälder mehr als $\frac{1}{5}$ der Rutschungen verhindert hätten (Graf & Grunder 2017).

Nach einer Kostenschätzung für die Erreichung, respektive die dauernde Erhaltung des «optimalen» Waldzustandes während einer Baumgeneration (120 Jahre) belaufen sich die Investitionen im Fall «Sachseln 1997» auf ca. 10% der damaligen Schadenssumme von ca. Fr. 120 Mio. Werden die Maximalansätze nach dem «Handbuch NFA im Umweltbereich» (BAFU 2008) zugrunde gelegt, sind es ca. 25% (Graf et al. 2017).

Multi Faktor Analyse (MFA)

Im Hinblick auf das Verständnis des komplexen Zusammenspiels zwischen meteorologischen, geographischen, biologischen, bodenphysikalischen, geotechnischen und hydrologischen Eigenschaften im Zusammenhang mit der Auslösung flachgründiger Rutschungen und dem Schutzpotential von Waldbeständen wurde eine multivariate statistische Auswertung durchgeführt. Mit einer Multi Faktor Analyse (MFA, Husson et al. 2017), welche die Gruppenstruktur mit numerischen und kategorialen Variablen berücksichtigt, konnten durch

die ersten beiden Dimensionen 46.5% (Dim1), respektive 21.7% (Dim2) der Varianz erklärt werden. Insgesamt beläuft sich der Anteil erklärter Varianz für die ersten beiden Dimensionen (Hauptkomponenten) auf 68.2%, für die

ersten vier auf 92.3% (Abb. 1; n=207). Damit wird mit vergleichbarem Datensatz ein ähnlich hohes Niveau erreicht wie bei der retrospektiven Analyse mit dem 3-Stufen-Filter (n=218). Für die Analyse der Resultate wurden in der Gruppe der numerischen Variablen die Höhenlage und Hangneigung α sowie Wassergehalt, Porenziffer, Reibungswinkel Φ' , Kohäsion c' und Feinanteil (Tab. 3), in jener der kategorialen Variablen Bodentyp, Region, Unwetterereignis sowie die Faktoren des Bestandescodes (Entwicklungsstufe, Deckungsgrad, Schichtung und Mischung) berücksichtigt (Tab. 4).

Die Multi Faktor Analyse der 207 flachgründigen Rutschungen bringt den Einfluss der Bodenparameter unmissverständlich zum Vorschein. In der Summe tragen die berücksichtigten geotechnischen Faktoren bezüglich der ersten Hauptkomponente (Dim1) mit über 98% zur insgesamt erklärten Varianz von 46.5% bei. Dabei dominieren namentlich Wassergehalt, Porenziffer und Feinanteil, mit positiver sowie der Reibungswinkel Φ' mit negativer Korrelation. Bezüglich der zweiten Hauptkomponente (Dim2) sind es die Höhenlage mit gut 36% und negativ sowie die Kohä-

sion c' mit knapp 41% und positiv korreliert, die den Hauptanteil zur erklärten Streuung von total 21.7% beisteuern. Abgesehen vom Reibungswinkel Φ' sind auch alle anderen geotechnischen Parameter in Dim2 signifikant, wobei der Feinanteil mit über 10% dominiert und negativ korreliert ist. Mit knapp 8% nimmt die Hangneigung α ebenfalls signifikant Einfluss (Tab. 3).

Was die kategoriellen Variablen betrifft, weist der Bodentyp bezüglich der ersten Hauptkomponente (Dim1) die höchste Korrelation auf. Zudem nehmen auch Region und Unwetterereignis sowie seitens des Bestandescodes der Faktor «Entwicklungsstufe» einen signifikanten Einfluss. Mit der zweiten und dritten Hauptkomponente (Dim2, Dim3) sind Region und Unwetterereignis gut korreliert, erstere auch mit der vierten Hauptkomponente (Dim4), und der Bodentyp zeigt auch in Dim3 einen signifikanten Einfluss. Was den Bestandescode betrifft, weisen «Deckungsgrad» und «Schichtung» in Dim2 sowie «Mischung» in Dim4 Signifikanz auf (Tab. 4).

Mit Hilfe der MFA tritt der Einfluss von Boden- und Waldstrukturparametern im Zusammenhang mit flachgründigen Rutschungen eindrücklich zu Tage. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass die aktuellen Definitionen für die vier Parameter der Waldstruktur im Hinblick auf die Charakterisierung von Waldbeständen mit «optimaler» Schutzwirkung gegen flachgründige Rutschungen nicht zwingend «in Stein gemeißelt» sind. In einem ersten Schritt sollten zumindest die Anzahl der Faktorstufen und entsprechend deren Grenzwerte überdacht und mit multiplen statistischen Analysen überprüft werden.

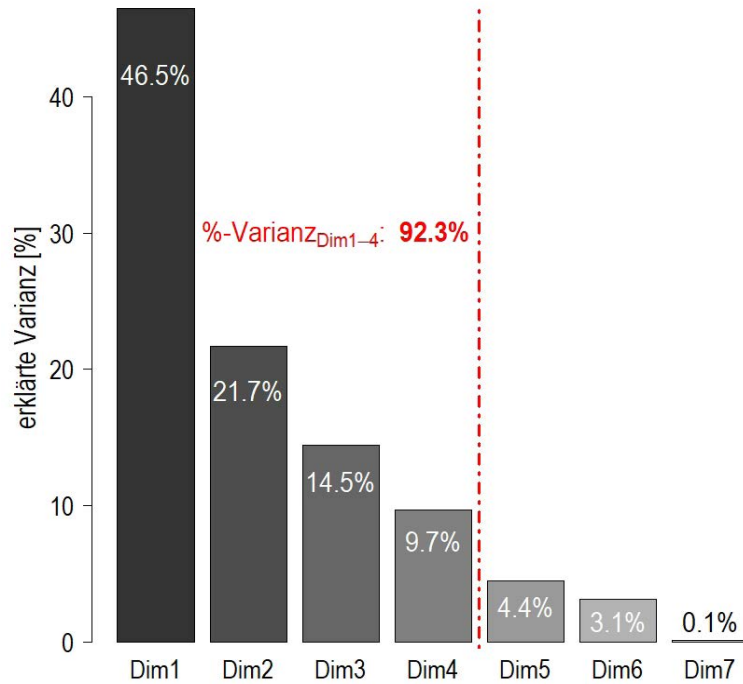


Abbildung 1: Erklärte Varianz durch die sieben berücksichtigten Dimensionen (Dim1-7) der Multi Faktor Analyse.

Tabelle 3: Signifikante numerische Variablen der Multi Faktor Analyse mit erklärter Varianz, Korrelation und p-Wert für die ersten beiden Dimensionen (Dim1, Dim2). Die jeweiligen Werte der erklärten Varianz der einzelnen Variablen addieren sich auf 100% und repräsentieren 46.5% für Dim1, respektive 21.7% für Dim2. Die einflussreichsten Werte für erklärte Varianz [%var] und Korrelation [0,1] sind grau hinterlegt.

	Dim1 [%var] 46.5	Korrelation [0,1]	p-Wert [0,1]	Dim2 [%var] 21.7	Korrelation [0,1]	p-Wert [0,1]
Höhe [m ü M]	1.58	0.23	1.0 e ⁻⁰³	36.40	-0.74	19.7 e ⁻³⁸
Hangneigung α [°]	0.01	---	---	7.65	0.34	4.9 e ⁻⁰⁷
Wassergehalt w [%]	27.87	0.95	7.1 e ⁻¹⁰⁸	2.21	0.18	8.2 e ⁻⁰³
Porenziffer e_0 [-]	26.53	0.93	1.3 e ⁻⁹⁰	2.75	0.20	3.2 e ⁻⁰³
Reibungswinkel Φ' [°]	23.52	-0.88	1.5 e ⁻⁶⁶	0.09	---	---
Kohäsion c' [kN·m ⁻²]	0.45	---	---	40.74	0.78	6.8 e ⁻⁴⁵
Feinanteil f_c [%]	20.04	0.81	6.1 e ⁻⁴⁹	10.16	-0.39	4.7 e ⁻⁰⁹
Total [%var] Dim1/Dim2	100.00			100.00		

Tabelle 4: Signifikante kategorielle Variablen der Multi Faktor Analyse mit Korrelation (R²) und p-Wert für die ersten vier Dimensionen (Dim1, Dim2). Hohe Korrelationswerte [0,1] sind grau hinterlegt.

*: Im Hinblick auf das Versagen wurden 3 Bodentypen unterschieden, mit Bodenmaterial, das vorwiegend durch Reibung (R), Saugspannung (S) oder eine Kombination (K) von beiden stabilisiert wird.

	Dim1		Dim2		Dim3		Dim4	
	R ² [0,1]	p-Wert [0,1]	R ² [0,1]	p-Wert [0,1]	cor // R ² [0,1]	p-Wert [0,1]	cor // R ² [0,1]	p-Wert [0,1]
Bodentyp (R, S, K) *	0.58	4.3 e ⁻³⁹	---	---	0.05	3.6 e ⁻⁰³	---	---
Region (Perimeter)	0.16	6.6 e ⁻⁰⁶	0.56	2.2 e ⁻³²	0.36	1.1 e ⁻¹⁶	0.35	1.0 e ⁻¹⁵
Unwetterereignis	0.12	1.3 e ⁻⁰⁵	0.46	6.0 e ⁻²⁷	0.30	1.0 e ⁻¹⁵	0.07	2.1 e ⁻⁰³
Entwicklungsstufe	0.04	3.5 e ⁻⁰²	---	---	---	---	---	---
Deckungsgrad	---	---	0.06	1.6 e ⁻⁰³	---	---	---	---
Schichtung	---	---	0.02	3.2 e ⁻⁰²	---	---	---	---

Waldstruktur und Bodenwasserhaushalt

Die Stabilität der Bodenmatrix und somit der Porenstruktur wirkt sich entscheidend auf die hydrologischen Eigenschaften des Bodens aus. Diese spielen wiederum eine massgebende Rolle für die Stabilität von Hängen. Die Auslösung flachgründiger Rutschungen ist unter anderem eng gekoppelt mit dem Prozess der Wassersättigung und dem ent-

sprechenden Anstieg des Porenwasserdrucks im Bodenkörper. Im Hinblick auf den Schutz vor flachgründigen Rutschungen spielt daher die Wasserspeicherkapazität des Bodens eine entscheidende Rolle. Für ein besseres Verständnis des Zusammenhangs von Waldstruktur und Schutzwirkung vor flachgründigen Rutschungen, muss deshalb auch eine Verknüpfung zwischen der Bodenhydrologie, als entscheidender Auslösefaktor, mit dem

Einfluss der Waldstruktur auf den Wasserhaushalt (Bodenhydrologie, Evapo-Transpiration) hergestellt und das entsprechende Prozessverständnis verbessert werden (Hoffmann et al. 2016, Zhang et al. 2016).

In diesem Kontext sind Voruntersuchungen im Dischmatal (Davos, GR) im Gange. Dort werden seit Herbst 2018 in nächster Nachbarschaft in einem gut und schlecht strukturierten Bestand sowie in einer Lichtung der

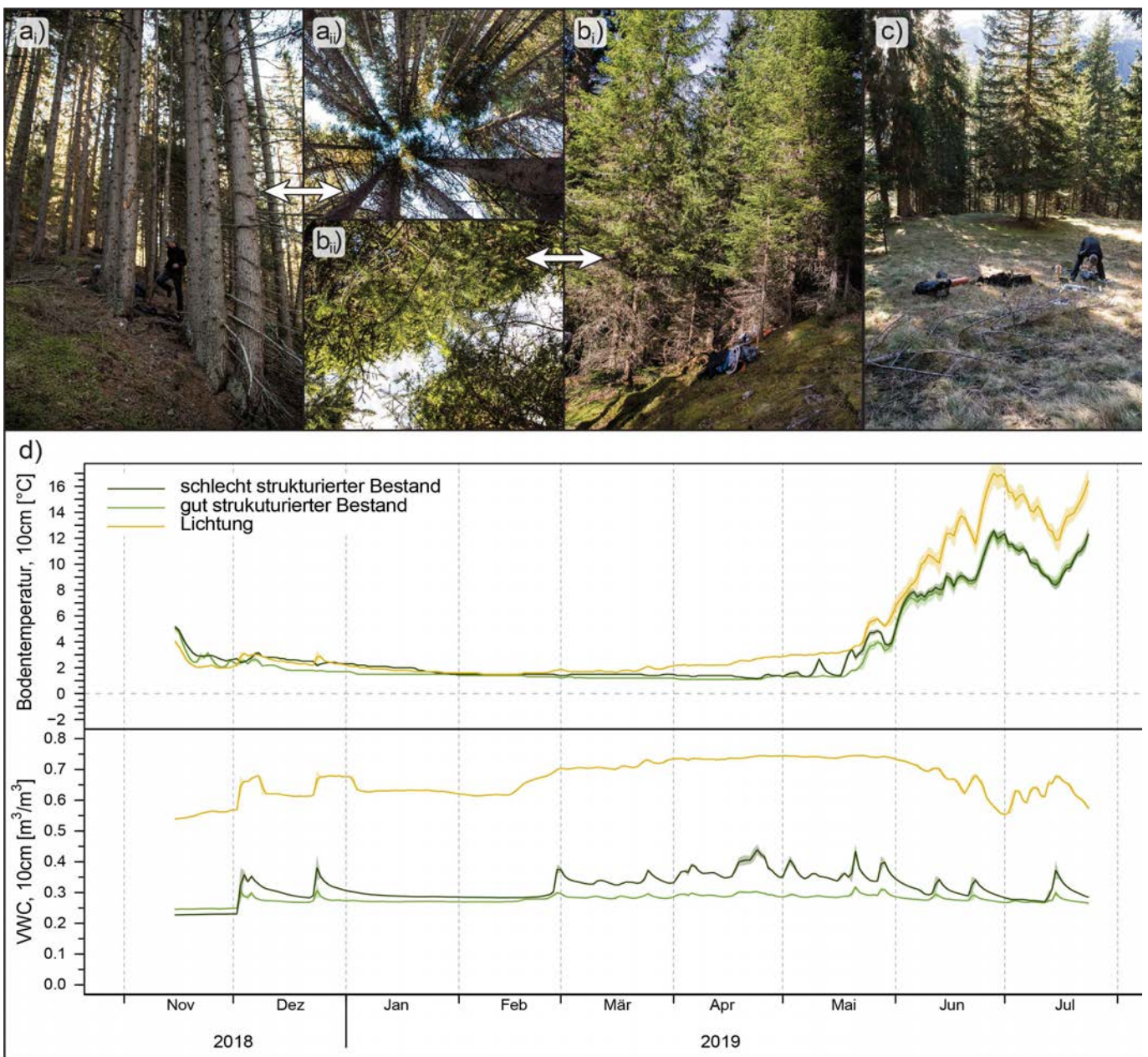


Abbildung 2: Verlauf von Bodentemperatur und -feuchtigkeit (volumetrischer Bodenwassergehalt, VWC) in 10 cm Tiefe eines schlecht (ai, aii) und gut strukturierten Waldbestandes (bi, bii) sowie einer Lichtung (c) eines subalpinen Fichtenwaldes im Dischmatal in Davos, GR (Fotos: Alexander Bast).

volumetrische Bodenwassergehalt (VWC) und die Bodentemperatur gemessen (Abb. 2). Es hat sich bereits während des Winterhalbjahres eine deutliche Differenz zwischen den beiden unterschiedlich strukturierten Waldpartien gezeigt, mit kühleren Temperaturen und geringerem Wassergehalt in der «gut» strukturierten Fläche (Abb. 2d). Zudem reagiert der Boden im schlecht strukturierten Bestand viel stärker und sprunghaft auf grössere Niederschlagsmengen. Am ausgeprägtesten kommen die Unterschiede im volumetrischen Wassergehalt und somit bezüglich der freien Wasserspeicherkapazität während der Schneeschmelze (März – Juni) zum Vorschein. Diese Zeitspanne birgt in Kombination mit intensivem Niederschlag ein erhöhtes Risiko für die Auslösung flachgründiger Rutschungen. Der Boden des gut strukturierten Bestandes wartet mit einem deutlich höheren Fassungsvermögen auf, womit die Auslösungswahrscheinlichkeit flachgründiger Rutschungen beträchtlich reduziert wird.

Es ist zwar allgemein bekannt, dass laubabwerfende Bäume während der Vegetationsruhe weniger transpirieren als Nadelgehölze und immergrüne Bäume. Neuere Untersuchungen (Young-Robertson et al. 2016) haben jedoch gezeigt, dass namentlich zu Beginn und während der Schneeschmelze insbesondere früh austreibende Laubhölzer bis zu 25% des zur Verfügung stehenden Schmelzwassers aufnehmen können und somit einen massgeblichen Beitrag zur Bodenentwässerung leisten. Damit einhergehend kommt es zu einem bedeutenden Anstieg der Saugspannung, was wiederum die Boden- und Hangstabilität erhöht (Yildiz et al. 2019 a, b). Bei Pioniergehölzen wie beispielsweise Birken, Hasel und Pappeln ist der Blattaustrieb nach der Winterruhe Temperatur gesteuert. Sie können entsprechend unabhängig von der Photoperiode und unverzüglich auf Temperaturanstiege während der Schneeschmelze reagieren. Zu früh aus-

treibenden Laubgehölzen gehören ebenfalls Ahorne, Erlen und Weiden (Körner & Basler 2010, Polgar & Primack 2011)

In einem gut strukturierten Wald für «optimalen» Schutz vor flachgründigen Rutschungen ist somit eine hohe Vielfalt nicht nur bezüglich Arten, sondern auch hinsichtlich deren Phänologie wichtig.

Folgerungen

Sowohl die Auswertungen mit dem 3-Stufen-Filter als auch die Anwendung einer Multi Faktor Analyse haben übereinstimmend die Relevanz der Boden- und Vegetations-, respektive Waldstruktur im Hinblick auf den Schutz vor flachgründigen Rutschungen aufgezeigt. In beiden Fällen konnte ein sehr hoher Anteil (>90%) der über 200 analysierten flachgründigen Rutschungen erklärt werden.

Die Tatsache, dass neben den Scherparametern (Reibungswinkel Φ' , Kohäsion c') der Wassergehalt, die Porenzahl sowie der Feinanteil starken Einfluss nehmen, deutet zudem auf die Wichtigkeit der Bodenhydrologie hin. Diese Gegebenheit wird zusätzlich durch die positive Korrelation zwischen erster Hauptkomponente und dem Bodentyp «Saugspannung» im Gegensatz zu «Reibung» und «Kombination» untermauert (Tab. 2, 4)³.

Damit ein Boden der Auslösung flachgründiger Rutschungen optimal entgegenwirken kann, muss unter anderem eine angemessene Wasserrückhaltekapazität nachhaltig gewährleistet sein. Der Aufbau der Bodenstruktur wird einerseits durch rein physikalisch-chemische Prozesse und andererseits durch die Bodenfauna und -flora gesteuert. Zusammen mit dem Edaphon und namentlich im Zusammenspiel mit ihren Pilzpartnern (Mykorrhiza) tragen auch die Pflanzen sowohl aktiv mit den Wurzeln als auch passiv durch den Eintrag von organischem Material über abgestorbene Pflanzenteile zur Entwicklung der Bodenmatrix und Porenstruktur bei. Eine hohe Diversität an

Pflanzen, respektive namentlich der Wurzelmorphologie, erhöht dabei die Stabilität des Bodengefüges und fördert somit eine nachhaltige Rückhaltekapazität von Wasser und Nährstoffen. Zudem wird durch eine höhere Vielfalt an (Pflanzen-) Wurzeln auch die Entwässerung positiv beeinflusst.

Die Auswertung erster Daten aus dem Pilotprojekt «Waldstruktur und Bodenwasserhaushalt» im Dischmatal, Davos (GR) verdeutlicht den Einfluss der Waldstruktur auf die Bodenhydrologie (Abb. 2d). Ein gut strukturierter Wald verfügt im Vergleich zu schlecht strukturierten Beständen über eine höhere Wasserspeicherkapazität. Er kann demnach während einem Unwetterereignis über eine längere Zeitspanne die Wassersättigung verzögern oder gar verhindern und wirkt so der Auslösung flachgründiger Rutschungen entscheidend entgegen.

Wälder, deren Aufgabe in erster Linie den Schutz vor flachgründigen Rutschungen beinhaltet, weisen somit bezüglich Waldstruktur eine gebührende ober- und unterirdische Vielfalt auf, insbesondere bezüglich Arten, Alter, horizontaler und vertikaler Struktur sowie Durchwurzelung und Wurzelarchitektur (Abb. 3).

Wo immer möglich, ist das Nebeneinander verschiedener Sukzessions- und Entwicklungsstufen in kleinräumig ausgewogener Verteilung zu fördern. Durch diese «dreidimensionale Diversität» – oberirdisch, unterirdisch und hinsichtlich Sukzession (zeitliche Diversität) – erhöht sich nicht nur die Anpassungsfähigkeit und Widerstandskraft des gesamten Bestandes. Auch dessen Selbstregulierung wird so massgeblich gefördert. Neben Pflanzen sind deren Partnerorganismen, in erster Linie Mykorrhizapilze, ebenfalls zu berücksichtigen (Abb. 3). Denn eine vielfältige Myko-Rhizosphäre treibt die Sukzession der Pflanzengesellschaften an und ist ein wichtiger Promotor für die nachhaltige Entwicklung

³ https://www.wsl.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Mitarbeitende/graf/Graf_Rickli_Bast_Poster_IMC_2019.pdf

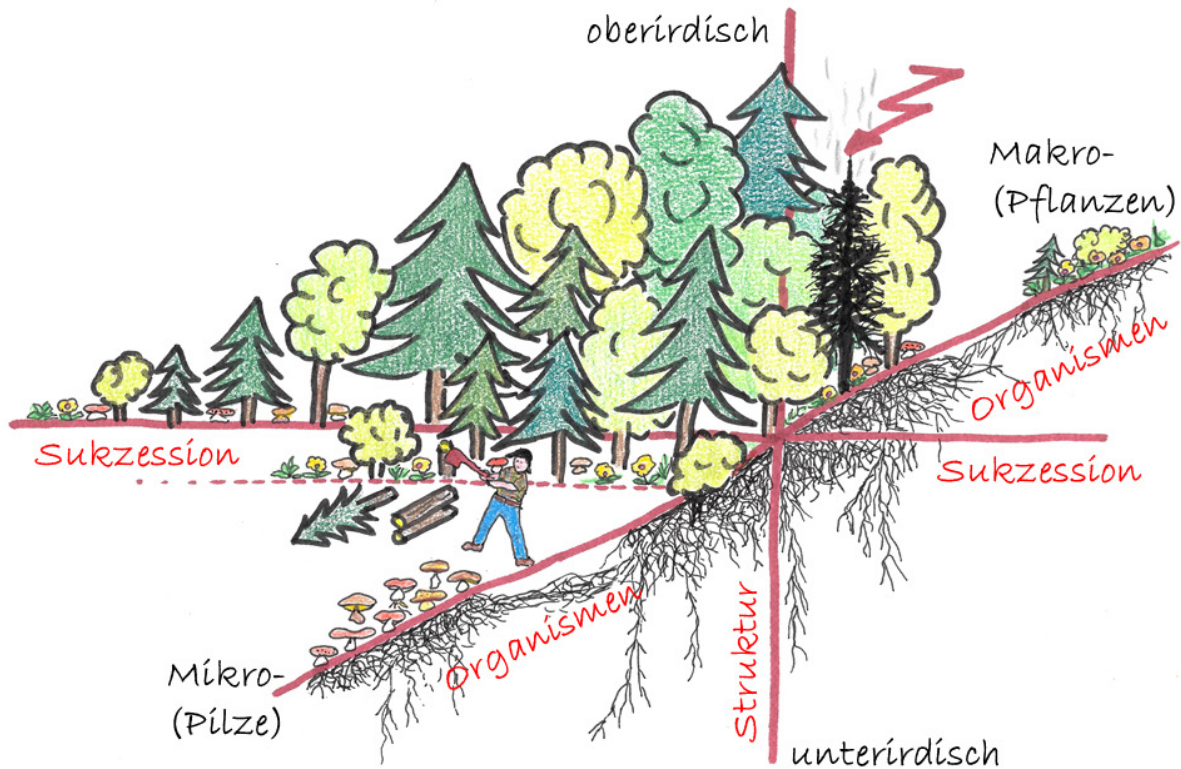


Abbildung 3: 3^D-Diversität unter Berücksichtigung von Mikro- und Makro-Organismen (Pflanzen- und Mykorrhizapilz-Arten), ober- und unterirdischer Struktur sowie Sukzession und deren Regulierung durch anthropogene Eingriffe (Pflege und Unterhalt) und natürliche Störungen wie Windwurf, Borkenkäfer, Feuer, Lawinen, ... (Zeichnung von V. Graf-Morgen, 2016).

einer schützenden Vegetationsdecke. Deshalb soll auch der unterirdischen Arten- und Strukturvielfalt (Wurzelarchitektur) angemessene Aufmerksamkeit zuteilwerden.

