Mitteilungsblatt Nr. 3 / 2020, Oktober 2020 | Bulletin no 3 / 2020, octobre 2020 | Bollettino n. 3 / 2020, ottobre 2020

INGENIEURBIOLOGIE
GÉNIE BIOLOGIQUE
INGEGNERIA NATURALISTICA
INSCHENIERA BIOLOGICA

SPONTANE RUTSCHUNGEN UND HANGMUREN

GLISSEMENTS DE TERRAIN SPONTANÉS ET LAVES TORRENTIELLES

FRANE SPONTANEE E COLATE DETRITICHE

Inhalts-verzeichnis

3 *Christian Rickli*
Editorial *Christoph Graf*

5 *Alexandru Marin*
Bodenmechanische Aspekte bei flachgründigen Rutschungen

14 *Frank Graf*
Schutz – Wald – Struktur: Einfluss auf flachgründige Rutschungen *Alexander Bast*
Christian Rickli
Peter Bebi

21 *Peter Lehmann*
Die Rolle der Bodenhydrologie auf die Auslösung flachgründiger Rutschungen

29 *Roland Wyss*
Aspekte der Beurteilung spontaner Rutschungen und Hangmuren *Benjamin Stricker*

37 *Elena Leonarduzzi*
Niederschlagsschwellenwerte für flachgründige Rutschungen in der Schweiz: Vorteile und Limitationen *Peter Molnar*

44 *Christian Rickli*
Dokumentation von spontanen flachgründigen Rutschungen und Hangmuren

51 *Albrecht von Boetticher*
Praxisanwendung der 3D-Hangmuren-simulation zur Bestimmung der Einwirkungen

Titelbild/Frontispice:
Rutschungen und Hangmuren in St. Antönien GR ausgelöst durch die Starkniederschläge vom August 2005 (Foto: Ch. Rickli, WSL).

Glissements de terrain et laves torrentielles dans la région de St. Antönien GR causés par les fortes précipitations du mois d'août 2005 (photo : Ch. Rickli, WSL).

Frane e movimenti di versante a St. Antönien GR causate dalle forti piogge dell'agosto 2005 (Foto: Ch. Rickli, WSL).

Editorial

Christian Rickli
Christoph Graf

Liebe Leserin, lieber Leser

Während Starkregenereignissen kommt es immer wieder zu flachgründigen Rutschungen und Hangmuren mit zum Teil erheblichen Schäden. Trotz meist kleinen Volumina sind die Gefahren erheblich, da die Prozesse schwierig zu prognostizieren sind - sowohl räumlich (Gefahrenbeurteilung und -kartierung) als auch zeitlich (Warnung, Alarmierung). Seitens Praxis und der für die Umsetzung zuständigen Behörden stellen sich deshalb zahlreiche Herausforderungen in der Beurteilung von und im Umgang mit spontanen Rutschungen und Hangmuren.
Der Verein Fachleute Naturgefahren FAN (fan-info.ch) setzt sich für den ganzheitlichen Schutz vor Naturgefahren ein und befasst sich mit den Gefahrenprozessen Hochwasser/Murgang, Lawinen, Rutschungen und Sturz. Wichtig ist dabei insbesondere die interdisziplinäre Beurteilung der gefährlichen Prozessen. Ein zentrales Anliegen der FAN ist zudem die Förderung des Erfahrungsaustausches zwischen Praxis, Forschung und Fachbehörden. Der Weiterbildungskurs vom 24. und 25. Oktober 2019 war dem Thema «Umgang mit spontanen Rutschungen und Hangmuren» gewidmet und stellte einen wichtigen Meilenstein in Richtung einer besseren Beurteilung und einheitlichen Berücksichtigung der Prozesse dar, der das Wissen und die Erfahrungen der letzten Jahre in einer praxistauglichen Form zusammenführen soll.
In Absprache mit der FAN haben wir entschieden, ausgewählte Themen aus den Kursunterlagen im vorliegenden Heft zu veröffentlichen und so einem erweiterten Fachpublikum zugänglich zu machen. Die Artikel beleuchten verschiedene zentrale Aspekte von flachgründigen spontanen Rutschungen und Hangmuren: Grundlagen zu Bodenmechanik (Alexandru Marin), Bodenphysik (Peter Lehmann) und Geologie (Roland Wyss), Vegetations- und Waldwirkungen auf die Hangstabilität (Frank Graf), Angaben zu Niederschlägen bei der Prozessauslösung (Elena Leonarduzzi) und die Bedeutung der Dokumentation von Ereignissen (Christian Rickli). Zusätzlich zu den Kursunterlagen des FAN-Herbstkurses 2019 wird in einem weiteren Beitrag die Modellierung von Hangmuren thematisiert (Albrecht von Boetticher).
Wir wünschen Ihnen beim Lesen viel Vergnügen.