Quellen

Aston AR (1979) Rainfall interception by eight small trees. *Journal of Hydrology* 42: 383-396.

Bader A (2014) How Plants and Mycorrhizal Fungi Contribute to Soil Aggregate Stability. Master Thesis ETH, 146 pp. https://www.slf.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Projekte/SOSTANH/AnjaBader.pdf

Bauerle TL, Richards JH, Smart DR, Eissenstat DM (2008) Importance of internal hydraulic redistribution for prolonging the lifespan of roots in dry soil. *Plant, Cell and Environment* 31: 177-186.

Bebi P, Bast A, Ginzler C, Rickli C, Schöngrunder K, Graf F (im Druck) Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine großflächige GIS-Analyse, SZF.

Bebi P, Teich M, Schwaab J, Krumm F, Walz

A, Grêt-Regamey A (2012) Entwicklung und Leistungen von Schutzwäldern unter dem Einfluss des Klimawandels. Schlussbericht im Rahmen des Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel». Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Bern, Bundesamt für Umwelt.

Bezzola GR, Hegg C, Ed. (2007) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 215 S.

Bezzola GR, Hegg C, Ed. (2008) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 426 S.

- BAFU, Bundesamt für Umwelt, Hrsg. (2008) Handbuch NFA im Umweltbereich. Mitteilung des BAFU als Vollzugsbehörde an Gesuchsteller. Umwelt-Vollzug Nr. 0808. Bundesamt für Umwelt, Bern. 283 S.
- Deguchi, A, Hattori S, Park HT (2006) The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology* 318: 80-102.
- Frehner M, Wasser B, Schwitter R (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.
- Ghestem M, Veylon G, Bernard A, Vanel Q, Stokes A (2014) Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance. *Plant Soil* 377:43–61, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-012-1572-1>
- Gigon A (1975) Über das Wirken der Standortsfaktoren; kausale und korrelative Beziehungen in jungen und in reifen Stadien der Sukzession. In: Mitt. der eidg. Anst. für forstl. Versuchswesen, Bd. 51: 25–36.
- Graf F, Bast A, Gärtner H, Yildiz, A (2019) Effects of mycorrhizal fungi on slope stabilization functions of plants. In W. Wu (Ed.), Springer series in geomechanics and geoengineering. Recent advances in geotechnical research (pp. 57-77). https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_6
- Graf F, Bebi P, Braschler U, De Cesare G, Frei M et al. (2017) Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen. WSL Bericht, 56. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 42 p.
- Graf F, Frei M, Böll A (2009) Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. *FOSNOLA* 82: 61-78.
- Graf F, Grunder K (2017) Shallow landslides: lessons from Sachseln 1997. Geophysical Research Abstracts Vol. 19, EGU General Assembly 2017, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-2719.pdf> / http://www.nfp68.ch/SiteCollectionDocuments/poster_egu17_graf_grunder.pdf
- Hoffmann H, Nieto H, Jensen R, Guzinski R, Zarco-Tejada P, Friborg T (2016) Estimating evaporation with thermal UAV data and two-source energy balance models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20: 697-713.
- Hörman G, Branding A, Clemen T, Herbst M, Hinrichs A (1996) Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of beech forest in Northern Germany. *Agric. For. Meteorol.* 79: 131–148.
- Husson F, Lê S, Pagès J (2017) Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R. Chapman & Hakk/CRC, Computer Science and Data Analysis Series, pp. 248.
- Kaiser M (1967) Die Bouchser Rübi. Schweiz. Z. Forstwes. 8: 493-522.
- Körner C, Basler D (2010) Phenology under global warming. *Science* 327: 1461–1462.
- Landolt E (1862) Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweiz. Hochgebirgswaldungen. J.A. Weingart, Bern, 367 S.
- Liu S (1997) A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modelling* 99: 151–159.
- Loshali DC, Singh RP (1992) Partitioning of rainfall by three Central Himalayan forests. *Forest Ecology and Management* 53: 99–105.
- Moos C, Bebi P, Graf F, Mattli J, Rickli C, Schwarz M (2016) How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides? *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.3887>
- Ng CWW, Liu HW, Feng S (2015) Analytical solutions for calculating pore-water pressure in an infinite unsaturated slope with different root architectures. *Can. Geotech. J.* 52: 1981–1992.
- Park H (2000) Physical characteristics of heat and water exchange processes between vegetation and the atmosphere in a deciduous broad-leaved forest. Nagoya University.
- Pohl M, Alig D, Körner C, Rixen C (2009) Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant Soil* 324:91–102, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-009-9906-3>
- Pohl M, Graf F, Buttler A, Rixen C (2012) The relationship between plant species richness and soil aggregate stability can depend on disturbance. *Plant Soil* 355:87–102, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-011-1083-5>
- Polgar CA, Primack RB. 2011. Leaf-out phenology of temperate woody plants: from trees to ecosystems. *New Phytologist* 191: 926–941.

- Price A.G, Carlyle-Moses DE (2003) Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* 119: 69–85.
- Querejeta JI, Egerton-Warburton LM, Allen MF (2008) Hydraulic lift may buffer rhizosphere hyphae against the negative effects of severe soil drying in a California Oak savanna. *Soil Biology & Biochemistry* 39, 409–417.
- Rickli C, Red. (2001) Vegetationswirkungen und Rutschungen. Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. Birmen-sdorf, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. 97 S.
- Rickli C, Bebi P, Graf F, Moos C. 2019. Shallow landslides: retrospective analysis of the protective effect of forest and conclusions for prediction. In: Wu W. (ed.) *Recent Advances in Geotechnical Research*. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_15
- Rickli C, Graf F, Bebi P, Bast A, Loup B, McAr-dell B (im Druck) Wirkung des Waldes auf die Auslösung von Rutschungen – Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank, SZF
- Schwarz M, Cohen D, Or D (2012) Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study. *Geomorphology* 171-172: 190–200.
- SN670010b (2011) Geotechnische Erkundung und Untersuchung / Geotechnische Kenngrößen. Schweizer Norm (SN), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) Zürich, pp. 19.
- Yildiz A, Askarinejad A, Graf F, Rickli C, Springman SM (2015) Effects of roots and mycorrhizal fungi on the stability of slopes. *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, Edinburgh, 1693-1698. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/ecsmge.60678.vol4.251>
- Yildiz A, Graf F, Rickli C, Springman SM (2019 a) Assessment of plant-induced suction and its effects on the shear strength of rooted soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, <https://doi.org/10.1680/jgeen.18.00209>
- Yildiz A, Graf F, Springman, SM (2019 b) An investigation of plant-induced suction and its implications for slope stability. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, <https://doi.org/10.1680/jgeen.18.00218>
- Young-Robertson JM, Bolton WR, Bhatt US, Cristóbal J, Thoman R (2016) Deciduous trees are a large and overlooked sink for snowmelt water in the boreal forest. *Scientific Reports*. 6: 29504. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4941571/>
- Zhang K, Kimball JS, Running SW (2016) A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *WREs Water* 3: 834-853.

Quantifizierung und Implementierung der Wurzelverstärkung in Hangstabilitätsmodellen

Massimiliano Schwarz¹ (massimiliano.schwarz@bfh.ch)

Gianluca Flepp¹ (gianluca.flepp@bfh.ch)

Luuk Dorren¹ (luuk.dorren@bfh.ch)

¹ BFH HAFL-Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen

Zusammenfassung

Die Wurzelverstärkung ist ein wichtiger stabilisierender Effekt der Vegetation gegenüber von flachgründigen Rutschungen und wurde seit Jahrzehnten untersucht. Trotzdem bleibt die Quantifizierung und Berücksichtigung dieses Effektes in der Praxis eine Herausforderung. In diesem Beitrag zeigen wir Resultate und Ansätze, welche die Anwendung einer «quantitativen Ingenieurbiologie» erlauben. Aufgrund einzigartiger Daten der Wurzelverstärkung verschiedener Baumarten sowie neuen Modellen zur Aufskalierung dieser Effekte auf die Bestandesebene, ist es heute möglich die Wurzelverstärkung besser in Hangstabilitätsmodelle zu implementieren. Mit dem Beispiel vom «SlideforNET»-Modell wird eine praxisnahe Anwendung zur Beurteilung der Hangstabilität präsentiert und diskutiert.

Einleitung

Im Zentrum von ingenieurbioologischen Massnahmen steht die Funktion und Wirkung der Vegetation gegenüber verschiedenen chemischen und physikalischen Prozessen. Obschon viele dieser Techniken bereits lange bekannt sind, werden sie in der Praxis nicht immer systematisch umgesetzt und akzeptiert. Ein Grund dafür ist die grosse Schwierigkeit bezüglich der Berechnung ihrer zeitlichen und räumlichen Wirkung. Um den Dialog zwischen Praktikern mit unterschiedlichen

Fachkompetenzen zu fördern und die Wirkung von ingenieurbioologischen Massnahmen objektiv beurteilen zu können, ist die Entwicklung quantitativer Methoden unerlässlich. Durch die Anwendung solcher Ansätze öffnen sich für die Praxis neue Möglichkeiten für die Anwendung einer «quantitativen Ingenieurbiologie» (Schwarz et al. 2017).

Die Entwicklung einer quantitativen Methode erlaubt eine auf normierte Kriterien basierende Beurteilung für technische Massnahmen. Konkret kann die zeitliche Entwicklung der Faktoren Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit beurteilt werden. Die Erfüllung dieser Kriterien erlaubt die Beurteilung der biologischen Massnahmen gemäss dem Konzept «Protect» (Romang und Margreth, 2008) im integralen Risikomanagement für Naturgefahren.

Eine der anerkanntesten Wirkungen der Vegetation bezüglich Hangstabilität, ist die Wurzelverstärkung (Arce-Mojica et al., 2019). Die Wurzelverstärkung kann mit Parametern quantifiziert werden, welche auch für den Boden verwendet werden (z.B. Kohäsion und innerer Reibungswinkel). Die Methodik für die Quantifizierung dieser Parameter wurde in den letzten vierzig Jahren stetig weiterentwickelt (Schwarz, in Review). In den letzten Jahren wurde auch allmählich eine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Mechanismen der Wurzelverstärkung vollzogen (basal und

lateral unter Zug, lateral unter Druck, Versteifung). Diese Mechanismen wirken nicht alle gleichzeitig und werden in verschiedenen Phasen der Entstehung einer Rutschung aktiviert (Schwarz, in Review; Cohen & Schwarz, 2017). Die Unterscheidung dieser Mechanismen ist für einen besseren Einbezug der Wurzelverstärkung in Hangstabilitätsberechnungen wichtig.

In diesem Artikel wird eine kurze Einführung in die Quantifizierung der Wurzelverstärkung wiedergegeben, damit neu präsentierte Resultate der Wurzelverstärkung auf Bestandesebene interpretiert und ihre Anwendung in Hangstabilitätsmodellen diskutiert werden können (insbesondere der Ansatz vom SlideforNET-Modell).

Quantifizierung der Wurzelverstärkung

Die essenziellsten Daten für die Berechnung der Wurzelverstärkung, lassen sich in zwei Kategorien einteilen (Schwarz et al., 2013): 1) räumliche Daten der Verteilung und der Dimensionen der Wurzeln (Durchmesser), und 2) die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Wurzeln je nach Krafteinwirkung (Zug, Druck, Scherung).

Für die räumliche Datenerhebung der Wurzeln ist es bedeutsam folgende Faktoren zu be-

rücksichtigen: Baumart, Durchmesserklasse der Wurzeln, Abstand von Baumstamm, BHD des Baumstammes sowie Bodentiefe. Um einen repräsentativen Datensatz erstellen zu können, welcher all diesen Faktoren gerecht wird, ist eine Vielzahl an Grabungen und damit einhergehend ein grosser Aufwand nötig. Erfahrungsgemäss ist eine kumulierte Bodenprofillänge von ca. 300 m pro Baumart erforderlich um einen repräsentativen Datensatz zu erhalten. Standortunterschiede haben sich bis jetzt als irrelevant erwiesen, sofern Wasser nicht einen limitierender Faktor ist.

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Wurzeln ist die Berücksichtigung von komplexen Interaktionen zwischen Wurzel und Boden erforderlich. Hier spielen vor allem die baumartenspezifischen, mechanischen Eigenschaften des Wurzelholzes und die Morphologie der Wurzeln (Geometrie) eine zentrale Rolle. Diese können am besten durch Ausziehversuche im Feld untersucht werden. Eine detaillierte Diskussion darüber ist in Giadrossich et al. (2017) zu finden.

Für eine sinnvolle Implementierung der Wurzelverstärkung in Hangstabilitätsmodelle ist ein Aufskalierungsansatz nötig. Abbildung 1 zeigt konzeptuell die Schritte der Aufskalierung der Wurzelverstärkung von der Einzelwurzel zum Waldbestand. Während den Ausziehversuchen im Feld wird das Kraft-Dehnungs-Verhalten jeder Wurzel durchmesserklasse gemessen. Damit werden die Koeffizienten des Root-Bundle-Models (RBM, Schwarz et al., 2013) kalibriert. Weiter wird der Effekt der Variabilität der Daten auf das Verhalten der Wurzelbündel mit einem probabilistischen Ansatz berücksichtigt (RBM_w, wobei *w* für die Weibull-Überlebensfunktion steht). Mit dem RBM_w kann das Kraft-Verformungs-Verhalten eines Wurzelbündels im Boden berechnet werden. Durch die Anwendung des RBM_w für alle gemessenen Wurzelverteilungen (Anzahl

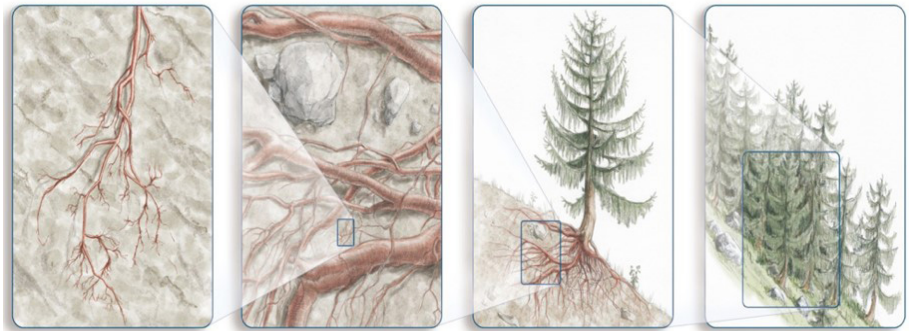


Abbildung 1: Konzeptuelle Darstellung der Aufskalierung der Wurzelverstärkung (von links nach rechts): 1. von der Einzelwurzel zum Wurzelbündel, 2. vom Wurzelbündel zum Wurzelsystem, 3. vom Wurzelsystem zum Waldbestand (nach Schwarz et al., 2010b).

Wurzel pro Durchmesserklasse) wird die Aufskalierung der Wurzelverstärkung innerhalb eines Wurzelsystems möglich. Mit Informationen über Baumart, Baumdimensionen, und deren Position im Bestand kann eine räumlich aufgelöste Karte der Wurzelverstärkung generiert werden. Falls nur Daten über BHD Verteilung und Anzahl Bäume pro Hektar vorhanden sind, ist es möglich, die Wurzelverstärkung auf Bestandesebene mit einer konservativen Berechnung der minimalen lateralen Wurzelverstärkung zu charakterisieren (siehe z.B. Dazio et al., 2018).

Unterschied zwischen Baumarten

Als Beispielresultate der Aufskalierung der Wurzelverstärkung auf Baumebene wird nachstehend erstmals der Vergleich der modellierten lateralen Wurzelverstärkung verschiedener Baumarten, in Abhängigkeit des BHDs und des Stammabstandes, präsentiert (Abbildung 2). Die Daten stammen aus verschiedenen Studien, welche in Schwarz et al. (2019c) zusammengefasst wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Buche die Baumart mit der weitesten Wurzelverstärkung auf Baumebene ist. Für die Kalibrierung des Modells für die Buche wurden insgesamt 11 Bäume untersucht. Die Edelkastanie und Fichte weisen eine mittelmässige Wurzelverstärkung auf und wurden mit Daten aus 25 respektive 13 Bäumen be-

rechnet. Die Werte des Götterbaumes sind am tiefsten und entstanden aus den Untersuchungen an 23 Bäumen. Diese modellierten Werte sind für eine durchschnittliche laterale Wurzelverstärkung repräsentativ. Zwischen verschiedenen Standorten wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden (z.B. Dazio et al., 2018). Die Variabilität zwischen den gemessenen Werten und des Modells können jedoch sehr hoch sein. Laufende Untersuchungen zeigen, dass der Wert des untersten 5 Perzentils innerhalb des gleichen Wurzelsystems und zwischen verschiedenen Wurzelsystemen bei 25 % der berechneten Modelresultate liegt. Diese Resultate können als Grundlage für die Formulierung von partiellen Sicherheitsfaktoren der Wurzelverstärkung dienen, wenn diese in Hangstabilitätsberechnungen berücksichtigt werden.

Die Informationen über die Verteilung der lateralen Wurzelverstärkung auf Wurzelsystemebene genügen nicht, um eine generelle Beurteilung der stabilisierenden Wirkung auf Hangebene zu vollziehen. Daher wird die Wurzelverstärkung im folgenden Kapitel auf Bestandesebene unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Eigenschaften der Bestandsstruktur präsentiert (durchschnittliche BHD und Anzahl Bäume pro Hektar).

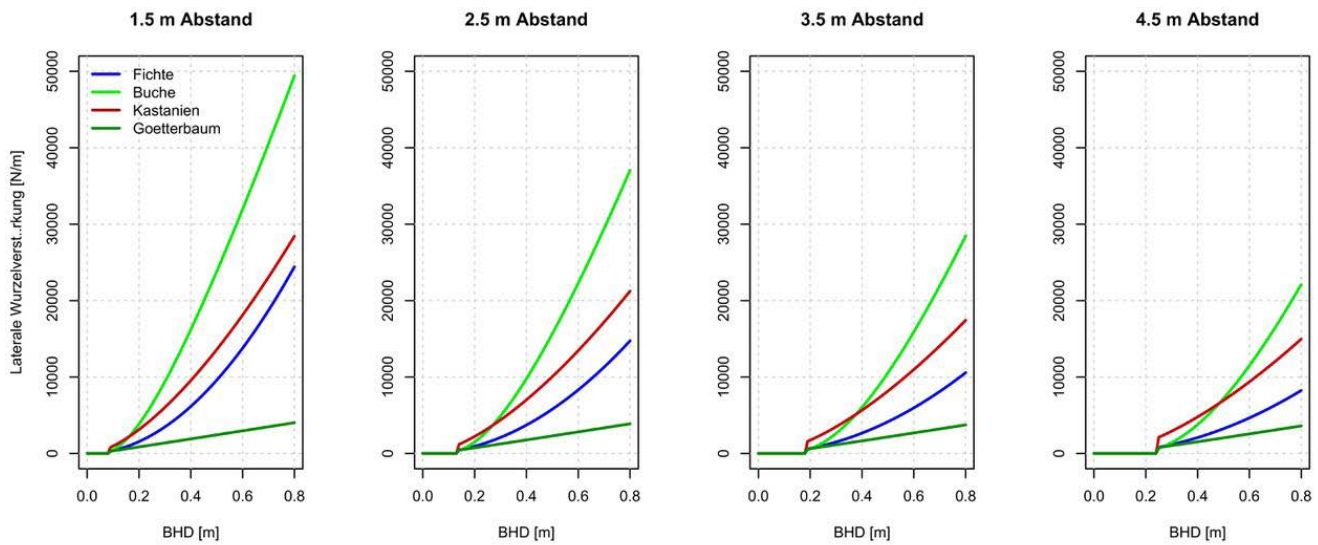


Abbildung 2: Kalkulierte laterale Wurzelverstärkung auf Baumebene für die Baumarten Fichte, Buche, Edelkastanie und Götterbaum (modifiziert nach Schwarz et al., 2019c).

Resultate der Wurzelverstärkung auf Bestandesebene

Da wir nun die Wurzelverstärkung der einzelnen Bäume in Abhängigkeit des BHDs, der Stammzahl pro Hektare und der Baumart kennen, ist es möglich, die Wurzelverstärkung auf Bestandesebene zu schätzen. Der Ansatz für die Aufskalierung ist in Gehring et al. (2019) detailliert beschrieben. Auf die Frage nach der maximalen potenziellen Wurzelverstärkung eines Bestandes in der Schweiz, wurden Daten des Landesforstinventares (LFI) hinzugezogen und analysiert. Um diese Daten, Zwecks Aussagen über von einer bestimmten Baumart dominierten Bestände treffen und in die Berechnung integrieren zu können, wurden nur jene Bestände berücksichtigt, in denen der Grundflächenanteil der dominierenden Baumart mindestens 80% der Grundfläche des Gesamtbestandes beträgt. Abbildung 3 stellt die Resultate für die Fichte (3716 Bestände) und der Buche (819 Bestände) dar. Dabei ist zu erwähnen, dass die Streuung der Daten grösstenteils durch unterschiedliche Zuwachsraten der Bäume in Abhängigkeit der Standortfaktoren gegeben ist. Für die Berechnungen wurden Daten der Stammzahl pro Hektare und des durchschnittlichen BHDs

jedes Bestandes verwendet. Die Resultate ergeben eine doppelt so hohe laterale Wurzelverstärkung in Buchenbeständen, gegenüber den Fichtenbeständen. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse ist in Schwarz et al. (2019c) zu finden.

SlideforNET: kurze Erklärung und Anwendung

Um den Einfluss der Wurzelverstärkung auf die Hangstabilität zu beurteilen, gibt es verschiedene Ansätze (siehe Schwarz, in Review). Einer der vereinfachtesten Ansätze ist im SlideforNET-Modell¹ implementiert (Schwarz

et al., 2010a; Schwarz et al., 2012). Der SlideforNET-Ansatz besteht aus einem 3D-Kraftausgleichsmodell, welches die Wirkung von lateraler und basaler Wurzelverstärkung unter der Annahme, dass (a) flachgründige Rutschungen elliptisch geformt sind und doppelt so lang wie breit sind berücksichtigt wird. Zudem (b), dass die laterale Wurzelverstärkung während der Auslösung einer Rutschung in Abhängigkeit von der Verformung der Bodenmasse schrittweise aktiviert wird. Diese schrittweise Aktivierung führt wiederum dazu, dass die maximalen, auf die Anrisszone einer Rutschung einwirkenden Zugkräfte nicht

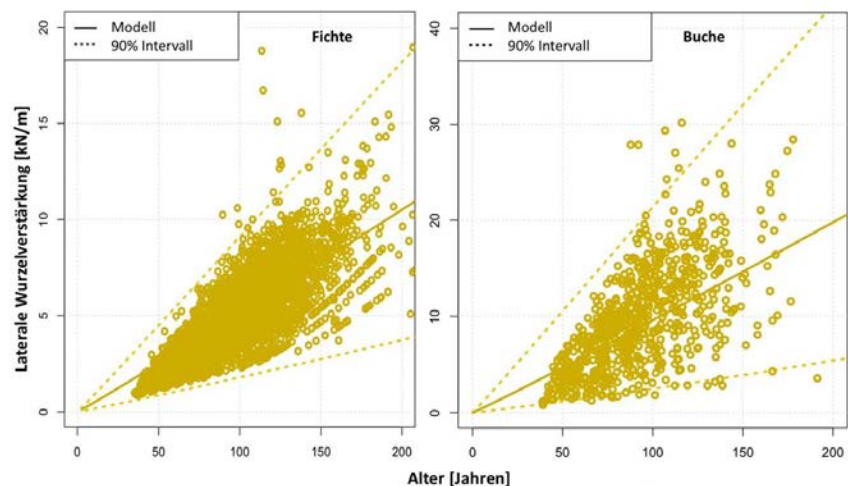


Abbildung 3: Berechnetes Potential der lateralen Wurzelverstärkung für fichtendominierte (links) bzw. buchendominierte (rechts) Schweizer Waldbestände.

¹ <http://www.ecoris.org/slidefor-net-en>

gleichzeitig mit dem maximalen passiven Erd- druck am Rutschungsfuss aktiviert werden (Schwarz et al., 2015).

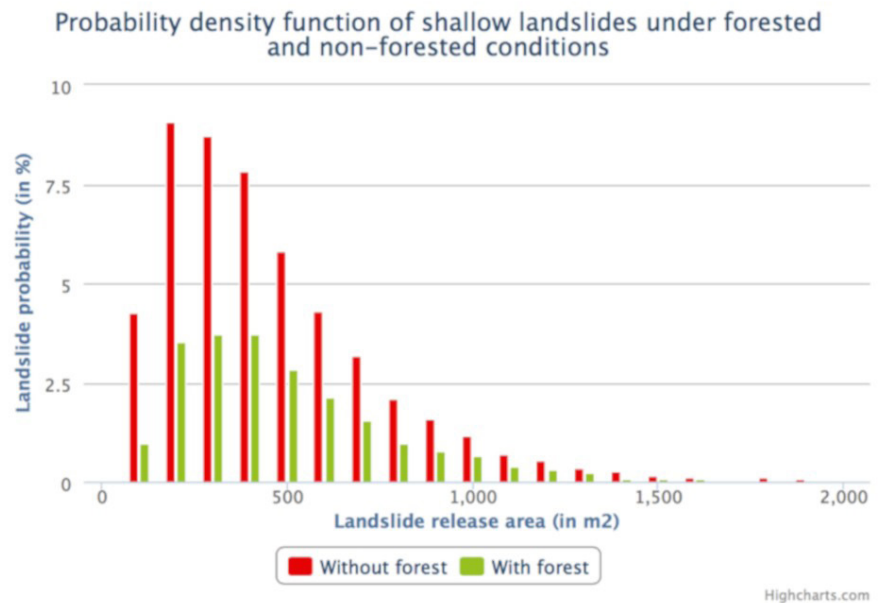
Basierend auf den Eingabeparametern (Anzahl Bäume pro Hektar, mittlerer Stammdurchmesser (BHD) und Baumartenzusammensetzung) berechnet das Modell die minimale laterale Wurzelverstärkung unter der Annahme einer mittleren Baumdistanz. Dies basiert auf den Daten, welche in den oberen Paragraphen beschrieben sind. Die Resultate der berechneten Wurzelverstärkung sind in den Klassen 5kN/m, 10kN/m oder 15 kN/m (Kraft pro Laufmeter entlang eines vertikalen Rutschprofils) eingeteilt. Um die Auswirkungen der lateralen Wurzelverstärkung auf unterschiedliche Dimensionen von flachgründigen Rutschungen einzubeziehen, wird eine Gamma-Wahrscheinlichkeitsfunktion verwendet. Damit werden die Frequenz und Magnitude potentieller Rutschungen beschrieben. Die resultierende Anzahl instabiler Rutschungen steht nicht in Zusammenhang mit der Intensität eines bestimmten Niederschlagsereignisses, sondern repräsentiert die Wahrscheinlichkeit, dass unter vollständig gesättigtem Boden, Rutschungen in einem bestimmten Gebiet auftreten können.

Die Eingangsparameter (Tiefe der Scherfläche, effektive Bodenkohäsion und Reibungswinkel des Bodens) werden mit einem probabilistischen Ansatz berechnet. Der Mittelwert dieser Parameter muss jedoch vom Benutzer definiert werden. SlideforNET analysiert für jede Kombination von Parameterwerten, welche zufällig generiert sind, ob eine potenzielle Rutschung stabil ist oder nicht. Abbildung 4 zeigt das grafische Ergebnis der Web-Applikation. Ein weiterer Output des Modells ist der „degree of protection«, oder Schutzwirkungsgrad, welcher den prozentualen Anteil der durch den Wald stabilisierten Rutschungen ausdrückt. Weiter berücksichtigt das Modell auch das Gewicht der Vegetation, welches mit dem

1. Overall landslide probability:

- Without forest: 50 %
- With the above-defined forest: 22 %

2. Current degree of protection: 50 - 75 %



Data used for the calculation:

- Safety Factor (SF) of slopes at the point of failure (critical) = 1.25
- Lateral reinforcement by tree roots = 10 kN/m
- Average basal reinforcement by tree roots = 1.3 kPa

Abbildung 4: Beispiel der Resultate der Berechnungen von der Web-Applikation SlideforNET.

gesamten Gewicht der Rutschung verglichen wird, um die vernachlässigbare Rolle dieser Kraftkomponente bezüglich der Hangstabilität aufzuzeigen.

Fazit

Die Quantifizierung der Wurzelverstärkung und ihre Aufskalierung ist sehr arbeitsintensiv. Jedoch hat sich dieser Aufwand als unerlässlich erwiesen, um die Wirkung der Wurzelverstärkung nachvollziehbar und eingehend auf Bestandesebene beurteilen zu können. Dies gilt sowohl für die Anwendung im Schutzwaldmanagement als auch in der Ingenieurbiologie. Die im vorliegenden Artikel präsentierten Ergebnissen sind das Resultat von 15 Jahren

Forschungsarbeit. Um die Modelle zu erweitern, zu kalibrieren und die Wurzelverstärkung weiterer Baumarten zu berücksichtigen, ist noch etlicher Aufwand nötig. Durch die getätigte Forschungsarbeit konnten jedoch je nach vorherrschender Baumart deutliche Unterschiede der Wurzelverstärkung auf Bestandesebene nachgewiesen werden. Die Implementierung von diesen wissenschaftlich fundierten Daten in einfache, aber realistische Hangstabilitätsberechnungen, sowie in SlideforNET, erlauben eine rasche und objektive Beurteilung der Wurzelwirkung in der Praxis (zum Beispiel auf Stufe Vorstudie). Für Fragestellungen wie die Priorisierung im Schutzwaldmanagement (Schwarz et al., 2019a;

Gasser et al., 2019) oder für risikobasierte Quantifizierungen von ingenieurbioologischen Massnahmen (Schwarz et al., 2017; Schwarz et al., 2019b) können erweiterte Modelle verwendet werden siehe z.B. SlideforMAP (Gasser et al., 2019) oder SOSlope (Cohen und Schwarz, 2017).

Quellen

Arce-Mojica T, Nehren U, Sudmeier-Rieux K, Miranda PJ, Anhuf D. 2019. Nature-based solutions (NbS) for reducing the risk of shallow landslides: Where do we stand? *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 41: 101293. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101293>.

Cohen D, Schwarz M. 2017. Tree-root control of shallow landslides, *Earth Surf. Dynam.*, 5, 451-477, <https://doi.org/10.5194/esurf-5-451-2017>

Dazio E, Conedera M, Schwarz M. 2018. Impact of different chestnut coppice managements on root reinforcement and shallow landslide susceptibility. *Forest Ecology and management* 417, 63-76.

Gasser E, Schwarz M, Simon A, Perona P, Phillips C, Hübl J, Dorren L. 2019. A review of modeling the effects of vegetation on large wood recruitment processes in mountain catchments. *Earth-Science Rev.* 194: 350–373. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.04.013

Gehring E, Conedera M, Maringer J, Giadrossich F, Guastini E, und Schwarz M. 2019. Shallow landslide disposition in burnt European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests. *Nature, Scientific Reports* 9, 8538 (2019).

Romang H., Margreth, S. 2008. Wirkung von Schutzmassnahmen (PROTECT). Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern 289 S.

Schwarz M, Preti F, Giadrossich F, Lehmann P, Or D. 2010. Quantifying the role of vegetation in slope stability: the Vinchiana case study (Tuscany, Italy). *Ecological Engineering* 36(3): 285-291. doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.06.014

Schwarz M, Lehmann P, Or D. 2010b. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes - from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (3), 354–367.

Schwarz M, Dorren L, Thormann J-J, 2012. SlideforNET: a web tool for assessing the effect of root reinforcement on shallow landslides. International conference, analysis and management of changing risks of natural hazards., Padua, Italy.

Schwarz M, Giadrossich F, Cohen D, 2013. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (11), 4367–4377.

Schwarz M, Rist A, Cohen D, Giadrossich F, Egorov P, Büttner D, Stolz M, Thormann J-J, 2015. Root reinforcement of soils under compression. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120 (10), 2103–2120.

Schwarz M, Cohen D, Louis K. 2017. Beurteilung der Wirkung biologischer Objektschutz Massnahmen: Anwendungsbeispiel des Modells SOSlope. *FAN Agenda* 2: 9-12.

Schwarz M, Dazio E, Pividori M, Bonardi M, Conedera M. 2019a. Ceduo castanile in aree ad elevato pericolo di frane superficiali: qua-

li opzioni selvicolturali? *Sherwood* 2/2019: 7-11.

Schwarz M, Dorren L, Kühne K. 2019b. Wirkung des Waldes gegen flachgründige Rutschungen und Risikoreduktion auf Bahnanlagen und Bahnbetrieb der SBB AG: Anwendung des Konzepts PROTECT Bio anhand von drei Fallbeispielen in den Kantonen TI und LU. Zollikofen: Hochschule Agrar- Forst- Lebensmittelwissenschaften, Projektbericht.

Schwarz M, Flepp G, Thormann JJ, Conedera M. 2019c. Schutzwirkung nach Waldbrand: Resilienz von Schutzwäldern nach Feuer – Quantifizierung der Schutzwirkung gegen flachgründige Rutschungen. Projektbericht WHFF.

Schwarz M. In Review. Wurzelverstärkung und Hangstabilitätsberechnungen: ein Überblick. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*.

Untersuchungen zur Verbesserung der Hangmurenbeurteilung

Roland Wyss ¹ (wyss@rwgeo.ch)
 Benjamin Stricker ¹ (stricker@rwgeo.ch)
 Ueli Gruner ² (ueli.gruner@k-h.ch)
 Markus Liniger ³ (markus.liniger@geotest.ch)

¹ Dr. Roland Wyss GmbH, Zürcherstrasse 105, 8500 Frauenfeld

² Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern

³ Geotest AG, Grisigenstrasse 6, 6048 Horw

Zusammenfassung

Spontane Rutschungen und Hangmuren werden heute oft auf der Basis der AGN-Methodik von 2004 beurteilt. Die Vollzugshilfe «Schutz vor Massenbewegungsgefahren» (BAFU, 2016) erläutert, wie mit spontanen Rutschungen und Hangmuren umgegangen wird. In einem Auftrag des BAFU hat eine Projektgruppe der AGN die Frage der Verbesserung der Beurteilungsmethodik untersucht (AGN, 2016).

Unter den prozessbeeinflussenden Faktoren von Hangmuren (Grunddisposition und spezifische Förderfaktoren) sind grundsätzlich die geologischen und die hydrogeologischen Faktoren ausreichend zu berücksichtigen. Namentlich sind dies die Lithologien der Fest- und der Lockergesteine, sowie deren hydrogeologische Disposition wie z. B. Wasserführung, Durchlässigkeit und Diskontinuitäten in Fest- und Lockergestein und die Reaktion der Wasserführung auf langanhaltende oder kurzzeitige Starkniederschläge.

In neun geologisch unterschiedlichen Testgebieten mit Hangmurenereignissen (OMM, Gurnigel-Flysch, Lias, Helvetikum (Drusberg-Decke, Stad-Mergel), Jura, USM, Nordpenninischer Flysch (Bündnerschiefer)) hat die Projektgruppe der AGN systematische Erhebungen zur Geologie, Hydrogeologie und Lockergesteinseigenschaften (Silt-/Tongehalt, Plastizität) gemacht. Es ergibt sich eine klare Korrelation zwischen erkannten Hangmuren-Anrissgebieten und hydrogeologischen

Förderfaktoren wie wasserführende Felschichten im Untergrund, Stauhorizonte im Felsuntergrund, Hinweise auf wasserführende Lockergesteinsschichten bzw. -rinnen. Die Korrelation von Hangmuren-Anrissgebieten mit den Silt-/Tongehalten ist jedoch nicht systematisch. Teilweise gibt es auch Anrissgebiete mit niedrigen Silt-/Tongehalten, wobei dort aber andere Förderfaktoren eine Rolle spielen.

Die lokale, direkte Erkundung des geologischen-hydrogeologischen Untergrundes im Feld ist ein wichtiges Element bei der Hangmurenbeurteilung. Verwitterungsprozesse und die glaziale Überprägung liefern Angaben zu wichtigen Beurteilungsparametern, wie Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht, Vorhandensein von Durchlässigkeitsdiskontinuitäten und Lage des Felsuntergrundes. Sondierungen mit Bohrstock erlauben kostengünstig eine bessere Kenntnis der Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht und damit oft eine Abstufung der Gefährdung in den Ausbruchgebieten, z. B. bei der Gefahrenbeurteilung oder für Objektschutzgutachten.

Basierend auf den Arbeiten der Projektgruppe der AGN wurde im Auftrag der SBB eine praxisnahe Methodik zur Dispositionsanalyse für den Prozess Hangmuren entwickelt.

Entlang der Bahnlinie Gümligen BE – Fluhmühle LU wurden basierend auf bestehenden Daten mit Hilfe eines Grobscreenings über 400 potenzielle Hangmuren-Anrissgebiete identifiziert (Teilprojekt 1).

Aufgrund von Prozessmodellierungen mittels RAMMS ergaben sich in diesen Anrissgebieten 70 potenziell betroffene Streckenabschnitte. Der zweite Arbeitsschritt mit Erhebungen im Feld und einer Detailbeurteilung ist noch ausstehend.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Bei der Beurteilung von Hangmuren und spontanen Rutschungen bestehen oft Unsicherheiten, was in der Umsetzung in Gefahrenkarten, in der Raum- respektive in der Ortsplanung Folgen haben kann, da entsprechende Flächen zu gross oder zu ungenau ausgedelimitiert werden.

Hangmuren und spontane Rutschungen werden heute oft auf der Basis der AGN-Methodik von 2004 (AGN, 2004) beurteilt. Dies ist eine pragmatische Methode, welche zu einer gut nachvollziehbaren Bestimmung potenzieller Anrissgebiete führt. Die Vollzugshilfe «Schutz vor Massenbewegungsgefahren» (BAFU 2016) erläutert, wie mit spontanen Rutschungen und Hangmuren im Sinn des eidgenössischen Waldgesetzes umgegangen wird. Im Anhang der Vollzugshilfe werden zwei Methoden zur Bestimmung der Eintretenswahrscheinlichkeiten dargelegt. Diejenige mit dem Flussdiagramm basiert auf der AGN-Methodik aus dem Jahr 2004 und wurde von der AGN im Auftrag des ehemaligen Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG entwickelt.

Die konsequente Anwendung der Methode hat aber auch Mängel und behandelt gewisse Aspekte nicht:

- Es entstehen oft zu grosse Gefahrenflächen (vor allem blaue Gefahrenstufe), obwohl Ereignisse zeigen, dass innerhalb der Flächen sehr wohl grosse Unterschiede bezüglich Disposition auftreten.
- Mit der Methode können nur Aussagen zum Ort von möglichen Ausbrüchen gemacht werden, nicht aber zu den Intensitäten.
- Die Prozessräume können mit der AGN-Methode nicht abgegrenzt werden.

Die Abteilung Gefahrenprävention des BAFU beauftragte ein Projektteam aus der Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren (AGN) der Schweizerischen Fachgruppe für Ingenieurgeologie (SFIG-GSGI), Verbesserungsvorschläge für die Beurteilung der Hangmuren auszuarbeiten.

Die Resultate dieser Untersuchungen wurden in einer Dokumentation zuhanden des BAFU festgehalten (AGN, 2016) und in einem Artikel zusammenfassend publiziert (Wyss et al., 2018).

Die gute Feldansprache für Abschätzungen oder Modellrechnungen ist von zentraler Bedeutung. Dies war der wesentliche Inhalt des Projekts der AGN. Zur bestehenden Methodik für die Aufnahme von spontanen Rutschungen und Hangmuren der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) wurden Vorschläge erarbeitet und es wurde eine Feldmethode zur Bestimmung der Plastizität von Lockergesteinen des GEOLEP (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL) getestet (Boll-Bilgot & Parriaux, 2018).

Aufbauend auf der Publikation der AGN (Wyss et al., 2018) hat die Dr. Roland Wyss GmbH im Auftrag der SBB eine praxisnahe Metho-

dik zur Dispositionsanalyse für den Prozess Hangmuren entwickelt. Die zweistufige Methodik gliedert sich in ein geodatenbasiertes Grobscreening und ein Detailscreening. Das Grobscreening ermöglicht die effiziente Identifikation potenzieller Hangmuren-Anrissgebiete auf grossen Flächen. Mit den ermittelten Anrissgebieten können mittels RAMMS potenzielle Prozessräume und Intensitäten im Gleisbereich ermittelt werden.

1.2 Definitionen

Bei flachgründigen (bis mittelgründigen) Hangmuren und spontanen Rutschungen handelt es sich um zwei Endglieder von Prozessen, welche aber graduell ineinander übergehen können. Sie werden beide bei starken oder langanhaltenden Niederschlägen ausgelöst. Die geologisch-geotechnischen Eigenschaften der Lockergesteinsschichten und hohe Porenwasserdrücke in den Lockergesteinen haben dabei entscheidenden Einfluss bei der Prozessauslösung und beim Prozessablauf. Im Gegensatz zur strengen Definition der spontanen Rutschungen in AGN 2004 als rasche Aktivierung von Teilen von permanenten Rutschungen wird im Folgenden der Begriff erweitert verwendet: spontane Rutschungen können sich auch in normalerweise stabilen Gebieten ereignen (s. auch BAFU, 2016).

Hangmuren

Hangmuren entstehen durch hohe Porenwasserdrücke im Lockergesteinsuntergrund. Durch Wasserzufuhr aus dem Gebirge oder aus anthropogenen Quellen entsteht im Lockergestein ein Überdruck und es kommt zum Grundbruch mit einem meist turbulenten Abgang des wassergesättigten Lockermaterials. In Österreich wird auch der Begriff «Hangwasserexplosion» verwendet. Meist ist der austretende Wasserschwall aber nicht direkt beobachtbar. Hangmuren ereignen sich oft

in geschichteten Lockergesteinseinheiten mit unterschiedlich durchlässigen Schichten. Das mobilisierte Material bewegt sich weitgehend aufgelöst, als wassergesättigte oder übersättigte turbulente Masse aus Lockermaterial, Boden und Bewuchs. Hangmuren können hohe Geschwindigkeiten (bis zu 15 m/s) erreichen und dadurch eine grosse Reichweite und zerstörerische Wirkung haben.

Spontane Rutschungen

Spontane, meist flachgründige Rutschungen können sich aus Rutschgebieten, in stabilen Lockergesteinshängen oder als Hautrutschung der Verwitterungs- und Humusschicht auf Fels ereignen. Spontane Rutschungen sind gekennzeichnet durch eine basale Scherfläche. Es kommt im Untergrund meist durch erhöhte Porenwasserdrücke im Bereich der Gleitfläche zu einem Scherbruch. Auf der sich bildenden Verschiebungsfläche gleitet die Rutschmasse mehr oder weniger kompakt als zusammenhängende Masse ab und überfährt das Vorland.

Die Bewegungen sind eher langsam. Dabei kommt es an der Front zu Aufstauchungen. Bei hohem Wassergehalt oder Zutritt von Fremdwasser ist aber auch ein hangmurenartiger, schnellerer Abgang möglich. Im englischen Sprachgebrauch wird auch zwischen «first move» (Initialprozess, spontane Rutschung) und «second move» (Ausbreitungsprozess, Hangmure) unterschieden (s. auch BAFU 2016).

2 Die Beurteilung von Hangmuren und spontanen Rutschungen

2.1 Grundsätze

Grundsätzlich basieren die Gefahrenbeurteilungen in der Schweiz auf drei Standbeinen:

- Historische Ereignisse, welche im sogenannten **Naturereigniskataster** zusammengefasst werden.

- Geländebeobachtungen mit Kartierung der prozessspezifischen Spuren im Gelände, welche in der **Karte der Phänomene** dargestellt werden.
- **Berechnungen** mit prozessspezifischen Berechnungsmodellen oder empirischen Schätzmethoden.

Aufgrund dieser drei Hilfsmittel müssen Aussagen zu Prozesshäufigkeiten und Prozessintensitäten gemacht werden. Die Einstufung in die Gefahrenstufen (rot, blau, gelb, gelbweiss, weiss) erfolgt nach den schweizweit gültigen Vorgaben, basierend auf dem Intensität-Wahrscheinlichkeits-Diagramm. Dabei werden Spezifizierungen für gewisse Prozesse vorgenommen (BAFU 2016).

Die Berechnungsmodelle für Hangmuren und spontane Rutschungen sind nicht sehr weit entwickelt. Einerseits gibt es gängige geotechnische Modelle, welche die Entstehung von Scherbrüchen berechnen bzw. Aussagen zum Fliessverhalten und zur Ausbreitung von spontanen Rutschungen und Hangmuren liefern können. Die Resultate sind aber oft nicht plausibel bzw. nicht nachvollziehbar und stimmen mit tatsächlichen Ereignissen nur teilweise überein. Andererseits bestehen heute auch physikalische Modelle, welche die Ausbreitung und das Fliessverhalten von Hangmuren nachrechnen können. Aber auch hier bestehen Unschärfen, weil die Datengrundlage oft lückenhaft ist und die relevanten Eingabeparameter im Gelände in der Regel nur schwer zu bestimmen sind.

2.2 Wichtige prozessbeeinflussende Faktoren

Die Entstehung von Hangmuren oder spontanen Rutschungen wird im Wesentlichen durch die Grunddisposition und durch die variable Disposition begünstigt: Bei der **Grunddisposition** sind die Hangneigung und die physikalischen Eigenschaften des Lockergesteins die massgebenden, prozessbeeinflussenden

Faktoren. Für vergleichbare geologische Einheiten (z. B. Geotypen, vgl. Parriaux et al. 2007, 2015) lässt sich empirisch mit Ereignissen, Ereignisspuren und allenfalls ergänzt mit geotechnischen Berechnungen eine kritische Hangneigung bestimmen (statistischer Wert einer kritischen Hangneigung). Die Grunddisposition wird durch **spezifische Förderfaktoren** beeinflusst.

Es sind dies:

- Lokale topografische und hydrologische Verhältnisse.
- Spezielle lokale geologische und hydrogeologische Verhältnisse.

Bei der **variablen Disposition** bildet der Wassergehalt in Boden und Untergrund den massgebenden, prozessbeeinflussenden Faktor. Die variable Disposition kann durch weitere **spezifische Förderfaktoren** beeinflusst werden. Wichtigste Faktoren sind dabei: biologische und anthropogene Einflüsse. Als eigentlicher **Auslöser** wirken letztlich Starkniederschläge. Zur Hangmure oder zur spontanen Rutschung kommt es dann, wenn die variable Disposition und die auslösenden Niederschläge zusammen den kritischen Wert für einen Grundbruch oder einen Scherbruch überschreiten. Vereinfachend kann gesagt werden, dass die Entstehung einer Hangmure im Wesentlichen durch die Hangneigung, die geologischen Verhältnisse, durch das in Boden und Untergrund vorhandene Wasser sowie den Niederschlag bestimmt wird.

Die kritische Hangneigung

Mittels einer statistischen Hangneigungsanalyse von dokumentierten Ereignissen eines Untersuchungsgebietes mit vergleichbarer Lockergesteinsbedeckung (Kataster, Spuren im Gelände) kann eine kritische Hangneigung bestimmt werden. Dabei wird ein Mittelwert errechnet (i_{quer}), abzüglich der Standardabweichung (i_s); dies ergibt den so genannten

Schwellenwert (kritische Hangneigung $i = i_{\text{quer}} - i_s$). Bei geringer Datenmenge können auch Werte aus benachbarten Gebieten mit vergleichbaren geologischen Verhältnissen mitberücksichtigt werden. Grundsätzlich muss eine kritische Hangneigung im Zusammenhang mit der Jährlichkeit von Niederschlagsereignissen beurteilt werden.

Die spezifischen Förderfaktoren

Bei den vier Gruppen spezifischer Förderfaktoren sind grundsätzlich verschiedene Hauptaspekte zu beurteilen:

1. Topografische und hydrologische Faktoren: Ausdehnung und Form der Hangpartie, spezielle Geländeformen (z. B. Rinnen), Vernässungen
2. Geologische und hydrogeologische Faktoren: Lage der Felsoberfläche/des Wasserstauers, Auftreten von stark wasserführenden Schichten im Untergrund (Lockergestein und Fels), Schwankung Bergwasserspiegel, Verkarstung, Kluftsysteme etc.
3. Biologische Faktoren: Viehgangeln, Wald, Vegetation
4. Anthropogene Faktoren: Landnutzung, Strassenentwässerung, aktuelle und alte Drainagen etc.