Christian Rickli, Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Massenbewegungen, Eidg. Forschungsanstalt WSL
Christoph Graf, Präsident Fachleute Naturgefahren FAN

Chère lectrice, cher lecteur,

Lors de fortes précipitations, des glissements de terrain peu profonds et des laves torrentielles se produisent de manière répétée, avec parfois des dégâts considérables. Même avec des volumes généralement faibles, les dangers sont considérables, car les processus sont difficiles à prévoir - tant sur le plan spatial (évaluation et cartographie des dangers) que temporel (alerte, avertissement). Dans la pratique et pour les autorités responsables de la mise en œuvre, de nombreuses questions se posent donc dans l'évaluation et le traitement des glissements de terrain spontanés et des laves torrentielles.
L'Association des spécialistes des dangers naturels FAN (fan-info.ch) s'engage en faveur d'une protection globale contre les risques naturels et s'occupe des processus de crue, de lave torrentielle, d'avalaches, de glissements de terrain et de chutes. L'évaluation interdisciplinaire des processus dangereux revêt une importance particulière. Une des préoccupations centrales de la FAN est également de promouvoir les échanges d'expériences entre la pratique, la recherche et les autorités spécialisées. Le cours de formation continue des 24 et 25 octobre 2019 était consacré au thème de la «Gestion des glissements de terrain spontanés et des laves torrentielles» et représentait une étape importante vers une meilleure évaluation et une prise en compte uniforme des processus, devant permettre de rassembler les connaissances et les expériences de ces dernières années sous une forme adaptée à une application pratique.
En accord avec la FAN, nous avons décidé de publier dans ce bulletin des sujets choisis parmi la documentation du cours et de les rendre ainsi accessibles à un public professionnel plus large. Les articles mettent en lumière divers aspects centraux des glissements de terrain spontanés peu profonds et des laves torrentielles : les bases de la mécanique des sols (Alexandru Marin), la physique des sols (Peter Lehmann) et la géologie (Roland Wyss), les effets de la végétation et des forêts sur la stabilité des pentes (Frank Graf), les informations sur les précipitations lors du déclenchement du processus (Elena Leonarduzzi) et l'importance de documenter les événements (Christian Rickli). Outre la documentation du cours de la FAN en automne 2019, un article traite de la modélisation des laves torrentielles (Albrecht von Boetticher).
Nous vous souhaitons beaucoup de satisfaction lors de la lecture de ce bulletin.

Christian Rickli, Unité de recherche Hydrologie de montagne et mouvements de masse, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL
Christoph Graf, Président des spécialistes des dangers naturels FAN

Cara lettrice, caro lettore,

In caso di forti precipitazioni, si verificano regolarmente scivolamenti superficiali e frane, in grado di causare danni ingenti. Nonostante i volumi solitamente ridotti, i pericoli sono considerevoli in quanto questi processi sono difficili da prevedere - sia geograficamente (valutazione dei pericoli e mappatura) che temporalmente (avvertimento, allarme). Nella pratica e da parte delle autorità competenti vi sono quindi numerosi interrogativi nella valutazione e nella gestione delle frane, spontanee e delle colate detritiche.
L'associazione degli specialisti in pericoli naturali FAN (fan-info.ch) è impegnata nella protezione contro i pericoli naturali e si occupa dei processi di pericolo di piena, colate detritiche, valanghe, frane e di caduta di massi. Di particolare importanza è la valutazione interdisciplinare dei processi pericolosi. Un obiettivo fondamentale della FAN è anche la promozione dello scambio di esperienze tra la pratica, la ricerca e le autorità competenti. Il corso di formazione avanzata del 24 e 25 ottobre 2019 è stato dedicato al tema «Affrontare frane e smottamenti spontanei» e ha rappresentato un'importante pietra miliare verso una migliore valutazione e considerazione uniforme dei processi. Lo scopo è riunire le conoscenze e le esperienze degli ultimi anni in una forma adatta all'applicazione pratica.
D'accordo con FAN, abbiamo deciso di pubblicare in questo numero alcuni argomenti selezionati della documentazione del corso e di renderli così accessibili a un pubblico professionale più ampio. Gli articoli evidenziano vari aspetti centrali degli smottamenti superficiali spontanei e delle colate detritiche: le basi della meccanica del suolo (Alexandru Marin), la fisica del suolo (Peter Lehmann) e la geologia (Roland Wyss), gli effetti della vegetazione e della foresta sulla stabilità dei pendii (Frank Graf), le informazioni sulle precipitazioni durante l'inizio del processo (Elena Leonarduzzi) e l'importanza di documentare gli eventi (Christian Rickli). Oltre al materiale didattico del corso autunnale FAN 2019, un articolo si occupa della modellizzazione delle colate detritiche (Albrecht von Boetticher).
Vi auguriamo una piacevole lettura.