2.3 Geologische und hydrogeologische Förderfaktoren

Die geologischen und hydrogeologischen Faktoren werden heute bei der Beurteilung von Hangmuren und spontanen Rutschungen vielfach zu wenig berücksichtigt. Oft sind diese auch nicht bekannt. Sie treten aber bei Ereignissen zutage. Daher sind gute Ereignisdokumentationen mit Ursachenanalyse sehr wichtig.

In der Karte der Phänomene werden nur Spuren von Prozessen dokumentiert. Für wirklich aussagekräftige Beurteilungen müssen geologisch relevante Informationen zwingend be-

rücksichtigt werden.

- Der geologische Untergrund beeinflusst entscheidend die Entstehung von spontanen Rutschungen und Hangmuren auf verschiedene Arten. Hänge mit mergeligem Untergrund (z. B. Palfris Mergel, Grisigen-Mergel, Opalinuston etc.) sind extrem rutschanfällig. Hänge mit unterschiedlich durchlässigem Aufbau sind deutlich rutschanfalliger als homogen aufgebaute Hänge.
- Die Ereignisse von 2005 (langanhaltende Niederschläge in weiten Teilen der Schweiz) zeigten zudem den starken Einfluss von Karstwasser auf die Entstehung von Hangmuren. Hydrogeologische Überlegungen gehören daher in Gebieten mit Karstgesteinen im Untergrund zu jeder seriösen Gefahrenbeurteilung.

Die verbesserte Erfassung der geologischen und der hydrogeologischen Förderfaktoren und deren Bedeutung in der Beurteilung der Gefährdung war daher ein wichtiger Teil der durchgeführten Arbeiten.

3 Felduntersuchungen AGN

3.1 Untersuchte Gebiete

Es wurden in neun Gebieten vertiefte Untersuchungen durchgeführt (Tabelle 1 und Figur 1). Kriterien für die Auswahl eines Gebietes waren: Möglichst aktuelle Hangmurenereignisse, Verfügbarkeit von Daten und unterschiedliche geologisch-hydrogeologische Disposition.

Neben geologischen Feldaufnahmen wurden in allen Gebieten Plastizitätsanalysen mit der Methode GEOLEP (Boll-Bilgot & Parriaux 2018) durchgeführt. In gewissen Gebieten wurde die Methode GEOLEP flächig angewandt und bezüglich Grundbeurteilung und Verbesserung der Ausbruchprognose getestet. In anderen Gebieten wurde mit Einzelmessungen in begrenztem lokalem Rahmen versucht,

eine Erklärung zu finden, wieso im gleichen Hang an einer Stelle eine Hangmure ausbrach, daneben aber nicht.

Tabelle 1: Untersuchungsgebiete

Gebiet	Geologie/ Tektonik	Gefahren- karte	Methoden- test
Trubschachen	Mittelländische, flachliegende Molasse, OMM	Grösster Teil nein	Flächig
Eltschingera	Préalpes, Gurnigel-Flysch	Nein (Gefahrenhinweiskarte Rutschungen und Hangmuren)	Flächig
Alpnachstad	Helvetikum, Drusberg-Decke, Stad-Mergel	Ja	Lokal, Detailtest
Ennetbürgen	Helvetikum, Drusberg-Decke, Stad-Mergel	Ja	Lokal, Detailtest
Les Avants	Préalpes: Lias	Ja	Flächig
Travers	Jura	Ja	Flächig
Schwellbrunn	Subalpine Molasse, USM	Nein	Flächig
Altstätten	Subalpine Molasse, USM	Ja	Lokal, Detailtest
St. Antonien	Nordpenninischer Flysch, Bündnerschiefer	Nein	Lokal, Detailtest

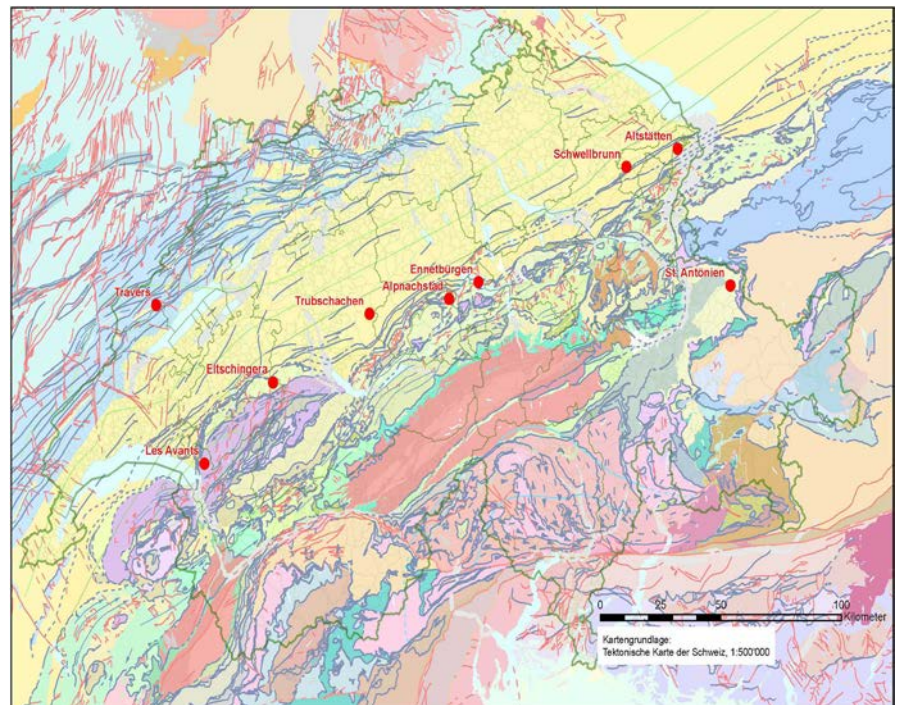


Abbildung 1: Lage der untersuchten Gebiete

3.2 Durchgeführte Untersuchungen

Vorgängig zu den Feldarbeiten wurden für die einzelnen Gebiete die bestehenden geologischen und hydrogeologischen Karten und Berichte, Luftbilder, digitale Terrainmodelle und weitere Unterlagen gesichtet und die Informationen bezüglich Hangmuren beurteilt. Im Feld selber erfolgte eine Erhebung der geologischen, hydrogeologischen, geomorphologischen, hydrologischen, boden- und vegetationskundlichen Daten sowie der anthropogenen Faktoren gemäss Aufnahmeformular der WSL. Dabei wurden die Lockergesteinsbedeckung, der Felsuntergrund und die Verwitterungszone beurteilt. Für die Untersuchung der Lockergesteinsbedeckung erwies sich der Bohrstock als ausgesprochen effizientes Werkzeug. Zusätzlich konnten mit dem Bohr-

stock Proben für die Bestimmung des Silt-/ Tongehaltes und der Plastizität im Feldlabor gewonnen werden.

Die verschiedenen Gebiete wurden mit einem einheitlichen Raster beschrieben und beurteilt:

- Disposition: Lage, Ereignisse, Geologie und Hydrogeologie, Hangneigung, Geodaten (DTM und dessen Derivate, Orthofotos, Luftbilder, Bodendaten etc.), bestehende Gefahrenkarten
- Durchgeführte Felduntersuchungen: Anzahl und Lage der Probenahmestellen, Beschreibung der Proben
- Ergebnisse: Korngrößenverteilung und Plastizität der untersuchten Proben
- Interpretation: Beurteilung der Proben bezüglich Silt-/Tongehalt vs. Plastizitätsindex und Hangneigung

- Vergleich der Ergebnisse mit den geologisch/hydrogeologischen und geomorphologischen Randbedingungen
- Zusammenfassung, Fazit für das jeweilige Testgebiet (s. auch Tabelle 2)

3.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Die Befunde in den einzelnen Gebieten lassen sich wie folgt zusammenfassen (Tabelle 2): In den Gebieten mit flächiger Fragestellung sind die statistischen Aussagen besser, da auch eine höhere Probenzahl vorhanden ist. In den Gebieten mit lokaler Perspektive konnte die Sensitivität der Methode getestet werden. In diesen Gebieten stand die Fragestellung im Vordergrund, welche Verbesserung die Methode in der Hangmuren-Ausbruchbeurteilung bringt. Das Gebiet Alpnachstad ist wegen sei-

Tabelle 2: Zusammenstellung der wichtigsten Parameter der verschiedenen Untersuchungsgebiete

Gebiet	Stumme Zeugen / Ereignisse	Nieder-schlag (Intensität/ Dauer)	Hydrogeol. Förder-faktoren	Hangnei-gung [°]	Deckschichten (Art, Mächtigkeit)	Plastizität (typischer Wert, in %)
Gebiete mit flächiger Fragestellung						
Trubschachen (18 Proben)	ja	lang	ja	25–40	Hanglehm/ Hangschutt 1–3 m	22–27
Eltschingera (18 Proben)	ja	lang	ja	20–30	Hangschutt 0.3–1 m	30
Les Avants (18 Proben)	ja	lang	ja	25–30	Hangschutt 0.5–1 m	7
Travers (20 Proben)	ja	lang	ja	10–15	Hangschutt 0.5–2 m	15
Schwellbrunn (9 Proben)	ja	kurz	ja	24–28	Hangschutt 0.5–1 m	13
Gebiete mit lokal begrenzter Fragestellung						
Alpnachstad (4 Proben)	ja	lang	nein	25–30	Moräne 0.5–0.55 m	22
Ennetbürgen (13 Proben)	ja	lang u. kurz	Nein (ja*)	24–30 (40*)	Moräne (0.2*) 0.5–0.55 m	(3*) 7
Altstätten (4 Proben)	ja	lang	ja	25–40	Moräne 0.5–2 m	10
St. Antönien (4 Proben)	ja	lang	ja	25–35	Moräne 0.5–2 m	3

(*) Probe 2 Ennetbürgen: Eindeutig hydrogeologischer Einfluss.

ner Homogenität nicht relevant, wurde aber vor allem wegen bereits existierenden Berechnungen für die Einwirkungen (Gebäudestatik, erste Ramms-Modellierungen; Egli 2009, 2011; Loup et al. 2012) gewählt, um in einem späteren Arbeitsschritt die Hangmurenmodellierungen unabhängig prüfen zu können.

3.4 Zusammenfassung der Resultate

Bezüglich Hangneigungen und Plastizitäten weisen die untersuchten Gebiete heterogene Charakteristika auf. Die Rutschungen in Travers fallen bezüglich Hangneigungen aus dem Rahmen. Die geologischen und hydrogeologischen Bedingungen sind hier aber auch deutlich anders als bei den anderen Testgebieten. Allen untersuchten Gebieten gemeinsam sind hydrogeologische Förderfaktoren wie:

- wasserführende Felsschichten im Untergrund,
- Felsoberfläche als Stauhorizont
- Hinweise auf wasserführende Lockergesteinsschichten bzw. -rinnen.

Über alle Gebiete zusammen betrachtet ergibt sich erwartungsgemäss eine Korrelation zwischen dem Plastizitätsindex und dem Silt-/Tongehalt der gemessenen Proben. Anrissbereiche gibt es, für jedes Gebiet gesondert betrachtet, vorwiegend bei Standorten mit hohen Plastizitätswerten und entsprechend hohen Silt-/Tongehalten. Die Grenzwerte variieren jedoch mit den geologischen Verhältnissen, wie nicht anders zu erwarten war. Die Hangneigung und die spezifischen Förderfaktoren spielen jeweils eine entscheidende Rolle. Das Gesamtsystem ist nicht nur durch zwei Parameter bestimmbar.

Zwischen der Hangneigung und den Silt-/Tongehalten ist sowohl in Gebieten mit flächiger als auch in Gebieten mit lokaler Fragestellung keine Korrelation zu erkennen. Ohne Einbezug der Daten von Travers (spontane Rutschung bei sehr geringer Hangneigung, gibt es, mit ei-

ner Ausnahme, jedoch keine Anrissbereiche in Gebieten mit Hangneigungen kleiner als 20° und mit Silt-/Tongehalten kleiner als 50 %. Die Ausnahme (Altstätten) befindet sich oberhalb einer Hangkante.

Generell kann festgehalten werden, dass vergleichsweise höhere Plastizitätswerten auch eine erhöhte Tendenz zu Hangmuren zur Folge haben. Eine allgemeine Korrelation zwischen Plastizität und Anriss von Hangmuren ist jedoch nicht ersichtlich. Jedes geologisch «einheitliche» Gebiet hat seine eigenen Charakteristika und muss individuell beurteilt werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass für geologisch einheitliche Gebiete eine Korrelation zwischen Plastizität und Hangmurenrisiko grundsätzlich möglich ist. Dies ist jedoch auf einer grösseren Datenbasis noch zu beweisen. Am Beispiel Trubschachen mit einer recht homogenen Geologie konnte gezeigt werden, dass eine differenzierte Beurteilung im Feld auch eine differenzierte Gefahrenbeurteilung ermöglicht: Bei vielen Talflanken mit einer Hangneigung über dem kritischen Wert von 25° waren die Plastizitäts- und Silt-/Tongehalte jeweils hoch (Hanglehm), was einen blauen Gefahrenbereich (HM5) ergeben würde. Dort hingegen, wo – ebenfalls bei Talflanken von >25° – die Plastizitäts- und Silt-/Tongehalte relativ niedrig waren (sandige Moräne), wäre die Ausscheidung eines gelben Gefahrenbereichs möglich. Mit einer solchen Differenzierung wäre es hier also möglich, anstatt einen flächigen, blauen Gefahrenbereich eine verfeinerte Gefahrenkarte auszuschneiden.

4 Eigene Untersuchungen

4.1 Ausgangslage und Vorgehen

Im Auftrag der SBB wurde in den Jahren 2018/19 eine Dispositionsanalyse für den Prozess Hangmuren auf der SBB-Linie Gümli-Genève BE – Fluhmühle LU (Streckenlänge 83 km) durchgeführt. Anlass dazu war die infolge limitierter Mittel auf Nebenstrecken oft un-

genügende Kenntnis der Gefährdung durch Naturgefahren, obschon abschnittsweise eine hohe Gefährdung besteht. Als Entscheidungshilfe für den zielgerichteten Mitteleinsatz benötigten die SBB deshalb ein praxistaugliches und robustes Werkzeug für grossräumige Streckenscreenings.

Die Methodik des Vorgehens stützte sich dabei weitgehend auf die Empfehlungen der AGN (AGN 2004), die Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement des BAFU (BAFU 2016) sowie das AGN-Projekt «Hangmurenbeurteilung» (AGN 2016, publiziert in: Wyss et al. 2018). Ziel von Teilprojekt 1 (geodatenbasiertes Grobscreening) war die Entwicklung einer Methodik zur Identifikation potenzieller Hangmuren-Anrissgebiete, von denen ausgehend der Gleisbereich erreicht oder destabilisiert werden könnte. Die Methodik sollte sich dabei auf bestehende Daten abstützen, flächendeckend sein und ohne wesentliche gutachterliche Arbeitsschritte auskommen.

Für das Grobscreening wurden die bestehenden Daten gemäss Tabelle 3 und Abbildung 2 verwendet.

Tabella 3: Für Grobscreening verwendete Daten.

Datensatz	Inhalt	Qualität
SwissAlti3D	Digitales Terrainmodell (Swisstopo)	Flächendeckend, homogen
Geocover, geologischer Atlas GA25	Geologie	Flächendeckend, heterogen, variabler Detailgrad
Amtliche Vermessung und IVEG SBB	Bodenbedeckung	Überwiegend flächendeckend homogen, Detailgrad gering, im Nahbereich SBB höherer Detailgrad
Oberflächenabfluss	Hinweiskarte für potenziell vom Prozess betroffene Gebiete	Modellierte Daten, welche u.a. ebenfalls auf der Bodenbedeckung aufbauen
Erdbauwerk SBB	Dämme und Einschnitte des SBB-Trassees	Geometriedaten homogen, Sachdaten lückenhaft
Schutzbautenkataster SBB	Schutzbauten gegen Naturgefahren	Geometriedaten homogen, Sachdaten lückenhaft
Ereigniskataster (EK) Kantone (StorMe) und SBB	Dokumentierte Ereignisse	Geometrie- und Sachdaten heterogen; Hinweis: Der EK wurde ausschliesslich zur Überprüfung der Qualität der Modellergebnisse verwendet.
Gefahrenkarten, Gefahrenbeurteilungen	Bestehende Gefahrenkarten und -beurteilungen	Nur in Teilbereichen vorliegend

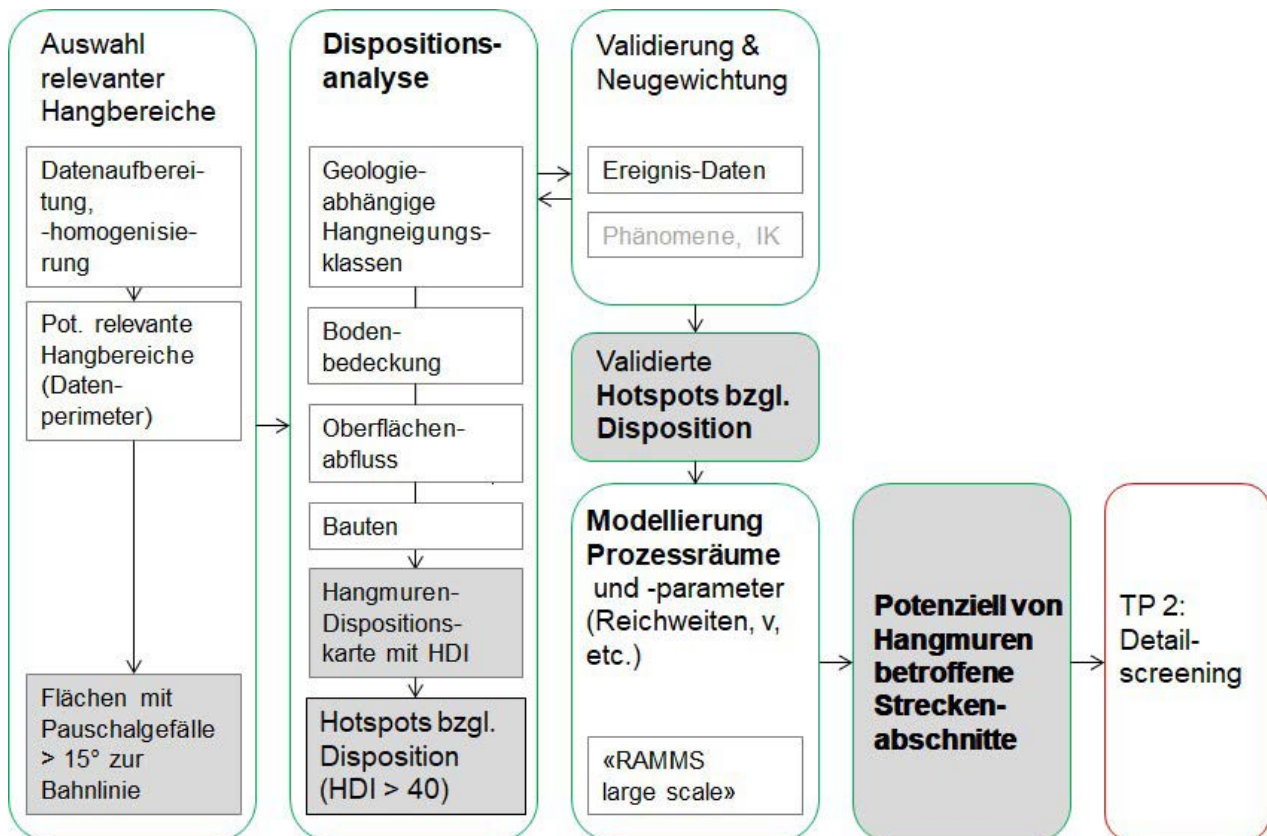


Abbildung 2: Konzept Grobscreening (grün: Teilprojekt 1; rot: Teilprojekt 2, pendent). (Abkürzung HDI: Hangmuren-Dispositionsindex.)

Für die Dispositionsanalyse wurden im Untersuchungsgebiet (Fläche der aufgrund des Pauschalgefälles potenziell relevanten Hangbereiche, ca. 12 km²) zehn Klassen mit vergleichbarer Geologie ausgeschieden (z. B. «Moräne», «Hanglehm», etc.). Pro Klasse wurden anschliessend basierend auf vorliegenden regionalen Ereignisanalysen kritische Hangneigungen für geringe, mittlere und hohe geologische Disposition definiert und eine Gewichtung vorgenommen. Für Hänge mit geringer (in Abhängigkeit der Klasse <16 bis 30°) und sehr grosser (pauschal >50°) Hangneigung wurde keine geologische Disposition angenommen.

Die Bodenbedeckung wurde grob klassiert und ebenfalls gewichtet. Der Einfluss von Oberflächenabfluss wurde aufgrund der Fliesstiefe gewichtet. Die Klassierung von Erdbauwerken und Schutzbauten erfolgte in Abhängigkeit von Typ und Baujahr.

Aus den Einzelfaktoren wurde ein auf 100 normierter Hangmuren-Dispositionsindex (HDI) abgeleitet:

$$\text{HDI} = (\text{Geo/Hang} \times \text{Boden} \times \text{OA} \times \text{Bauten}) / 16.5 \times 100$$

Die rechnerisch generierten Dispositionsflächen wurden generalisiert und bezüglich Kleinflächen bereinigt. Flächen mit einem HDI >40 (Hotspots bezüglich Disposition) wurden als potenzielle Anrissgebiete für die anschliessende Modellierung mit «RAMMS large scale» durch das SLF verwendet. Die Inputparameter für die RAMMS-Modellierungen wurden aufgrund vorliegender regionaler Ereignisanalysen und Studien und eigener Sensitivitätstests festgelegt.

Der zweite, noch pendente Arbeitsschritt (Teilprojekt 2) umfasst ein Detailscreening. Dabei sind folgende Arbeitsschritte vorgesehen:

- Auswahl von Gebieten für gutachterliche Detailabklärungen.
- Erhebungen vor Ort (Landnutzung, Vegetation, Aufbau Boden und Untergrund, Diskontinuitäten, Hangwasser, anthropo-

gene Faktoren, etc.)

- Detailbeurteilung (Disposition, Eintretenswahrscheinlichkeit, Reichweite, Intensität etc.).
- Gefahren- und Risikobeurteilung.

4.2 Ergebnisse Grobscanning

In den für die Bahnlinie relevanten Hangbereichen wurden aufgrund des Grob screenings über 400 Hotspots hangseitig der Bahnlinie eruiert. Die Flächen der Anrissgebiete weisen einen Mittelwert von ca. 250 m² auf (Minimum 16 und Maximum 6700 m²). Talseitig der Bahnlinie wurden 270 weitere Hotspots identifiziert. Diese gelten als Hinweisbereiche für potentielle talseitige Hanginstabilitäten.

Aufgrund der Prozessmodellierungen mittels RAMMS ergaben sich 70 potenziell betroffene Streckenabschnitte, welche eine durchschnittlichen Länge von 170 m aufweisen.

Die Stärken des gewählten Vorgehens be-

stehen in der Möglichkeit zum robusten Screening einer grossen Fläche, der generell schweizweiten Anwendbarkeit und in der Objektivität der Methodik. Zu berücksichtigende Limiten respektive Unsicherheiten des Modells bestehen hinsichtlich «Trefferquote» (es gibt z.B. Gebiete mit bekannten Ereignissen, aber ohne hohe Disposition), der Gewichtung der einzelnen Inputfaktoren und Annahmen, der Berücksichtigung von Prozessübergängen (insbesondere Gerinneprozesse) sowie der Verfügbarkeit, Qualität und Auflösung erforderlicher Daten.

Der gewählte Ansatz ist geeignet für großflächige Screenings bezüglich potenzieller Ereignisse mit einer Wiederkehrperiode in der Grössenordnung von rund 100 Jahren. Für eine Gefahrenkartierung oder eine Einzelfallbeurteilung sind jedoch zusätzliche Untersuchungen erforderlich.

Tabelle 4: Gutachterlich definierte Gewichtung der Inputdaten.

Gewichtung	Input-Faktor
1 bis 3	Geologie-abhängige Hangneigungsklassen (Geo/Hang)
0 bis 2	Bodenbedeckung (Boden)
1 bis 2.5	Oberflächenabfluss (OA)
0.05 bis 1.1	Schutzbauten (Bauten)

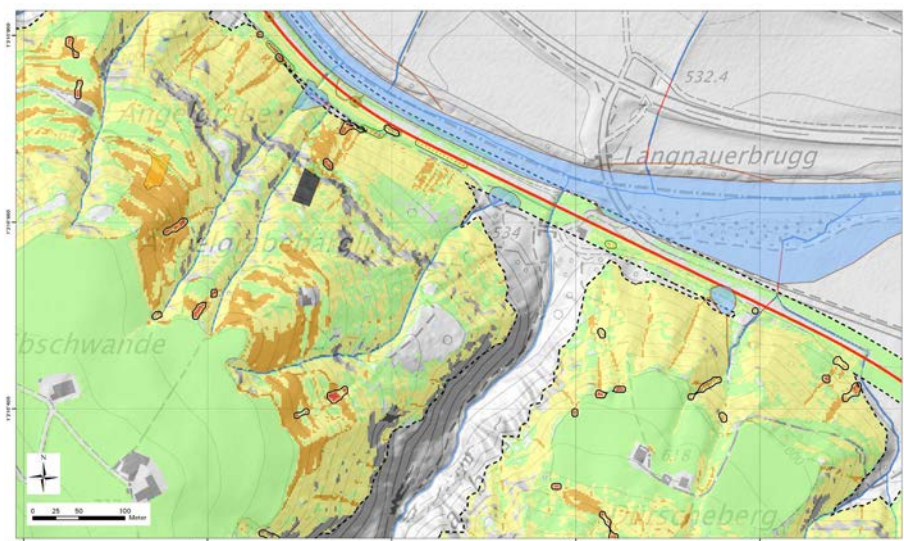


Abbildung 3: Hotspots bezüglich Disposition für Hangmuren (Bsp. Langnauerwald zwischen Malters und Wolhusen). Rot: HDI > 40.

5 Beurteilung der Hangmurengefährdung

5.1 Disposition und Ausbruchgebiet

Alle durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass für die Beurteilung der Hangmurengefährdung die geologisch-hydrogeologische Grunddisposition und die Hangneigungen eine entscheidende Rolle spielen.

Auf der Stufe Gefahrenkarte bietet die Methodik AGN 2004 (s. auch BAFU 2016) eine gute Grundlage für die Beurteilung der Ausbruchgebiete. Beim Vorhandensein von gut erhobenen Ereignisdaten ist eine Beurteilung der Ausbruchgebiete mit dieser Methode bereits heute recht zuverlässig. Ergebnisse aus Untersuchungen wie der vorliegenden sind hilfreich für die bessere Erkennung und Berücksichtigung von Grunddisposition und Förderfaktoren.

Ohne Ereignisse bestehen jedoch meist Unsicherheiten bei der Beurteilung der mobilisierbaren Lockergesteinsdecke und der Lage der Felsoberfläche, was Unsicherheiten in der Beurteilung von Disposition und Intensitäten zur Folge hat. Mit der bestehenden Methode AGN 2004 entstehen relativ grosse Gefahrenflächen, welche nie gesamthaft aktiv sind. Eine bessere Beurteilung und feinere Unterteilung der grossen Flächen bezüglich dem gefährdeten Schadenpotential ist deswegen oft erwünscht. Die Beurteilungsgenauigkeit der Ausbruchgebiete durch vertiefte Untersuchungen wie z. B. einfache Handsondierungen mit Korngrössenanalysen, evtl. ergänzt mit Plastizitätsmessungen mit der GEOLEP-Methode kann verbessert werden. Schon allein die Bohrstocksondierungen führen zu einer Verbesserung der Beurteilungsdatenlage bezüglich Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht, der Durchlässigkeitsunterschiede und der Lage der Felsoberfläche. Die Korngrössenverteilung der Deckschichten erlaubt eine Abschätzung der Durchlässigkeitskontraste in Bezug auf den unterliegenden Fels. Damit las-

sen sich einheitlich beurteilte Flächen besser aufgliedern (Bsp. Ennetbürgen).

5.2 Transit- und Ablagerungsbereich

Mit der Methode AGN 2004 kann keine direkte Aussage über Intensitäten im Transit- und Ablagerungsbereich sowie zu den Reichweiten von Hangmuren gemacht werden. Meist werden diese gutachterlich in Analogie zu bekannten Ereignissen oder mit einfachen Modellrechnungen bestimmt. Im Vorschlag der AGN wird aber darauf hingewiesen, dass die Berücksichtigung des Staudrucks (kinetische Energie) für die Beurteilung der Intensität berücksichtigt werden sollte. Es gibt neuere Simulationsmodelle für Hangmuren (z. B. neuere Version RAMMS), welche Energien und Reichweiten heute besser berechnen und modellieren können.

5.3 Beurteilung der Ausbruchshäufigkeit

Die Beurteilung der Ausbruchshäufigkeit ist primär abhängig von der Eintretenswahrscheinlichkeit von Starkniederschlägen, der Hangneigung und dem Einfluss von Förderfaktoren. Das heisst, dass mit den für die vorliegenden Untersuchungen angewandten Methoden keine signifikante Verbesserung der Beurteilung der Hangmuren Häufigkeit erreicht werden kann.

6 Fazit

Verschiedene Faktoren begünstigen die Entstehung von Hangmuren. Der Einfluss dieser Förderfaktoren ist fallweise zu prüfen. Grosses Gewicht haben die Präsenz aktiver oder alter Massenbewegungen, die Beschaffenheit des Felsuntergrundes, dessen Hydrogeologie, die Art der Lockergesteinsbedeckung, deren Plastizität und die Korngrössenverteilung, die Landnutzung, die potentiellen Wassereinflüsse in Gebirge und im Hangbereich (Sättigung des Lockergesteins, Druck, Strömungskraft) sowie anthropogene Faktoren.

Es ist notwendig, weitere Erfahrungen zu sammeln, um die Annahme zu erhärten, dass für einheitliche geologische Gebiete bzw. Schichtabfolgen eine Abhängigkeit zwischen Hangmurentstehung und Korngrössenverteilung/Plastizität existiert.

Die vorgenommenen Untersuchungen fokussieren auf den Anrissbereich der Hangmuren. Eine Beurteilung der Reichweiten der Hangmuren sowie der Intensitäten und Mächtigkeiten der Ablagerungen wurde nicht vorgenommen. Es ist eine qualitative Beurteilung des Einflusses der Plastizität auf das Verhalten der Hangmuren möglich. Unklar ist, welchen quantitativen Einfluss die Plastizität auf die mobilisierte Masse, das heisst auf die Geschwindigkeit der Hangmure bzw. auf die Auslaufstrecke hat.

In einer Fallstudie im Auftrag der SBB wird der Ansatz der AGN (2016) praxisorientiert weiterentwickelt. Mit generell schweizweit verfügbaren Daten wurden GIS-basiert potenzielle Hangmuren Anrissgebiete mit einem objektiven Verfahren ermittelt. Mit diesen Anrissgebieten konnten mit RAMMS mögliche Prozessräume ermittelt und damit potenziell gefährdete Streckenabschnitte identifiziert werden. Diese Ergebnisse sind eine geeignete Entscheidungsgrundlage im Hinblick auf vertieft zu untersuchende Gebiete respektive Streckenabschnitte von Bahnen oder Strassen und die Definition allfälliger Massnahmen.

7 Quellen

AGN (2004): Gefahreinstufung Rutschungen i. w. S. – Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren – Entwurf. Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren, Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie SFIG-GSGI; im Auftrag des (ehem.) Bundesamtes für Wasser und Geologie.

AGN (2016): Verbesserung der Hangmurenbeurteilung. Arbeitsbericht Phase 1. https://www.sfig-gsgi.ch/public/uploads/f47088ce-708f-4070-4dba-5a79064bc0a6/20160229_AGN_Hangmurenbeurteilung_red3.pdf, 91 p.

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

Boll-Bilgot, S. & Parriaux, A. 2018: Méthode de caractérisation in situ des formations superficielles meubles et application à l'étude des coulées de boue. *Swiss Bull. angew. Geol.*, Vol. 23/1, 2018, p. 73-89.

Egli Engineering (2009): Die Einwirkung von Hangmuren auf Gebäude - Sammlung, Sichtung und Auswahl der Fallbeispiele. Internal report, unpublished, Bundesamt für Umwelt.

Egli Engineering (2011): Die Einwirkung von Hangmuren auf Gebäude - Analyse, Dokumentation und Interpretation von Schadenfällen. Internal report, unpublished, Bundesamt für Umwelt.

Loup, B., Egli, T., Stucki, M., Bartelt, P., McDell, B. & Baumann, R. (2012): Impacts pressures of hillslope debris flow. Back calculation and simulation (RAMMS). 12th Congress INTERPRAEVENT 2012, Conference Procee-

Einfluss bodenhydrologischer Prozesse auf die Auslösung flachgründiger Rutschungen und Hangmuren

Peter Lehmann ¹ (peter.lehmann@env.ethz.ch)
 Manfred Stähli ² (manfred.staehli@wsl.ch)
 Dani Or ¹ (dani.or@env.ethz.ch)

¹ Boden- und Terrestrische Umweltphysik, ETH Zürich
² Gebirgshydrologie und Massenbewegungen, WSL Birmensdorf

Zusammenfassung

Die Verteilung des Niederschlagswassers in den rutschungsgefährdeten Hängen eines Einzugsgebietes hängt stark von den hydrologischen Prozessen und den hydraulischen Eigenschaften des Bodens ab. Um den Einfluss der Wasserverteilung auf die Kräfteverhältnisse in den Hängen und das Risiko einer Rutschung abzuschätzen, müssen nicht nur die Materialeigenschaften bekannt sein, sondern insbesondere deren räumliche Verteilung. Nur wenn das Zusammenspiel und die Verknüpfung von stärkeren und schwächeren Gebieten miteinbezogen wird, lässt sich der Einfluss der Bodenhydrologie auf die Auslösung von Rutschungen beschreiben.

Einleitung

Die Bodenhydrologie beschreibt die räumliche und zeitliche Verteilung des Wassers und dessen Bewegung im Bodenmaterial. In diesem Artikel wird die Rolle der bodenhydrologischen Prozesse auf die Auslösung von flachgründigen Rutschungen aus verschiedenen Perspektiven (Theorie, Feldexperimenten und Modellierung) beschrieben. Die Verteilung und Bewegung des Wassers bestimmt (i) die Stärke des Bodenmaterials und (ii) die Wassermenge in einer Rutschung und deren Übergang in eine Hangmure. Es ist allgemein bekannt, dass nasse Böden schwerer und

schwächer sind und die Bildung eines Wasserspiegels über der Rutschfläche zur Auslösung einer Rutschung führen kann. Dass Rutschungen dennoch so schwer vorherzusagen sind, liegt in der (i) immensen Abhängigkeit der Bodeneigenschaften vom Wassergehalt und (ii) der räumlichen Heterogenität eines Hanges, der gewissermassen ein Mosaik von stärkeren und schwächeren Bodensäulen bildet. Ob das «Versagen» einer Bodensäule zu einer Rutschung führt oder durch stärkere Elemente stabilisiert wird, hängt von den räumlichen Eigenschaften dieses Mosaiks ab.

Einsichten aus der Theorie

Der Festigkeit eines Bodens wird von dessen Körnung und dem Wassergehalt (Was-

servolumen pro Bodenvolumen) bestimmt. Neben der Kohäsion, Wurzelverstärkung und Gewichtskraft wird die Bodenfestigkeit auch durch die Kapillarkraft in den engen Hohlräumen zwischen Bodenkörnern verstärkt. Wie in der Abbildung 1a gezeigt, sind feinkörnige Böden stärker als sandige Materialien und die Stärke nimmt mit abnehmendem Wassergehalt zu. Der Wassergehalt eines Bodens, der sich während eines starken Niederschlags einstellt, hängt vom Anfangswassergehalt ab (eine Funktion des Niederschlags und der Verdunstung in den vorangegangenen Wochen) und der Geschwindigkeit, mit der Wasser in den Boden infiltrieren und so zur Bildung eines destabilisierenden Wasserspiegels führen kann. Die Wasserinfiltration und Verteilung des

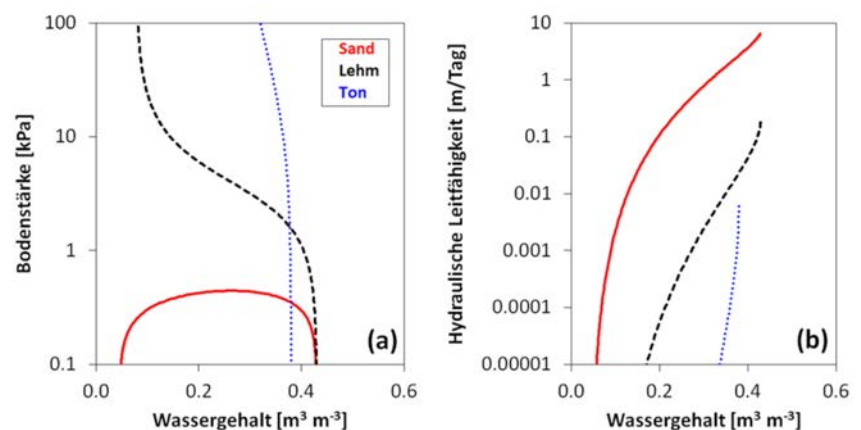


Abbildung 1: Einfluss des Wassergehaltes auf Bodeneigenschaften, die für die Auslösung von Hangrutschungen entscheidend sind (gezeigt für drei Bodentexturen; Sand-, Lehm- und Tonböden). (a) Durch Kapillarkräfte verursachte Bodenstärke. (b) Die Wasserverteilung im Boden mit der Tiefe und parallel zum Hang wird durch die hydraulische Leitfähigkeit bestimmt.

Wassers in die Tiefe und parallel zum Hang kann durch die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens beschrieben werden (Abbildung 1b). Die Darstellung in der Log-Skala deutet darauf hin, wie stark die hydraulische Leitfähigkeit mit der Bodenkörnung und dem Wassergehalt ändert. Ungenauigkeiten in der Bestimmung des Wassergehaltes können zu grossen Unsicherheiten in der Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten und somit der neuen Wasserverteilung führen. Die starke Änderung der für die Auslösung wichtigen Bodeneigenschaften mit dem Wassergehalt erschwert genaue Vorhersagen. Die Vorhersagen werden durch die räumlichen Unterschiede innerhalb eines Hangs zusätzlich erschwert, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird.

Einsichten aus Feldexperimenten

Um den Zusammenhang zwischen Bodenwasserverteilung und Auslösung der Rutschung experimentell zu untersuchen, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes TRAMM (<https://www.wsl.ch/en/projects/cces-tramm-project.html>) versucht, Rutschungen experimentell durch starke Bewässerung auszulö-

sen (Abbildung 2). Diese Experimente fanden in Wiler (Kanton Wallis; Abbildung 2a) und Rüdlingen (Kanton Schaffhausen; Abbildung 2b) statt. In den insgesamt vier Experimenten wurden innerhalb weniger Tage grosse Wassermengen zugeführt (in einem Fall die achtfache jährliche Niederschlagsmenge innerhalb von fünf Tagen). Lokale Messungen des Bodenwassers zeigten in allen vier Experimenten das Erreichen von Sättigung und die Bildung eines Wasserspiegels an. Dieser Zustand der Sättigung konnte über mehrere Tage hinweg aufrechterhalten werden. Doch nur in einem einzigen Fall kam es zur Auslösung einer Rutschung.

Dieses erstaunliche Resultat kann nur durch die Betrachtung der räumlichen Zusammenhänge im Hang verstanden werden. Mittels geoelektrischer Methoden wurde der elektrische Widerstand entlang des Hangs gemessen (Abbildung 3). Wird der Wassergehalt erhöht, sinkt der elektrische Widerstand. Nur im einzigen Feldversuch mit ausgelöster Rutschung konnte sich ein kontinuierliches Band mit Wassersättigung ausbilden, während in den anderen drei Experimenten nur lokal ein

Sättigungszustand erreicht wurde. Im Gebirgswald in Wiler konnte trotz extremer Bewässerung nur ein kleiner Bereich gesättigt werden, weil das Wasser entlang von Baumwurzeln und Gesteinsrissen schnell abfließen konnte, ohne das Bodenmaterial kontinuierlich zu sättigen. In Rüdlingen konnte dank intensiver Beregnung im empfindlichsten Bereich eine Rutschung ausgelöst werden, weil ein ca. 20 m langer Bereich gesättigt wurde. Dies lässt sich auch durch die Modellierung, die im nächsten Abschnitt diskutiert wird, reproduzieren (Abbildung 3c).

Einsichten aus der Modellierung

Die Muster der Wasserverteilung innerhalb eines Hanges oder Einzugsgebietes lassen sich mit gängigen Messmethoden nur in Ausnahmefällen festhalten. Als Alternative hierzu besteht die Möglichkeit, realistische Bodenwassermuster mittels Modellierung zu erzeugen. So liess sich beispielsweise das kontinuierliche Band der Sättigung, das zum Auslösen der Rutschung führte, mit einem bodenphysikalischen Modell reproduzieren (Abbildung 3c). Die Modellierung bietet neben der Si-

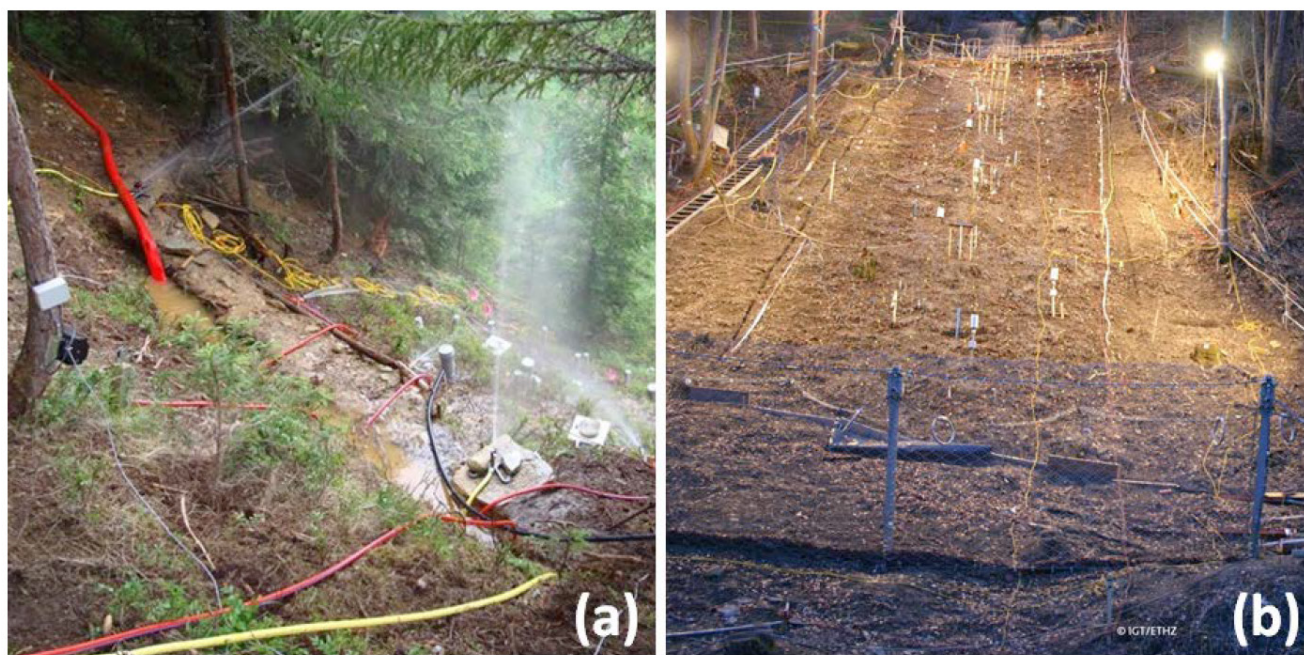


Abbildung 2: Feldversuche zur Auslösung von Hangrutschungen in Wiler (a) und Rüdlingen (b). Um eine Rutschung auszulösen, wurden die Hänge intensiv bewässert. Verschiedene Sensoren erfassten die zunehmende Wassersättigung (und Verformung) des Bodens.

mulation der Wasserverteilung auch die Möglichkeit, das eingangs erwähnte «Mosaik» schwacher und starker Bodensäulen zu reproduzieren und dessen Einfluss auf die Auslösung von Hangrutschungen wiederzugeben. Im Rahmen des Forschungsprojektes TRAMM wurde ein Modell entwickelt (STEP-TRAMM, Lehmann et al., 2018), das die Wasser- und Kräfteverteilung zwischen Regionen verschiedener Stärken und Belastungen wiedergibt. Das Modell benötigt Informationen bezüglich der Regenmenge, Boden- und Waldverteilung und ein digitales Höhenmodell. All diese Informationen sind weltweit frei verfügbar (mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen). Das Modell berechnet die Bodentiefe, die Wasserverteilung in Raum und Zeit und die sich daraus ergebenden Stärken und Belastungen. Wird eine Bodensäule so stark geschwächt, dass sie instabil wird, werden frei werdende Kräfte umverteilt, bis ein stabiler Zustand erreicht wird oder weitere Bodensäulen instabil werden, bis schliesslich die Kräfte so gross werden, dass ein Abrutschen der Masse erfolgt.

Mit STEP-TRAMM lassen sich die bodenhydrologischen und mechanischen Prozesse auf der Skala von Einzugsgebieten (10-100 km²) gut abbilden und berechnen, wann und wo im Einzugsgebiet Rutschungen auftreten können. Es muss beachtet werden, dass die räumliche Verteilung aller Bodeneigenschaften nicht genau genug bekannt sein kann, um den Ort präzise vorherzusagen, aber es wird angestrebt, dass simulierte und tatsächliche Rutschungen in der Grösse und Anzahl und anderen Merkmalen (Höhenlage, Gefälle etc.) übereinstimmen. Solche Modelle können auch für Frühwarnsysteme (Stähli et al., 2015) und der Bestimmung von Niederschlags-Grenzwerten von grosser Bedeutung sein. Niederschlagsgrenzwerte verknüpfen die Stärke und Länge eines Niederschlagsereignisses mit dem Risiko des Auftretens einer Rutschung.

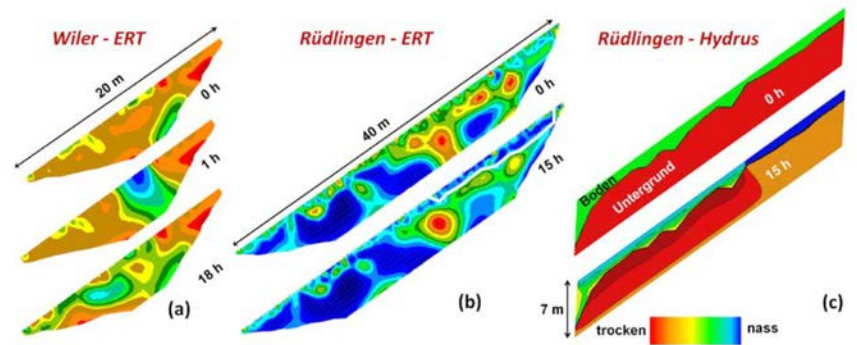


Abbildung 3: Räumliche Verteilung des Wassergehaltes ermittelt durch geoelektrische Methoden («ERT») und Simulationen (Modell «Hydrus») zu verschiedenen Zeiten nach Start der Beregnung. In Wiler gelangte viel Wasser in den felsigen Untergrund, ohne den Boden stark zu schwächen (a). In Rüdlingen formierte sich eine kontinuierliche Zone mit hoher Wassersättigung (b), die schliesslich abrutschte (markiert durch weisse Linie). Die Sättigung dieser Zone wurde in der Modellierung rekonstruiert (c).

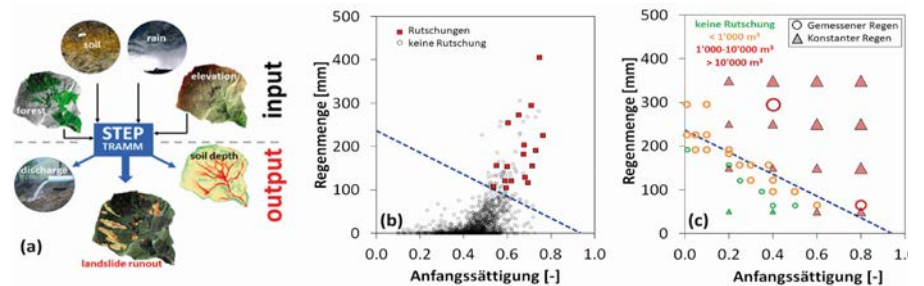


Abbildung 4: Anwendung des Modelles STEP-TRAMM zur Simulation von Rutschungen und Hangmuren. (a) Darstellung der Information, die die Benutzerin oder der Benutzer eingeben muss und die im Modell berechneten Prozesse. (b) Empirischer Niederschlagsschwellenwert für ein Gebiet in Vancouver (blaue Linie) und dessen Rekonstruktion mit STEP-TRAMM (c).