Christian Rickli, Unità di ricerca Idrologia di montagna e movimenti di massa, WSL
Christoph Graf, Presidente Specialisti in pericoli naturali FAN

Boden-mechanische Aspekte bei flachgründigen Rutschungen

Alexandru Marin

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.

Keywords
Rutschungen, Auslöser, Einflussfaktoren, Stabilitätsbeurteilung, Labor- u. Feldversuche

Aspects mécaniques des glissements de terrain peu profonds

Résumé
En raison des conditions géographiques, les glissements de terrain sont l'un des risques naturels les plus importants en Suisse. De nombreux objets d'infrastructure et zones d'habitations sont menacés par ces derniers et, par conséquent, le traitement de ces événements revêt une importance particulière. L'identification et l'évaluation de la menace ainsi que la planification des mesures ne peuvent réussir que sur la base d'une compréhension claire du context géomecanique de ces processus. C'est pourquoi cet article comprend une brève introduction aux aspects géomécaniques des glissements de terrain. Après une définition générale des glissements de terrain et des laves torrentielles, la problématique des déclencheurs et des facteurs d'influence est examinés plus en détails. Ensuite, les approches les plus couramment utilisées pour l'évaluation de la stabilité des pentes sont expliquées et les essais en laboratoire et sur le terrain pour l'observation des glissements de terrain sont résumés.

Mots-clés
Glissement de terrain, déclencheur, facteurs d'influence, évaluation de la stabilité, essais en laboratoire et sur le terrain.

HINWEIS:
Dieser Artikel wurde für die Kursunterlagen zum FAN-Herbstkurs 2019 mit Thema «Umgang mit flachgründigen Rutschungen und Hangmuren» verfasst und steht nun in leicht überarbeiteter Form für das Mitteilungsblatt des Vereins für Ingenieurbiologie zur Verfügung.

Caratteristiche meccaniche del suolo di scivolamenti superficiali

Riassunto

A causa delle condizioni del territorio, le frane sono uno dei pericoli naturali più importanti della Svizzera. Numerose infrastrutture e insediamenti sono minacciati e di conseguenza la gestione di tali eventi è di particolare importanza. L'identificazione e la valutazione del pericolo e la pianificazione delle misure possono avere successo solo sulla base di una chiara comprensione del contesto geomeccanico di tali processi. Pertanto, questo articolo si occupa di una breve introduzione agli aspetti geotecnici di frane e slittamenti. Dopo una definizione generale di frane e smottamenti di versante, vengono considerati in modo più dettagliato i problemi dei fattori scatenanti e d'influenza. Successivamente vengono spiegati gli approcci più comunemente utilizzati per la valutazione della stabilità dei versanti e vengono riassunti i test di laboratorio e sul terreno per l'osservazione di scivolamenti.

Parole chiave

Frane, fattori scatenanti, fattori d'influenza, valutazione della stabilità, test di laboratorio e sul terreno

1. 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 meist 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.

2. 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. der 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 Hauptelemente von Rutschungen sowie eine typische Erscheinung von Hangmuren können der Abbildung 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 Abbildung 2a dargestellten Hauptmerkmale einer Rutschung spielen eine wichtige Rolle bei der frühzeitigen Erkennung eines potentiellen Hangversagens. Die Entwicklung von Zugrissen, Abriss- oder auch Querfalten im

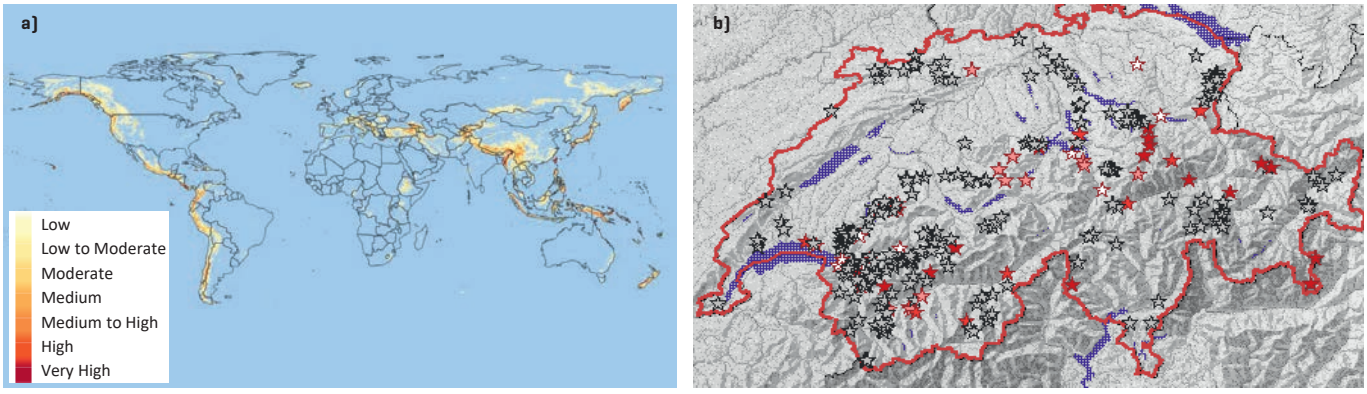


Abb. 1: (a) Globale und (b) nationale Rutschungsgefährdung (Dilley et al. 2005 und BRP et al. 1997). | Fig. 1: Risque de glissement de terrain a) au niveau global et b) au niveau national (Dilley et al. 2005 et BRP et al. 1997).