Diese Grenzwerte sind in der Regel nur auf Beobachtungen gestützt und variieren stark für verschiedene Gebiete (können also nicht übertragen werden). Hier können Modelle wie STEP-TRAMM Beobachtungen unterstützen, indem für viele Niederschlagsszenarien die Wahrscheinlichkeit von Rutschungen berechnet werden. In Abbildung 4 ist ein Beispiel für ein Gebiet in Vancouver (Kanada) gezeigt, wo Simulationen den empirischen Grenzwert gut reproduzieren können.

Schlusswort

Die hydraulischen Eigenschaften von Böden hängen extrem von der Zusammensetzung und dem Zustand des Bodens ab. Diese Empfindlichkeit erschwert Vorhersagen der bodenhydrologischen Prozesse und deren Einfluss auf die Auslösung von Rutschungen. Um Vorhersagen zu verbessern, braucht es (i)

ein dichtes Netzwerk an Messungen der Bodenfeuchte, (ii) ein verbessertes Verständnis des Zusammenhangs zwischen den Messungen und den hydrologischen Prozessen und (iii) Modelle, die diese Prozesse wiedergeben und mit der Simulation von Rutschungen für verschiedene Niederschlagsszenarien verknüpfen können.

Quellen

Lehmann, P., von Ruetze, J. & Or, D. (2018). How landslides become disasters. EOS, 99 (12), 32-37.

Stähli, M., Sättele, M., Huggel, C., McARDell, B.W., Lehmann, P., Van Herwijnen, A., ... & Or, D. (2015). Monitoring and prediction in early warning systems for rapid mass movements. Natural Hazards and Earth System Sciences, 15(4), 905-917.

Niederschlagsschwellenwerte für flachgründige Rutschungen in der Schweiz: Vorteile und Limitationen

Elena Leonarduzzi^{1,2} (leonarduzzi@ifu.baug.ethz.ch)
Peter Molnar¹

¹Institut für Umweltingenieurwissenschaften, ETH Zürich, Schweiz

²Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Birmensdorf, Schweiz

Zusammenfassung

Rutschungen sind in alpinen Gebieten eine verbreitete Naturgefahr und treten auf der gesamten Welt auf. Sie führen zu signifikanten Schäden an der verbauten Umwelt und der Infrastruktur (Schiene, Strasse) und sogar zum Verlust von Leben. Für die Vorhersage werden häufig einfache Niederschlagsschwellenwerte verwendet. Wir zeigen hier, wie Schwellenwerte für tägliche und stündliche Niederschläge objektiv definiert werden können. Der Ansatz basiert auf einem einzigartigen Rutschungs- und Niederschlagsdatensatz, der für die Schweiz verfügbar ist und der sowohl Bedingungen berücksichtigt, bei denen Rutschungen entstanden sind als auch solche ohne Rutschungen. Es werden somit explizit auch falsche Alarmer und nicht nur positive Vorhersagen berücksichtigt. Die Niederschlagsdaten und die Daten zu den Rutschungen stammen aus der Schweiz.

Die besten Vorhersagen konnten mit einer Intensität-Dauer Potenzfunktion gemacht werden, gefolgt von der mittleren und maximalen Niederschlagsintensität und schliesslich dem totalen Niederschlag. Die Niederschlagsdauer für sich hat nur eine geringe Vorhersagekraft. Die mit stündlichen Niederschlagsdaten definierten Schwellenwerte konnten die Ereignisse besser vorhersagen, als die aufgrund von täglichen Daten bestimmten Schwellenwerte. Allerdings weisen diese aufgrund kürzerer Da-

tenreihen eine geringere Robustheit auf und sind in einem operationellen Umfeld schwieriger zu nutzen. Niederschlagsschwellenwerte bringen gewisse Limitationen mit sich. Dazu gehören die Auflösung der Regendaten und dass diese standortgebunden sind. Zudem sind die Vorbedingungen und weitere prädisponierende Faktoren nicht berücksichtigt. Weiter sind viele Fehlalarme zu verzeichnen.

Einleitung

Flachgründige Rutschungen sind eine weit verbreitete Naturgefahr, die alpine Regionen auf der ganzen Welt betrifft. Zwischen 1972 und 2016 wurden in der Schweiz 3690 Rutschungen mit Schadenfolgen registriert. Dies führt zu durchschnittlich über 80 Rutschungen pro Jahr, die zu einem mittleren geschätzten Schaden von beinahe 5 Mio. CHF pro Jahr führen (Andres und Badoux, 2018).

Rutschungen entstehen durch das Zusammenspiel von prädisponierenden und auslösenden Faktoren. Prädisponierende Faktoren sind notwendige Bedingungen, damit ein Standort anfällig für Hanginstabilitäten ist. Dies sind zum Beispiel der Boden sowie geologische, lithologische und topographische Eigenschaften des betrachteten Gebietes. Die häufigsten auslösenden Faktoren sind hydrologische Bedingungen, die zu Bodensättigung führen (Regen und Schneeschmelze) sowie Erdbeben. Die Auslösung kann ortsspezifisch sein. So spielt in nordeuropäischen Ländern

die Schneeschmelze eine dominante Rolle, während in anderen Regionen Erdbeben häufig und stark sind (z.B. Taiwan oder Japan). Insgesamt ist jedoch für flachgründige Rutschungen der Niederschlag die dominierende Auslöseursache. Das gilt auch für die Schweiz (Hilker et al., 2009).

Trotz der globalen Bedeutung von Rutschungen als Naturgefahr gibt es weltweit nur sehr wenige Frühwarnsysteme, die in Betrieb sind (siehe Rezension in Piciullo et al., 2018). Mit wenigen Ausnahmen basiert die überwiegende Mehrheit davon auf Niederschlagsschwellenwerten. Bei diesem Ansatz werden die Niederschlagsbedingungen identifiziert, die für die Auslösung einer Rutschung erforderlich sind. In den meisten Fällen werden Schwellenwerte bevorzugt, die in der Ebene der Niederschlagsintensität und der Niederschlagsdauer definiert sind (z.B. Guzzetti, 2007). Als Ansatz wird eine Potenzfunktion mit negativem Exponenten gewählt. Dies aufgrund der Annahme, dass mit zunehmender Niederschlagsdauer die für eine Rutschung notwendige mittlere Niederschlagsintensität abnimmt. Die Kurve umfasst beide Arten von Niederschlagstypen, die mit Rutschungen verbunden sind: kurze und intensive Ereignisse und langanhaltende, typischerweise weniger intensive Ereignisse. Die Abschätzung der Niederschlagsschwellenwerte variiert je nach Datenverfügbarkeit und subjektiven Entscheidungen. Die Mehrheit der Schwellenwerte wird beispielsweise

nur durch die Betrachtung von Niederschlägen definiert, die historisch zu Rutschungen geführt haben (z.B. der Häufigkeitsansatz in Brunetti et al. 2010 oder die Bayes'sche Inferenzmethode in Guzzetti et al., 2007), wobei Fehlalarme nicht berücksichtigt werden. Diese Wahl wird oft getroffen, wenn keine Langzeit-Niederschlagsdaten vorliegen und nur einige auslösende Ereignisse aus Zeitungen und anderen Aufzeichnungen rekonstruiert werden können. Falls Langzeitaufzeichnungen der Niederschläge vorliegen und die Rutschungsdatenbank vollständig ist, können auch Ereignisse berücksichtigt werden, die nicht zu Rutschungen geführt haben (z.B. Berti et al., 2012). Die Datenverfügbarkeit bestimmt oft, ob die Niederschlagsschwellenwerte auf der Tages- oder Stundenskala definiert sind.

In dieser Arbeit wenden wir eine objektive Methode für die Definition von Niederschlagsschwellenwerten an. Dafür wird eine einzigartige Datenbank von Rutschungen mit Niederschlagsdaten auf Tages- und Stundenbasis verwendet. Schliesslich werden die Vor- und Nachteile von Niederschlagsschwellenwerten für die Vorhersage von Rutschungen diskutiert.

Datenbanken und objektive Definition von Niederschlagsschwellenwerten

Die hier vorgestellte Arbeit basiert auf Niederschlagsdaten und erfassten Rutschungen. Für letztere werden die Rutschungen aus der WSL Unwetterschaden-Datenbank extrahiert (Hilker et al., 2009). Diese enthält Datum, Ort und Zusatzinformationen zu insgesamt 3690 Rutschungen, die seit 1972 Schäden verursacht haben. Die Datenbank wurde bereinigt, indem Ereignisse entfernt wurden, falls sie am gleichen Ort und Datum auftraten, der Ort unsicher war oder laut Datenbankeintrag Schneeschmelze zur Rutschung geführt hat. Für die Analyse standen danach 2117 Ereignisse mit täglichen und 243 Ereignisse mit stündlichen

Niederschlagsdaten zur Verfügung. Für die Niederschläge haben wir zwei von MeteoSchweiz bereitgestellte Datensätze verwendet: RhiresD und RdisaggH. Beide Datensätze decken jeweils mit einem 1x1 km² Raster die gesamte Schweiz ab. Der erste enthält tägliche Werte seit 1961. Dafür wurden Messungen von Regensammlern interpoliert (Frei und Schär, 1998). Der zweite Datensatz, RdisaggH, ist ein von RhiresD abgeleitetes Produkt, bei dem für jede Zelle die Tagessumme disaggregiert wurde. Für die Bestimmung der sub-täglichen Variabilität wurde ein Wetterradar benutzt. Dieser Datensatz ist nur für einen Testzeitraum zwischen Mai 2003 und Dezember 2010 verfügbar.

Jede Rutschung ist der nächstgelegenen Niederschlagszelle zugeordnet und alle Zellen, in denen mindestens ein Ereignis aufgezeichnet wurde, gelten als gefährdete Gebiete für

Rutschungen. Die Niederschlagsereignisse werden dann für jede Zelle unterteilt. Die minimale Zeit pro Ereignis betrug 1 Tag für Tagesdaten und 6 Stunden für stündliche Niederschläge. Für jedes Ereignis werden mehrere Eigenschaften (Gesamtdauer des Ereignisses, mittlere und maximale Intensität, Dauer) berechnet. Falls beim Regenereignis eine Rutschung aufgezeichnet war, wurde es als auslösend eingestuft und umgekehrt. Niederschlagsschwellenwerte werden dann durch Maximierung des wahren Gütemasses (True Skill Statistic, TSS) (Begueria 2006) berechnet. Das TSS ist der Unterschied zwischen der wahren positiven Rate (Rutschungen korrekt vorhergesagt) und der falschen Alarmrate (Ereignisse, die den Schwellenwert überschreiten, aber nicht als ausgelöst beobachtet werden). Die Maximierung des TSS erfolgte sowohl als Schwellenwerte für einzelne

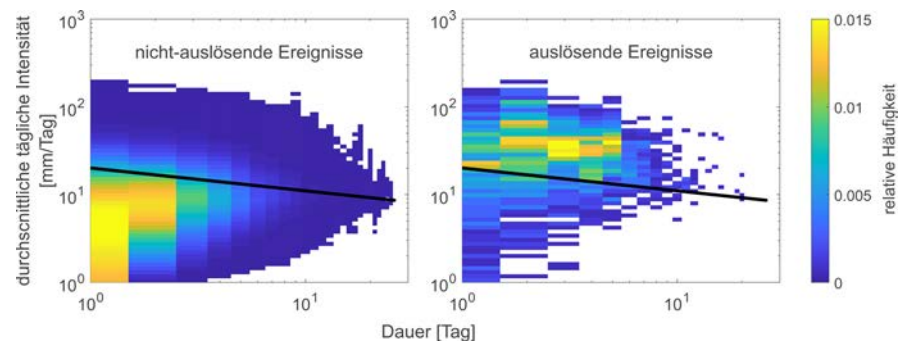


Abbildung 1: Intensitäts-Dauer-Diagramme mit der Linie des Schwellenwertes, die sich durch die Maximierung der wahren TSS (schwarze Linie) mit täglichen Daten ergab. Links die farbliche Darstellung der relativen Häufigkeit der nicht auslösenden Ereignisse und rechts die der auslösenden Ereignisse.

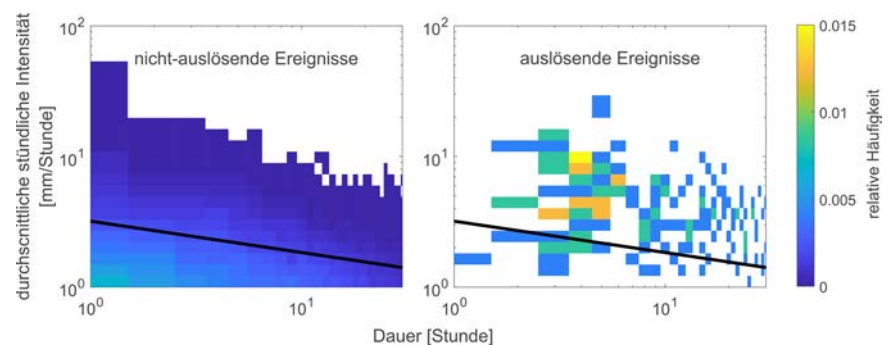


Abbildung 2: Intensitäts-Dauer-Diagramme mit der Linie des Schwellenwertes, die sich durch die Maximierung der wahren TSS (schwarze Linie) mit stündlichen Daten ergab. Links die farbliche Darstellung der relativen Häufigkeit der nicht auslösenden Ereignisse und rechts die der auslösenden Ereignisse.

Tabelle 1: Beste Schwellenwerte, erhalten durch Maximierung der TSS (True Skill Statistic) für die verschiedenen Niederschlagsseigenschaften unter Verwendung der täglichen oder stündlichen Niederschläge. Fehlalarm (FA), True Positive (TP) und entsprechende TSS-Werte sowie die AUC (Area Under the Curve) Statistik für die entsprechende Niederschlagscharakteristik. Für die Intensitäts-Dauer (ID)-Kurve kann die AUC nicht berechnet werden, da die Optimierung auf den beiden Parametern basiert, die eine Potenzgesetz-Kurve beschreiben.

		Maximale Intensität	Mittlere Intensität	Niederschlags-summe	Dauer	ID-Kurve
Tages-niederschlag	Schwellenwert	29.6 mm/d	14.7 mm/d	42.9 mm	3 d	$I=20.1D^{-0.26}$
	FA Rate	0.11	0.16	0.17	0.34	0.14
	TP Rate	0.74	0.79	0.75	0.60	0.79
	TSS	0.63	0.63	0.59	0.26	0.65
	AUC	0.89	0.89	0.87	0.66	-
stündlicher Niederschlag	Schwellenwert	6.3 mm/h	1.8 mm/h	17.7 mm	23 h	$I=3.2D^{-0.24}$
	FA Rate	0.11	0.12	0.22	0.19	0.11
	TP Rate	0.81	0.81	0.83	0.40	0.84
	TSS	0.70	0.70	0.61	0.21	0.73
	AUC	0.91	0.91	0.88	0.61	-

Regeneigenschaften, wie auch für die Potenzfunktion im Intensität-Dauer Raum (Tabelle 1 und Abbildung 1 und 2). Weitere Einzelheiten zur Methodik sind in Leonarduzzi et al. (2017) enthalten.

Tägliche und stündliche Niederschlagsschwellenwerte

Von den einzelnen Niederschlagsmerkmalen ist die maximale Intensität der beste Indikator. Es folgen die Gesamtregenmenge und die Niederschlagsdauer, welche deutlich schlechter abschneiden. Dennoch hat die Niederschlagsdauer eine gewisse Vorhersagekraft, sofern sie mit dem Gesamtregen der mittleren Intensität kombiniert wird. Die resultierenden Vorhersagen sind dann mit den Vorhersagen der maximalen Intensität vergleichbar. Ausserdem sind sie kombiniert besser als die Vorhersage der einzelnen Merkmale. Dies kann sowohl bei der Betrachtung der TSS-Werte der einzelnen Schwellenwerte, als auch bei der Betrachtung der Fläche unter der Kurve (AUC, Area Under the Curve) beobachtet werden. Die AUC ist eine integrale ROC-Kurvenstatistik (ROC, Receiver Operating Characteristic), welche die gesamte Vorhersagekraft einer Varia-

blen misst. Sie ist unabhängig vom Schwellenwert (AUC=1 entspricht einem perfekten Modell und AUC=0.5 einer Zufallsvorhersage). Wird der Schwellenwert als Potenzfunktion im Intensität-Dauer Raum definiert, werden die Vorhersagen weiter verbessert. Dies führte zu den insgesamt höchsten TSS-Werten.

Der Vergleich zwischen täglichen und stündlichen Regendaten ist aufgrund der unterschiedlichen Anzahl und Länge der Niederschläge nicht einfach. Dennoch ist es offensichtlich, dass die mit den stündlichen Niederschlagsdaten erzielten Vorhersagen besser sind als jene mit den täglichen Niederschlagsdaten (Tabelle 1). Tatsächlich sind für alle Parameter ausser der Dauer sowohl die Werte von TSS als auch von AUC für die stündliche Analyse grösser. Das bedeutet, dass nicht nur die stündlichen Schwellenwerte besser funktionieren (höheres TSS), sondern auch die stündlichen Niederschlagseigenschaften im Allgemeinen eine höhere Vorhersagekraft haben (höheres AUC). Die besseren Vorhersagen auf der Stundenskala stehen im Einklang mit der Erwartung, dass die täglichen Niederschläge kurze und intensive konvektive Ereignisse ausmitteln. Diese Ereignisse führen zwar

nicht zu einer hohen Tagessumme, können aber dennoch kritisch für Rutschungen sein.

Vor- und Nachteile von Niederschlagsschwellenwerten

Der Hauptvorteil eines auf Niederschlagsschwellenwerten basierenden Warnsystems liegt sicherlich in seiner Einfachheit. Sobald ein solches System eingerichtet und betriebsbereit ist, muss ein Benutzer lediglich die vorhergesagten (prognostizierten) Niederschlagseigenschaften mit den vordefinierten Schwellenwerten vergleichen. Darüber hinaus gibt es mehrere bereits entwickelte formale Methoden zur Schätzung von Niederschlagsschwellenwerten. Diese reichen von Methoden, die ausschliesslich auf der Niederschlagsverteilung basieren (z.B. Pedrozzi, 2004), über diejenigen, die nur auf Auslöseereignissen fundieren (z.B. Guzzetti et al., 2007 und Brunetti et al., 2010), bis hin zu solchen, die sowohl Auslöse- als auch Nicht-Auslöseereignisse nutzen. Die letzte Methode wurde hier kurz vorgestellt. Der Benutzer kann je nach Ziel und Datenverfügbarkeit eine der Methoden auswählen.

Der Benutzer sollte sich bewusst sein, dass

die Hauptnachteile und -begrenzungen von Warnsystemen für Rutschungen, welche auf Niederschlagsschwellenwerten basieren mit (a) der Stationarität und der Auflösung der Niederschlagsdaten, (b) dem Einfluss der Bodenfeuchte vor dem Ereignis, (c) dem Einbezug anderer prädisponierender Faktoren durch Regionalisierung und (d) der Folge von Fehlalarmen zusammenhängen.

Erstens implizieren schwellenwertbasierte Warnsysteme für Rutschungen Stationarität. Zwischen den im Betrieb erwarteten Niederschlägen und den Niederschlägen, die zur Definition der Schwellenwerte benutzt wurden, sollten keine grossen Unterschiede bestehen. Dies gilt auch für die Zeitauflösung, da die Umrechnung der Niederschlagsschwellenwerte von Tages- auf Stundenskala nie einfach ist. In früheren Arbeiten wurde gezeigt, wie stark die Leistungen von der Genauigkeit der Datenbank der Rutschungen (Leonarduzzi et al., 2017), aber auch von den Niederschlagsdaten (Peres et al., 2018) beeinflusst werden. Aus diesem Grund ist es auch wichtig, Tests durchzuführen, um festzustellen, ob die definierten Schwellenwerte und die verwendete Methodik robust sind (z.B. Leonarduzzi et al., 2017 oder Peruccacci et al., 2012). Darüber hinaus sind auf der Stundenskala subjektivere Entscheidungen erforderlich. Dies beispielsweise bei der Definition der minimalen Dauer zwischen Regenerereignissen, um diese für die Analyse zu extrahieren. Die Definition ist weniger eindeutig als bei Tagesdaten und kann die Ergebnisse beeinflussen. Im operationellen Betrieb werden für die Abschätzung, ob Rutschungen zu erwarten sind, Wettervorhersagen verwendet, welche im Allgemeinen auf Tagesbasis viel genauer als auf Stundenbasis sind, insbesondere bei Vorhersagen von 2-3 Tagen. All diese Gründe erklären, warum tägliche Schwellenwerte in einigen Fällen eine gute Wahl sein können.

Zweitens ist die vorherrschende Bodenfeuch-

te ein kritischer Faktor für die Auslösung von Rutschungen. Die gleiche Menge an Niederschlägen kann auf einem nassen Boden zu Rutschungen führen, während dies auf einem trockenen Boden nicht der Fall ist. Die Erhöhung des Porenwasserdrucks im Zusammenhang mit Rutschungen kann durch feuchte Bodenverhältnisse vor dem Niederschlagsereignis oder durch Wassereinträge durch Schneeschmelze gefördert werden. Der Wassereintrag ist abhängig von der Mikrotopographie und der Entwässerung der Hänge. Diese Aspekte können nicht durch einfache Niederschlagsschwellenwerte erfasst werden und erfordern eine Abschätzung der Bodensättigung. Es wurden Methoden zur Berücksichtigung der Bodensättigung entwickelt, die von der Akkumulation von Niederschlägen über Vorperioden (z.B. Glade et al., 2000) über hydrologische Modelle (Ponziani et al., 2012) bis hin zu Bodenfeuchtemessungen (Mirus et al., 2018) reichen. Die Sättigung wird dabei direkt geschätzt oder modelliert.

Drittens gibt es andere prädisponierende Faktoren, die zu Rutschungen führen, wie Topographie, Erodierbarkeit, Klima, Vegetationsdecke, usw.. Sie interagieren mit den Niederschlagsschwellenwerten. Auch wenn an einer Stelle ein Niederschlagsschwellenwert überschritten wird, führt dies nicht unbedingt zu einer Rutschung. Dies nicht nur aufgrund der Unsicherheit der Niederschlagsschwellenwerte, sondern auch aufgrund lokaler Eigenschaften (z.B. zu geringe Neigung oder das Fehlen einer Bodenschicht). Dieses Problem kann man beispielsweise reduzieren, indem zusätzliche Faktoren durch Regionalisierung berücksichtigt werden. D.h. Schwellenwerte werden für Regionen mit ähnlichen Eigenschaften definiert (z.B. Leonarduzzi et al., 2017 und Peruccacci et al., 2012). Der Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Anzahl der auslösenden Ereignisse wahrscheinlich deutlich abnehmen wird. Der ent-

sprechende lokale Schwellenwert ist dadurch weniger robust. Das Gleiche passiert, wenn man stündliche statt tägliche Niederschläge verwendet. Im konkreten Fall der Schweiz sinkt der Zeitrahmen der Analyse bei stündlichem Niederschlag von 47 Jahren auf nur 7 Jahre und die Anzahl der auslösenden Ereignisse von 2117 auf 243. Die Tatsache, dass weniger Ereignisse vorhanden sind, ist nicht nur auf den verkürzten Zeitrahmen, sondern auch auf die erforderliche höhere Genauigkeit der Datenbank über Rutschungen zurückzuführen. Für dies ist nicht nur der Tag des Auftretens, sondern auch der Zeitpunkt erforderlich. Der Effekt ist deutlich sichtbar, wenn man die relative Häufigkeit der auslösenden Ereignisse betrachtet (Abbildung 1 für Tages- und Abbildung 2 für Stundenwerte). Die Ereignisse sind in der Intensitäts-Dauer Ebene viel stärker gestreut, was den Schwellenwert empfindlicher auf mögliche Fehler und Unsicherheiten macht. Es ist zwar bekannt, dass flachgründige Rutschungen manchmal durch kurze konvektive Ereignisse ausgelöst werden. In dieser Hinsicht würden sich die Verwendung höherer zeitlicher Auflösungen empfehlen. In der Praxis muss man sich dann aber mit viel kürzeren Aufzeichnungen und weniger robusten Schwellenwerten auseinandersetzen.

Viertens, sind Fehlalarme ein häufiges Problem bei der Warnung vor Rutschungen mithilfe von Niederschlagsschwellenwerten. Aufgrund des grossen Missverhältnisses von auslösenden und nicht auslösenden Ereignissen, der Limitationen von Niederschlagsschwellenwerten sowie der Unsicherheit in den Daten wird die absolute Anzahl der Fehlalarme immer dominieren. Es ist zwar wichtig, die Fehlalarme nach Möglichkeit auch in die Definition der Schwellenwerte einzubeziehen. Man sollte sich bei ihrer Verwendung aber dieser Einschränkung bewusst sein. Es gibt Möglichkeiten, Regenvorhersagen mit einfachen Statistiken aus guten Datensätzen zu

kombinieren. Man könnte z.B. berichten, wie oft im historischen Datensatz die prognostizierte Niederschlagsmenge zu Rutschungen geführt hat und wie oft nicht; oder wie viele Rutschungen durch gleiche, kleinere oder höhere Mengen im ganzen Land oder nur in der Region von Interesse ausgelöst wurden. Dies alles sind aussagekräftige Ergebnisse, die den Entscheidungsträgern zusätzliche Informationen liefern.

Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde eine objektive Methode zur Definition von Niederschlagsschwellenwerten für die Vorhersage von Rutschungen angewandt. Sie nutzt die in der Schweiz verfügbaren Niederschlagsdaten und eine einzigartige Datenbank zu Rutschungen. Nationale Schwellenwerte wurden sowohl unter Berücksichtigung einzelner Parameter als auch einer Intensitätsdauerkurve definiert. Dafür wurden die Differenz zwischen wahren positiven und falschen Alarmraten maximiert. Dies sowohl auf der Tages- als auch auf der Stundenskala. Die wichtigsten Schlussfolgerungen sind:

- Unter den Niederschlagsmerkmalen sind die maximale Intensität und die mittlere Intensität die besten Vorhersagen, gefolgt von der Gesamtregenmenge. Die Dauer an sich erweist sich als schlechtere Vorhersage.
- Noch bessere Leistungen werden erzielt, wenn man den Schwellenwert als Potenzfunktion im Intensitätsdauerraum definiert.
- Die auf der Stundenskala durchgeführte Analyse zeigt im Allgemeinen bessere Leistungen. Durch die Stundenskala wird sowohl der Zeitrahmen der Analyse als auch die Anzahl der verfügbaren Auslöseereignisse deutlich reduziert. Dies hat Auswirkungen auf die Robustheit der Ergebnisse.

- Niederschlagsschwellenwerte sind ein sehr einfaches und effektives Instrument, um mit der Einleitung von Rutschungen umzugehen. Sie sollten mit Bewusstsein und Vorsicht verwendet werden. Dies da sie: auf die Genauigkeit der verwendeten Daten angewiesen sind, zu einer hohen Anzahl von Fehlalarmen führen und die Rutschungswahrscheinlichkeit nicht berücksichtigen.

Danksagungen

Die Autoren danken der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) für die Bereitstellung der Datenbank von Rutschungen und dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) für die Bereitstellung der Niederschlagsdaten.

Der Text wurde im Original in Englisch eingereicht und durch Andreas Huwiler und Christian Rickli, beide WSL, ins Deutsche übersetzt.

Quellen

Andres, N., & Badoux, A. (2018). The Swiss flood and landslide damage database: normalisation and trends. *Journal of Flood Risk Management*, e12510 (12 pp.). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12510>

Beguerra, S. (2006), Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management, *Nat. Hazards*, 37(3), 315–329.

Berti, M., Martina, M. L. V., Franceschini, S., Pignone, S., Simoni, A., & Pizziolo, M. (2012). Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F4).

Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., and Guzzetti, F.: Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 447-458, <https://doi.org/10.5194/nhess-10-447-2010>, 2010.

Frei, C., & Schär, C. (1998). A precipitation climatology of the Alps from high resolution rain gauge observations. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(8), 873-900.

Glade, T., Crozier, M., & Smith, P. (2000). Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model". *Pure and Applied Geophysics*, 157(6-8), 1059-1079.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P.: Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 98, 239–267, 2007

Hilker N., Badoux A., Hegg C., 2009. The Swiss flood and landslide damage database 1972-2007. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 9(3):913-925.

Leonarduzzi E., Molnar P., McArdell B.W., 2017. Predictive performance of rainfall thresholds for shallow landslides in Switzerland from gridded daily data, *Water Resour. Res.*, 53, 6612–6625, doi:10.1002/2017WR021044.

Mirus, B. B., Becker, R. E., Baum, R. L., & Smith, J. B. (2018). Integrating real-time subsurface hydrologic monitoring with empirical rainfall thresholds to improve landslide early warning. *Landslides*, 15(10), 1909-1919.

Peres, D. J., Cancelliere, A., Greco, R., and Bogaard, T. A.: Influence of uncertain identification of triggering rainfall on the assessment

of landslide early warning thresholds, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 633-646, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-633-2018>, 2018.

Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Luciani, S., Vennari, C., & Guzzetti, F. (2012). Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy. *Geomorphology*, 139, 79-90.

Piciullo, L., Calvello, M., & Cepeda, J. M. (2018). Territorial early warning systems for rainfall-induced landslides. *Earth-science reviews*, 179, 228-247.

Ponziani, F., Pandolfo, C., Stelluti, M., Berni, N., Brocca, L., & Moramarco, T. (2012). Assessment of rainfall thresholds and soil moisture modeling for operational hydrogeological risk prevention in the Umbria region (central Italy). *Landslides*, 9(2), 229-237.

Dokumentation von spontanen flachgründigen Rutschungen und Hangmuren

Christian Rickli ¹ (christian.rickli@wsl.ch)

¹ Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Birmensdorf

Zusammenfassung

Bei Starkregenereignissen werden oft zahlreiche spontane Rutschungen und Hangmuren ausgelöst. Aus der Dokumentation solcher Ereignisse ergeben sich wertvolle Erkenntnisse zur Entstehung und dem Ablauf von Hangprozessen. Diese sind eine wichtige Basis für die Erstellung von Gefahregrundlagen. In der WSL-Rutschungsdatenbank sind im Feld erhobene Informationen zu Rutschungen erfasst, die während Unwetterereignissen der letzten 20 Jahre entstanden sind. Zur Datenbank existiert eine Web-Applikation, auf welcher die Daten eingesehen werden können und die auch den Export ausgewählter Daten erlaubt. Im vorliegenden Beitrag sind beispielhaft einige Auswertungen zur Geologie, zur Vegetation und zum Auslauf der Hangmuren dargestellt.

1 Einleitung

Während Unwettern entstehen verbreitet flachgründige Rutschungen und Hangmuren (Abbildung 1) mit zum Teil erheblichen Schadenfolgen (Hilker et al. 2009). Im Rahmen der Ereignisanalyse der Unwetter im August 2005 wurden beispielsweise weit über 5000 Hangprozesse dokumentiert (Bezzola & Hegg (Ed.) 2007). Die überwiegende Mehrheit davon waren flachgründige Rutschungen und Hangmuren. Im Folgenden werden verschiedene Aspekte im Zusammenhang mit der Dokumentation solcher Ereignisse dargestellt. Zu



Abbildung 1: Beispiel einer Hangmure, welche durch die Starkniederschläge im August 2005 in Flüfli LU ausgelöst wurde.

dem werden die WSL-Rutschungsdatenbank sowie einiger Beispiele von Datenauswertungen beschrieben. Rutschungen und Hangmuren werden nachfolgend in Vereinfachung als Rutschungen bezeichnet.

2 Grundlagen und Hinweise zur Dokumentation von Gefahrenprozessen

Daten und Informationen zu Naturgefahrenereignissen sind wertvoll für ein besseres Verständnis der Prozesse. Ereignisdokumentationen sind deshalb im Rahmen des integralen Risikomanagements wichtige Elemente (Abbildung 2) und tragen zur Erstellung von Gefahregrundlagen bei. Aus den gemachten Erfahrungen können Lehren gezogen und Massnahmen umgesetzt werden, um in Zukunft besser gewappnet zu sein. Zu den

Zielen von Ereignisdokumentationen zählen 1) Überblick und Abschätzung des Ausmasses der Ereignisse sowie der entstandenen Schäden, 2) Abschätzung des Aufwandes für die Behebung der Schäden und 3) Ermittlung der notwendigen Massnahmen zur Verbesserung der Gefahrensituation. Bei Ereignissen mit vielen Rutschungen können namentlich auch die massgebenden Einflussgrössen auf die Auslösung der Rutschungen und den Auslauf der Rutschmassen festgehalten und analysiert werden.

Als Hilfsmittel bei der Dokumentation von Naturereignissen dienen insbesondere die folgenden Grundlagen: das Handbuch DOMODIS (Hübl et al. 2006) sowie die Feldanleitung der Plattform Naturgefahren der Alpenkonvention (PLANALP 2006). Da schon bald nach einem Ereignis Aufräum- und Instandstellungsarbeiten

ten in Angriff genommen werden, spielt der Zeitpunkt der Dokumentation eine entscheidende Rolle - je zeitnaher die Erhebungen erfolgen, desto präziser lassen sich die Prozesse beurteilen.

In der Schweiz sind die Kantone gemäss Wald- und Wasserbaugesetz verpflichtet, Ereigniskataster zu führen, wobei Abgeltungen vorgesehen sind. Der Bund stellt den kantonalen Fachstellen die dazu erforderlichen Instrumente zur Verfügung: den **Naturereigniskataster StorMe** sowie die entsprechenden Erhebungsformulare. Mit der Entwicklung von StorMe wurde 1996 begonnen (Ruf 2013); derzeit ist die dritte Version des Katasters kurz vor Fertigstellung (BAFU 2019). Zur Erfassung eines Schadenereignisses in StorMe gehören Basisinformationen zu Ort, Zeit, Hauptprozess (Wasser, Rutsch, Sturz, Lawine oder Einsturz/Absenkung) sowie Angaben zu den auslösenden Wetterbedingungen und entstandenen Schäden. Zusätzlich werden Detailinformati-

onen zum Prozess (bei Rutschungen z.B. Informationen zur Auslösung, Ablagerung und zum Prozessraum) sowie allenfalls weitere Beobachtungen protokolliert.

Im Unterschied zur WSL-Rutschungsdatenbank (Kap. 4 und 5) werden in StorMe üblicherweise nur Ereignisse erfasst, bei denen Schäden aufgetreten sind oder wo bestehende bzw. potentiell zukünftige Siedlungsräume und Infrastrukturanlagen betroffen sind. Für beide Datenbanken sind ähnliche Parameter zu erheben. Der Detaillierungsgrad ist jedoch bei der Rutschungsdatenbank der WSL im Vergleich zu StorMe wesentlich höher. Dies zeigt sich unter anderem auch daran, dass bei Inventaren für die WSL-Rutschungsdatenbank pro Tag maximal zwei bis drei Rutschungen im Feld dokumentiert werden können. Die erfassten Daten werden periodisch nach StorMe übertragen, umgekehrt findet jedoch kein Datentransfer statt.

In Katastern werden Ereignisse fortlaufend

festgehalten. Im Gelände sind jedoch in der Regel auch Spuren von Ereignissen erkennbar, welche in den Katastern nicht dokumentiert sind. Diese sogenannte „stummen Zeugen“ zeigen auf, was sich früher ereignet hat bzw. was momentan abläuft (Kienholz und Graf 2000). Sie werden in der **Karte der Phänomene** dargestellt. Die dadurch dokumentierten Prozessräume und Zeugnisse liefern wertvolle Hinweise zur Ausscheidung potenzieller Gefahrenbereiche, helfen bei der Abschätzung der Wiederkehrperiode, der Festlegung von Szenarien und bei der Eichung von Prozesssimulationen (Kienholz und Krummenacher 1995, BAFU 2016). Neben Beurteilungen vor Ort können auch Methoden der Fernerkundung (Luftbilder, Orthophotos, LIDAR mit Darstellung des Oberflächenmodells als „hills-hade“) bei der Erstellung von Ereigniskataster und der Karte der Phänomene wertvolle Dienste leisten. Weitere Angaben zu früheren Prozessen finden sich auch in Chroniken.

3 Rutschung oder Hangmure?

Für Hangprozesse existieren zahlreiche Definitionen und Klassifizierungssysteme (z.B. Hungr et al. 2014). Gemäss AGN (2004) können Rutschungen im weiteren Sinne unterschieden werden in permanente Rutschungen oder Hangkriechen, spontane Rutschungen und Hangmuren (Abbildung 3). Als spontane Rutschung wird eine Lockergesteinsmasse bezeichnet, die aufgrund eines plötzlichen Verlustes der Scherfestigkeit des Bodens unter Ausbildung einer Gleitfläche schnell abgleitet. Flachgründige Rutschungen sind nach BAFU (2016) spontane Rutschungen, deren Gleitflächen sich in einer Tiefe von weniger als 2 m befinden. Bei starker Verflüssigung der Rutschmasse kann das Gemisch aus Lockergestein und Wasser über grössere Strecken über den Hang als sogenannte Hangmure abfliessen - dies im Gegensatz zu Murgängen,

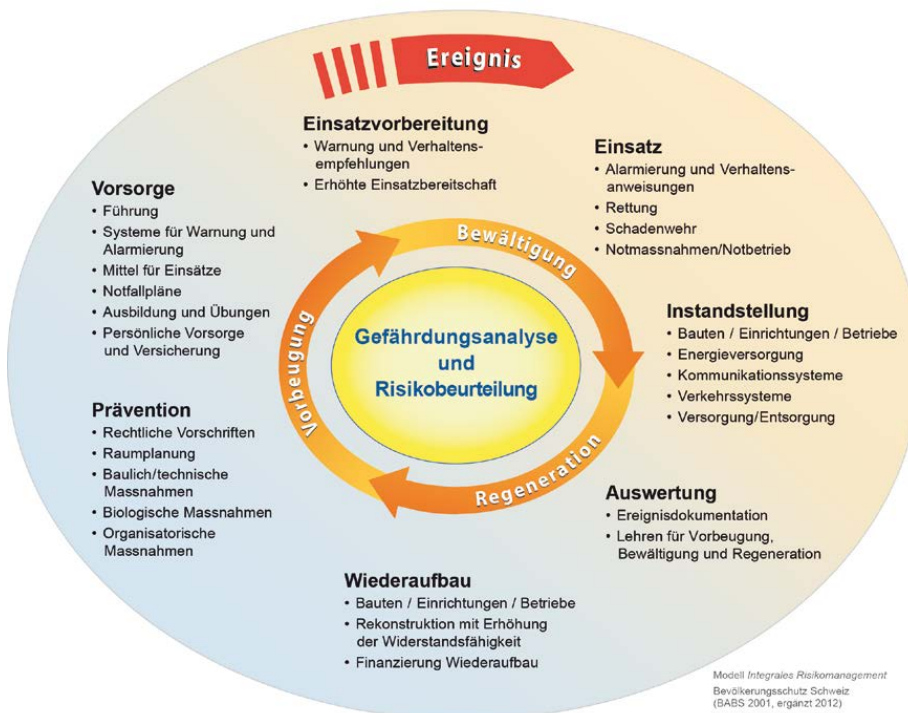


Abbildung 2: Kreislauf integrales Risikomanagement: Ereignisdokumentation sowie die entsprechenden Lehren im Rahmen der Regeneration nach Ereignissen (BABS 2014).

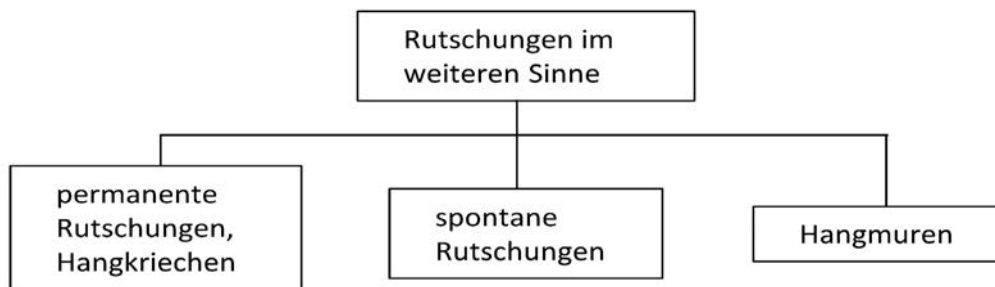


Abbildung 3: Klassifikation von Rutschungen im weiteren Sinne (AGN 2004; siehe auch BAFU 2016).

die topographisch an ein Gerinne gebunden sind. Neben dem Verlust der Scherfestigkeit kann auch hydraulischer Grundbruch zu Hangmuren führen.

Hangmuren und flachgründige Rutschungen sind von der bodenmechanischen Entstehung her unterschiedliche Prozesse. Bei flachgründigen Rutschungen findet ein Scherbruch statt. Bei den Hangmuren spielen sich jedoch Vorgänge ab, welche einem hydraulischen Grundbruch ähnlich sind. Zwischen den beiden Phänomenen bestehen graduelle Übergänge. Im Feld sind solche Unterschiede häufig nicht genau eruierbar (Bollinger et al. 2009).

Die Unterscheidung zwischen spontanen Rutschungen und Hangmuren kann im Gelände aufgrund der Verlagerung des Rutschungsmaterials und des entsprechenden Erscheinungsbildes erfolgen (WSL/BAFU 2018). Bei spontanen Rutschungen sind noch einige grössere kompakte Schollen der bewegten Lockergesteinsmasse erkennbar und die Auslaufstrecke ist meist kürzer als die doppelte Länge des Rutschungsanrisses. Als Hangmuren werden Prozesse bezeichnet, bei denen die Auslaufstrecke mehr als die doppelte Länge der Rutschung beträgt und das bewegte Material überwiegend stark verflüssigt ist, so dass in der Ablagerung kaum mehr kompakte Schollen sichtbar sind.

4 Rutschungsinventare

Im Verlauf der letzten Jahre wurden in verschiedenen Ländern des Alpenraumes zahlreiche Rutschungsinventare erstellt (Rickli et al., im Druck). Dabei können unterschiedliche Ziele verfolgt werden (Guzzetti et al. (2012): 1) Erhebung des Ausmasses der Ereignisse, 2) Beschreibung der Verteilung der Prozessstypen und deren Ausprägungen, 3) Grundlage oder Vorstufe zu einer Gefahrenhinweiskarte und 4) Untersuchungen zur Landschaftsentwicklung. Je nach Zielsetzung liegt der Fokus eher auf der wissenschaftlichen (z.B. Analyse Einflussfaktoren Auslauf) oder der praxisorientierten Seite (z.B. für Gefahrengrundlagen). Verschiedene Typen von Inventaren sind bekannt (Hagen et al. 2015):

- Archivinventar (oder historisches Inventar): Informationen zu Rutschungen aus Literatur, Chroniken und Archiven. Zeigt die kumulierte Auswirkung mehrerer Ereignisse in einem Gebiet.
- Ereignisinventar: Inventar von Rutschungen die durch das gleiche, auslösende Ereignis (z.B. Starkniederschlag, Schneeschmelze, Erdbeben) entstanden sind.
- Langzeitinventar: mittels Auswertung von Luftbildern unterschiedlichen Datums können z.B. saisonale Inventare oder Inventare über noch längere Zeitperioden (z.B. mehrere Jahrzehnte) erstellt werden.

In der Schweiz wurden in der Vergangenheit vor allem Ereignisinventare erstellt. Dabei wurde nach Unwettern jeweils in einer besonders stark betroffenen Region ein Untersuchungsperimeter ausgeschieden (Abb. 4) und dann innerhalb der Perimetergrenzen alle Rutschungen mit einem Volumen von mehr als 30 m³ im Feld dokumentiert. Beabsichtigt wurden damit einerseits bessere Kenntnisse zur Disposition und zum Auslauf der Hangmuren im Hinblick auf die Erstellung von Gefahrengrundlagen sowie andererseits eine Verbesserung der Datengrundlage für wissenschaftliche Zwecke. Je nach Art und Durchführung einer Inventur ergeben sich bestimmte Vor- und Nachteile (Schmaltz et al. 2017). Die Vorteile der von uns angewendeten Methode des Ereignisinventars liegen in der Erfassung des vollständigen Spektrums der bei einem bestimmten Niederschlag entstandenen Hangprozesse sowie im Bezug zu Vegetation, Geologie und Topographie des Untersuchungsgebietes. Der Zeitaufwand für die Felderhebungen ist jedoch bei dieser Art der Dokumentation erheblich.

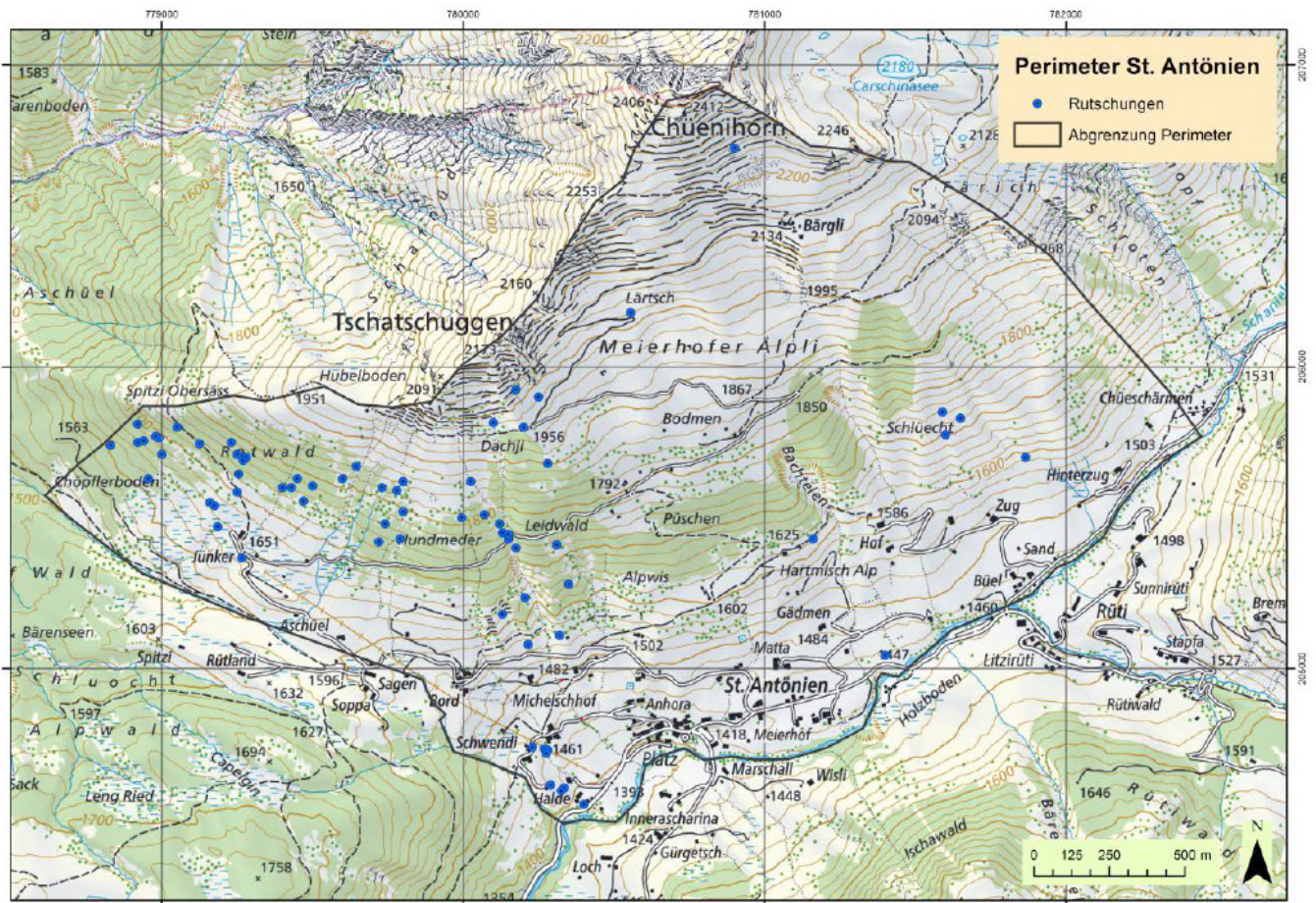


Abbildung 4: Beispiel eines Untersuchungsgebietes: Inventar der Rutschungen in St. Antonien GR (Unwetter 2005).

5 WSL-Rutschungsdatenbank

Seit 1997 wurden durch die WSL jeweils nach Schadenergebnissen in verschiedenen Regionen der Schweiz zahlreiche flachgründige Rutschungen und Hangmuren im Feld beurteilt (Tabelle 1).

Ursprünglich waren die Felddaten der verschiedenen Inventare in separaten, nicht öffentlich zugänglichen Datenbanken gespeichert. Diese konnten nun in eine umfassende Datenbank überführt werden, welche gemeinsam mit dem Bundesamt für Umwelt BAFU erarbeitet wurde. Zur Datenbank existiert eine Web-Applikation (<https://hangmuren.wsl.ch/>), auf welcher die Informationen eingesehen werden können und die den Export ausgewählter Daten erlaubt. Neben der Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen leistet die Datenbank wertvolle

Tabelle 1: Aktueller Datenumfang der WSL-Rutschungsdatenbank; Unwetterereignisse mit vielen Rutschungen und Erhebung durch die WSL. ^{a)} Erhebung im Rahmen von Diplomarbeiten mit Betreuung durch WSL; ^{b)} Erhebungen 2014 durch ausgewählte Ingenieurbüros.

Ereignisjahr	Gebiet (Anzahl Rutschungen)	Total Rutschungen
1997	Sachseln (n=280)	280
2002	Napf (n=64), Appenzell (n=107), Surselva (n=35 ^{a)})	206
2005	Napf (n=58), Entlebuch (n=90), St. Antonien (n=69)	217
2012	Eriz (n=38 ^{a)})	38
2014 ^{b)}	Kanton BE (n=12), AI (n=1), AR (n=1), GR (n=2)	16
1997-2014		757

Dienste bei der Erstellung von Gefahregrundlagen wie Gefahrenhinweis- oder Gefahrenkarten.

Jede Rutschung ist in der Datenbank mit über 100 Parametern beschrieben. Diese sind den nachfolgenden Hauptkapiteln zugeordnet:

- Grunddaten und Messungen (Nummerierung, Lokalisierung, Zeitinformation, Abmessungen)
- Beurteilung Rutschhang (geol./tekto-

nische Lage, Morphologie, Hydrologie, Vegetation/Nutzung)

- Charakterisierung Rutschung (Prozess und Auslauf, Boden, Geologie, Schutzbauten)
- Schäden (Menschen/Tiere, Infrastruktur, Sachwerte)
- Meteorologie (auslösender Niederschlag, Witterung)
- Förder- und Auslösefaktoren

- Metadaten (Erhebung, bestehende Gefahregrundlagen)

In der Datenbank gespeichert sind zudem Skizzen, Bilder und weitere Informationen wie z.B. GIS-Daten der Ablagerungen. Für die Nachvollziehbarkeit zentral ist eine Anleitung, wie die zu erhebenden Parameter definiert sind und wie sie beurteilt werden sollen. Gleichzeitig mit der Erstellung der neuen Datenbank wurden die bestehende Anleitung und die entsprechenden Erhebungsformulare überarbeitet (WSL/BAFU 2018, mit Beiträgen der Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN). Die Dokumentation kann im Feld sowohl wie bisher mit Papierformularen als auch mit einem feldtauglichen Tablet durchgeführt werden. Auf dem Tablet sind neben den Eingabe-Masken für die einzelnen Parameter auch die bereits früher erfassten Rutschungen sowie die Feld-Anleitung mit den entsprechenden Parameterdefinitionen ersichtlich. Die WSL-Rutschungsdatenbank umfasst derzeit (Stand September 2019) Informationen zu insgesamt 757 flachgründigen Rutschungen und Hangmuren, die sich hauptsächlich während acht Starkregen-Ereignissen in verschiedenen Gebieten der Schweiz lösten (Tabelle 1). Im Fall von künftigen Unwettern mit zahlreichen Hanginstabilitäten wird das BAFU in Absprache mit der WSL und in Abhängigkeit von Geologie und Gebiet über neue Erhebungen entscheiden. Diese können z.B. auch im Rahmen von Aufträgen des BAFU an Ingenieurbüros erfolgen. Dabei ist sowohl die Dokumentation von einigen wenigen ausgewählten, besonders interessanten Rutschungen denkbar, oder auch eine umfassende Erhebung in einem klar bezeichneten und abgegrenzten Perimeter (bei primär wissenschaftlicher Zielsetzung).

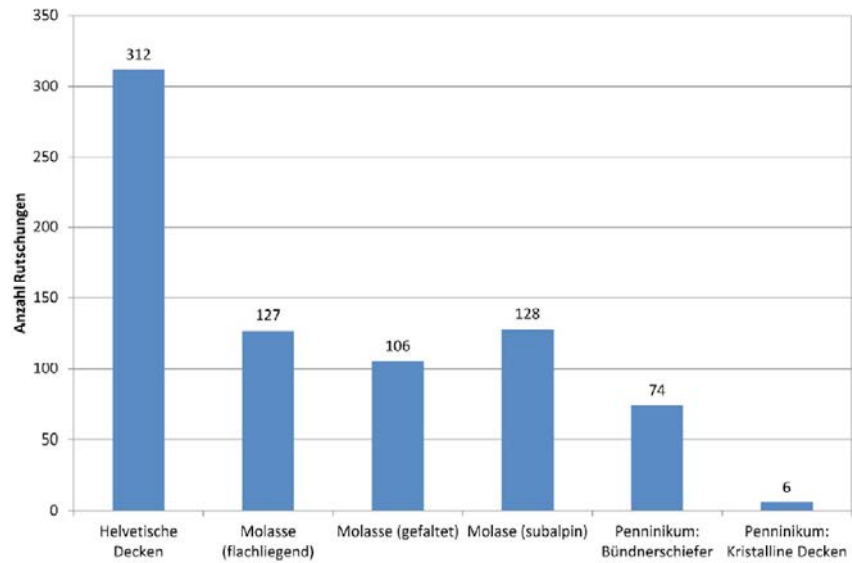


Abbildung 5: Tektonische Lage der Rutschungen.

6 Auswertungen ausgewählter Parameter

Mit der Web-Applikation der WSL-Rutschungsdatenbank können Daten ausgewählt und in eine Excel-Datei exportiert werden. Damit sind auf einfache Weise Auswertungen zu verschiedenen Fragestellungen möglich. Nachfolgend sind einige Beispiele aufgeführt, wobei die entsprechenden Ergebnisse nur dargestellt sind, ohne sie im Detail zu interpretieren.

Geologie: Zu jeder Rutschung sind in der Datenbank unter anderem die tektonische Lage¹ und die Hauptlithologie² erfasst. Dies erfolgte nicht im Feld, sondern nachträglich mittels Verschneiden der digitalen Geologischen Karte der Schweiz 1:500'000 bzw. des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 mit den Positionsdaten der Rutschung. Am meisten Rutschungen ereigneten sich gemäss Abbildung 5 und untenstehender Aufzählung in den Gebieten der Helvetische Decken und der verschiedenen Molasse-Typen (siehe auch Tabelle 1 für Anzahl Rutschungen in den Inventaren).

- Helvetische Decken: hauptsächlich Inventare Sachseln und Surselva

- Flachliegende Molasse: hauptsächlich Inventare Napf 2002 und Napf 2005
- Gefaltete Molasse: hauptsächlich Inventar Appenzell 2002
- Subalpine Molasse: hauptsächlich Inventare Entlebuch 2005 und Eriz 2012
- Bündner Schiefer: hauptsächlich Inventar St. Antonien 2005

In Abbildung 6 sind die Neigungsbereiche der Rutschungen in den am häufigsten vorkommenden Hauptlithologien dargestellt. Der Median der Neigungen ist bei Rutschungen mit Hauptlithologie Gneis mit 38° am höchsten und bei Rutschungen im Sandstein mit 32° am niedrigsten.

Auslauf Rutschmasse: Bei jeder Rutschung wurden im Feld unter anderem die Auslaufstrecke und das Pauschalgefälle bestimmt (jeweils vom Anriss bis zum Ende der Ablagerung gemessen). In Abbildung 7 ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Volumen die Pauschalgefälle tendenziell kleiner werden, wobei die Streuung der Daten erheblich ist. Die maximalen Pauschalgefälle (obere Begrenzungslinie in blau) liegen bei kleineren Rutschungen mit Volumen um 100 m³ etwa bei 40° und bei Volumen um 1000 m³ etwa bei 30°. Zu bemerken ist, dass nur bei etwa einem Viertel der

¹ Tektonik: geologischer Aufbau

² Lithologie: Gesteinsart

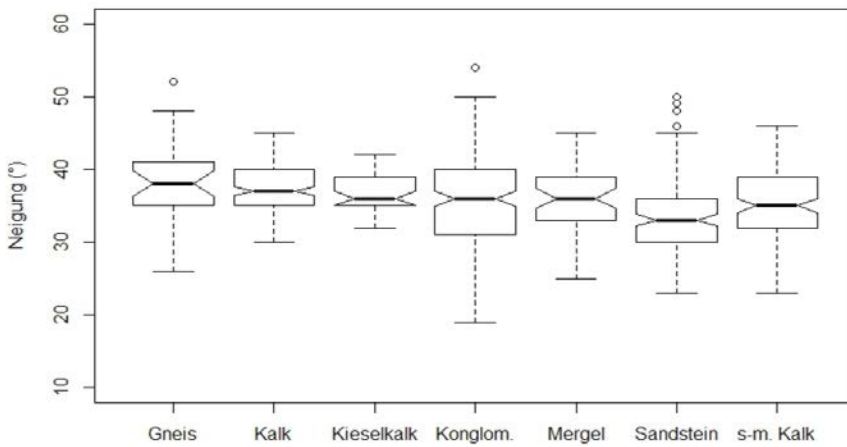


Abbildung 6: Neigungsbereiche von Rutschungen in verschiedenen Hauptlithologien (Konglom. = Konglomerate, s-m. Kalk = schiefriger bis mergeliger Kalk).

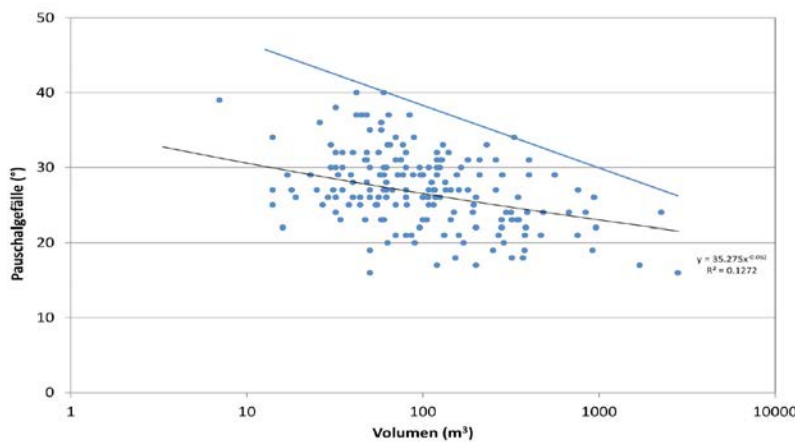


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Pauschalgefälle und Volumen der Hangmuren (n=185). x-Achse mit logarithmischem Massstab; blaue Linie: maximale Pauschalgefälle, schwarze Linie: Regressionslinie.

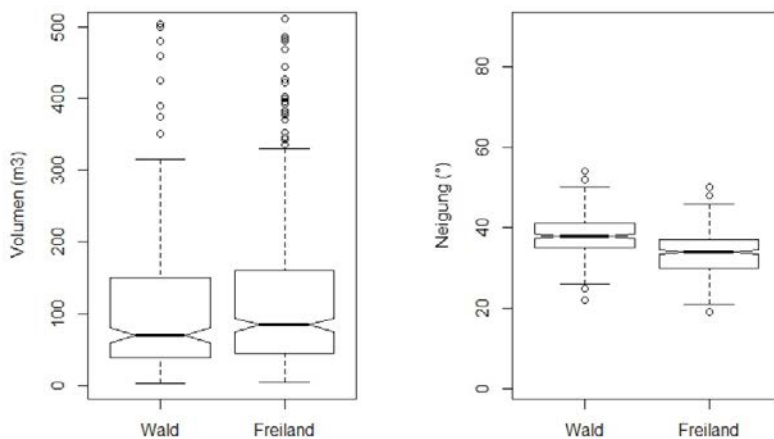


Abbildung 8: Unterschiede zwischen Rutschungen im Wald und im Freiland. Links: Volumen (Wald: n=279, Freiland: n=340); rechts: Neigungen (Wald: n=305, Freiland: n=357).

Rutschungen (n=185) der Auslauf ungestört war und nicht bis in ein Gerinne reichte, so dass ein aussagekräftiger Wert für das Pauschalgefälle ermittelt werden konnte.

Vegetation: In Abhängigkeit der Vegetation beim Anriss wurden die Rutschungen entweder dem Wald oder dem Freiland zugeordnet. Die Waldrutschungen entstanden in vergleichsweise steileren Lagen und umfassten ein kleineres Volumen als Rutschungen im Freiland (Abbildung 8). Zu berücksichtigen ist dabei, dass Wald meist in steileren Lagen vorkommt.

7 Folgerungen

Die ausführliche Dokumentation von Gefahrenprozessen nach Unwetterereignissen ist sehr wichtig. Im Ereignisfall sollte ihr deshalb trotz Überlastung/Zeitmangel gebührend Rechnung getragen werden. Das dargestellte Vorgehen zur Erfassung von Daten bei Rutschungen und die neue Datenbank leisten wertvolle Beiträge bei der Erstellung von Gefahrengrundlagen. Bei künftigen Ereignissen sollte die Datenbank nach Möglichkeit mit weiteren Felddaten ergänzt werden.

8 Dank

Für die wertvollen Hinweise zum Manuskript bedanke ich mich bei Alexandre Badoux, Frank Graf, Christoph Graf, Roland Wyss und Bernard Loup.

9 Quellen

Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN (2004): Gefahreneinstufung Rutschungen i.w.S., Entwurf im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie, 17 S. + Anh.

Bezzola, GR., Hegg, C., (Ed.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707, 215 S.

- Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS (2014): Integrales Risikomanagement. Bedeutung für den Schutz der Bevölkerung und ihrer Lebensgrundlagen, 20 S.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2016): Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608, 98 S.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2019): Naturereigniskataster StorMe: Erhebungsformulare, Erfassungsrichtlinie und Anwendungshandbuch StorMe 3.0.
- Bollinger, D., Gruner, U., Wyss, R. (2009): Hochwasser August 2005 - Analyse der Hanginstabilitäten. Swiss Bull. angew. Geol. Vol. 14/1+2: 135-151.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.-T. (2012): Landslide inventory maps: New tools for an old problem. Earth Sci. Rev. 112, 42–66.
- Hagen, K., Huber, A., Fischer, J.T., Benedetti, L. (2015): Database of hydrologically-driven slope failures. Projektbericht MUMOLADE (Multiscale modelling of landslides and debris flows), 30 S.
- Hilker N., Badoux A., Hegg C. (2009): The Swiss flood and landslide damage database 1972-2007. Natural Hazards and Earth System Science 9 (3): 913–925.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014): The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 11/2: 167-194.
- Hübl, J., Kienholz, H., Loipersberger, A. (2002): DOMODIS-Documentation of mountain disasters. State of Discussions in the European Mountain Areas. International Research Society INTERPRAEVENT, Series 1, Manual 1, Klagenfurt (Austria), 40 pp.
- Kienholz, H., Graf, C. (2000): Kompendium: Vom Gelände zur Karte der Phänomene. Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT), Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 60 S.
- Kienholz, H., Kruppenacher, B. (1995): Empfehlungen-Symbolbalken zur Kartierung der Phänomene, Ausgabe. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), 41 S.
- Plattform Naturgefahren der Alpenkonvention PLANALP (2006): Dokumentation von Naturereignissen, 68 S.
- Rickli, C., Graf, F., Bebi, P., Bast, A., Loup, B., McArdeil, B. (im Druck): Schützt der Wald vor Rutschungen? Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank, Schweiz. Zeitschr. für Forstwesen.
- Ruf, W., 2013: Weiterentwicklung von StorMe - Stand der Arbeiten und Ausblick. Agenda FAN 1/2013: 9-11.
- Schmaltz, E., Steger, S., Glade, T. (2017): The influence of forest cover on landslide occurrence explored with spatio-temporal information. Geomorphology 290: 250-264.
- WSL/BAFU (2018): Dokumentation von Hangmuren und spontanen Rutschungen. Anleitung und Kommentar zum Aufnahmeformular. WSL/BAFU/AGN, 23.11.2018, 27 S.

Zentrale Fragestellungen bei der Wahl und Bemessung von Massnahmen gegen Hangmuren im Auslaufgebiet

Thomas Egli ¹ (egli@naturgefahr.ch)

¹ Egli Engineering AG, St. Gallen und Bern

Die Wahl und Bemessung von Massnahmen gegen Hangmuren erfordern Angaben zum verfrachteten Volumen und zum dynamischen Verhalten. Diese Grundlagen sind im Rahmen einer Hangmurenuntersuchung zu ermitteln, da die Gefahrenkarten und ihre Produkte hierfür in der Regel keine Anhaltspunkte liefern.

Einleitung

Hangmuren gehören zu den Naturgefahren mit sehr variabler Ausprägung. So kann zum Beispiel das verfrachtete Volumen einige hundert oder mehrere tausend Kubikmeter erreichen, die Fliessgeschwindigkeit kann tief (2 m/s) oder sehr hoch (15 m/s) sein und der Wasseranteil als die treibende Kraft variiert je nach Standort und Ereignis erheblich.

Im Rahmen der Gefahrenkartierung werden das Ausmass und die Intensität pro Gefahrenstelle ermittelt. Als Intensitätskriterien sind gemäss BAFU 2016 die Mächtigkeit der mobilisierbaren Masse und die Ablagerungshöhe der Feststoffe festgelegt. Es werden also keine Angaben zur eigentlichen Dynamik der Hangmure festgehalten.

Bemessung von Massnahmen im Auslaufgebiet

Die Bemessung von Massnahmen richtete sich bisher nach der Wegleitung Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren (Egli 2005) oder nach Angaben von Herstellern von Schutzmassnahmen (zum Beispiel Herstellerangaben

von Hangmurenschutznetzen). Zentral bei der Bemessung ist die erreichte Geschwindigkeit und das verfrachtete Volumen. An dieser Ausgangslage wird sich nicht viel ändern, wenn neu ab 2020 die Norm SIA 261/1 in Kraft tritt, welche die Einwirkungen auf Tragwerke von gravitativen Naturgefahren regelt.

Zentrale Fragestellungen

Aufgrund der oben beschriebenen Ausgangslage stellen sich bei der Wahl und Bemessung von Schutzmassnahmen folgende zentralen Fragestellungen:

Wie kann das verfrachtete Volumen eingegrenzt werden?

Wie kann die Geschwindigkeit der Hangmure abgeschätzt werden?

Wie gross sind die Unsicherheiten, welche verbleiben?

Im Rahmen der Massnahmenwahl und der Bemessung müssen nachvollziehbare Antworten und entsprechende Schlussfolgerungen auf diese zentralen Fragestellungen gefunden werden.

Mögliche Vorgehensweisen

Je nach Kenntnisstand zur Gefahrenquelle und der Art des zu schützenden Objektes resp. der Art der vorgesehen Schutzmassnahme wer-

den die weiteren Abklärungen unterschiedlich ausfallen. Untersuchungen im Anrissgebiet können Erkenntnisse zur Eingrenzung des verfrachteten Volumens liefern. Werden zum Beispiel Rammsondierungen durchgeführt, welche zeigen, dass die Felsoberfläche 80 cm unter Terrain liegt, so kann die Anrissmächtigkeit und das verfrachtete Volumen nachvollziehbar eingegrenzt werden. Die Eingrenzung des Geschwindigkeitsbereiches kann mit Hilfe eines Prozessmodells erfolgen, insbesondere wenn ein dokumentiertes Ereignis vorliegt, welches für den zu untersuchenden Standort als Referenzbeispiel eingestuft werden kann. Die Eingrenzung der Geschwindigkeit ist zentral für die Bemessung einer Schutzmassnahme. Der wirkende Druck q_f (vgl. Abbildung 1) leitet sich (neben weiteren Faktoren) aus dem Quadrat der Geschwindigkeit ab. Entsprechend muss die Geschwindigkeitsabschätzung nachvollziehbar dargelegt werden. Eine unterschätzte Geschwindigkeit führt zu einer zu schwachen Bemessung der Schutzmassnahme. Von grosser Bedeutung ist diese Unsicherheit, wenn die Schutzmassnahme ein starres Element ist (zum Beispiel eine Gebäudemauer) und dessen Versagen zu einer direkten Bedrohung von Personen führt (vgl. Abbildung 2).

Unsicherheiten in Bezug auf die Geschwindigkeit sind weniger gravierend im Fall von flexiblen Schutzmassnahmen (zum Beispiel Schutznetze), weil dort für den Bremsvorgang

viel Wegstrecke zur Verfügung steht und zusätzliche Energieabsorptionselemente die Energie absorbieren. Ebenfalls gutmütig resp. robust gegen Unsicherheiten sind Schutzdämme einzustufen, weil in der Regel grosse Reserven bestehen in Bezug auf die zulässigen Drücke. Zudem hat das Versagen von solchen vorgelagerten Schutzmassnahmen vor einem Gebäude in der Regel noch nicht die direkte Bedrohung von Personen als Folge.

Unsicherheiten in Bezug auf das verfrachtete Volumen sind bedeutungsvoll, wenn das unterschätzte Volumen zu einer höheren Fließ- und Stauhöhe führt. Dies ist zum Beispiel bei einer Gebäudemauer durch den Aufstau der Fall. Bei einem Erddamm oder Schutznetz kann die Folge davon ein Über- und Umströmen der Schutzkonstruktion sein.

Schlussfolgerungen

Die Wahl und Bemessung von Schutzmassnahmen gegen Hangmuren im Auslaufbereich stellt eine hohe Anforderung an die hiermit betraute Fachperson. Die Aussagen der Gefahrenkarte und deren Produkte wie der Technische Bericht genügen in der Regel nicht als Grundlage für die Projektierung von Schutzmassnahmen. Es sind weitergehende Untersuchungen notwendig, wenn die Wahl von Schutzmassnahmen nachvollziehbar hergeleitet und bemessen werden müssen.

Es liegt in der Verantwortung der hiermit betrauten Fachperson dem Bauherrn diese zusätzlichen Untersuchungen vorzuschlagen und zu begründen. So wie die Baugrunduntersuchung bei der Erstellung eines Neubaus angezeigt ist, um zum Beispiel die Bemessung der Foundation durchführen zu können, so ist die Hangmurenuntersuchung notwendig für die Wahl und Bemessung der geeigneten Schutzmassnahmen.

Die getroffenen Annahmen für die Bemessung der Schutzmassnahmen und die verbleibenden Risiken sind im Rahmen des Bauprojektes

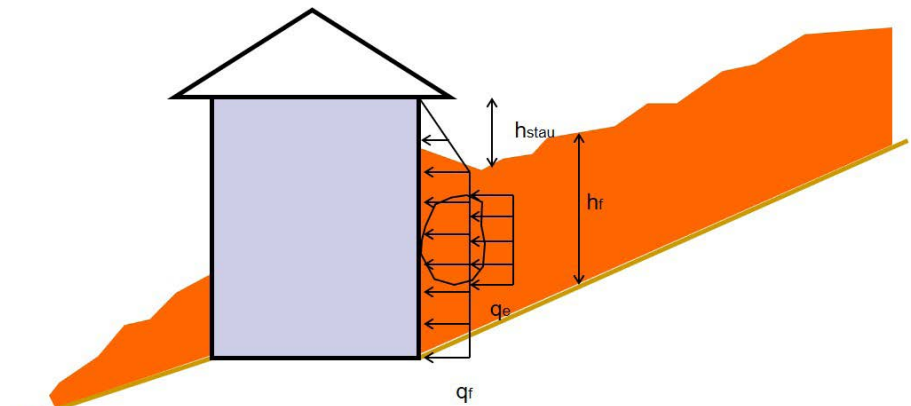


Abbildung 1: Übersicht der Einwirkungen von Hangmuren (aus Egli 2005). Dabei bedeuten: hf: Fließhöhe, hstau: Stauhöhe, qf: hydrodynamischer Druck, qe: statischer Druck einer Einzellast.



Abbildung 2: Beschädigung der Tragkonstruktion eines Gebäudes in Gersau 2005 (Foto: Egli Engineering AG)

in der Nutzungsvereinbarung darzulegen und vom Bauherrn unterzeichnen zu lassen.

Dank

Ich bedanke mich bei Corinna Wendeler (Tiefbauamt Appenzell A.Rh. Herisau) und bei Andreas Keller (Bächtold & Moor AG Bern) für das Review dieses Fachbeitrages.

Quellen

BAFU 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen, Bundesamt für Umwelt, Bern

BAFU 2016: Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren, Bundesamt für Umwelt, Bern.

Egli 2005: Wegleitung Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren. Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen, Bern

Loup B. et al. 2012: Impact pressure of hillslope debris flows – Back-calculation and simulation (RAMMS), 12. Internationaler Kongress Interpraevent 2012, Tagungsband, Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Grenoble

Norm SIA 261/1 (in Vorbereitung): Einwirkungen auf Tragwerke – Ergänzende Festlegungen, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich



Rutschanriss im Wald bei St. Antönien GR, Unwetter 2005, Foto: WSL



Hangmure in Flühli LU, Unwetter 2005, Foto: WSL