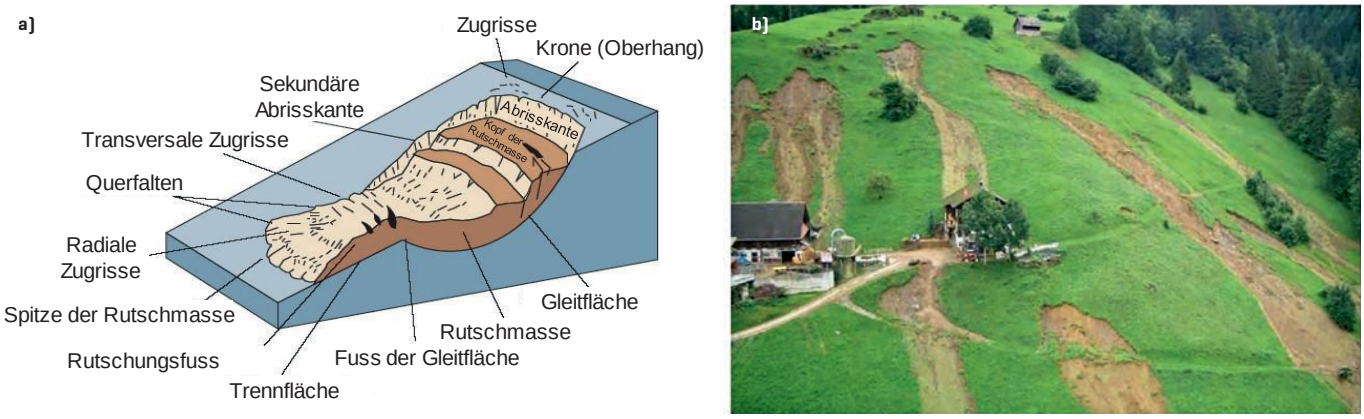


Abb. 2: (a) Hauptelemente einer allgemeinen Rutschung (nach USGS, 2004) und (b) typische Erscheinung von Hangmuren (Kanton NW, 2005). | Fig. 2: (a) Principaux éléments d'un glissement de terrain général (selon USGS, 2004) et (b) occurrence typique des laves torrentielles (canton NW, 2005).

Bereich des Böschungskopfs deutet in der Regel darauf hin, dass die Rutschmasse sich in einem 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 Abbildung 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 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.

3. 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 näheren Betrachtungen deutlich (Abb. 3).

Dicht gelagerte Sande erreichen zuerst aufgrund von Dilatanz einen Maximalwert der Festigkeit τ_{max} und erst bei höheren Dehnungen, wenn Bedingungen von konstanten Volumen 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 Residual Wert 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.

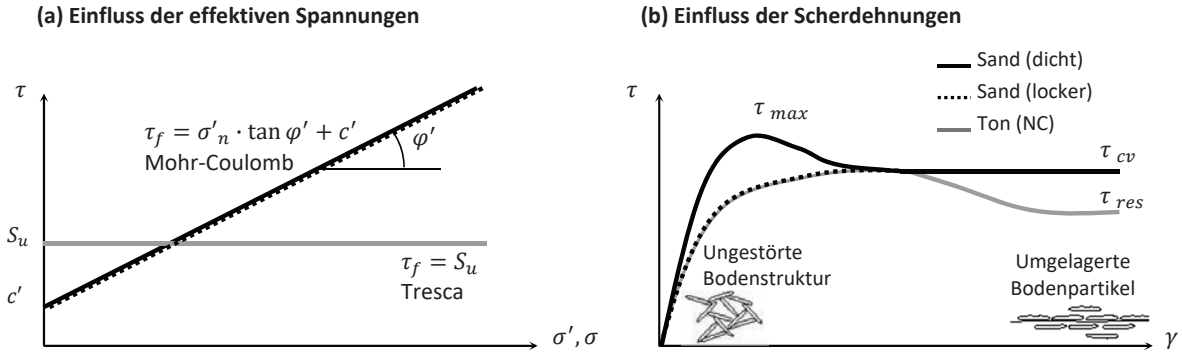


Abb. 3: Mobilisierbare Scherfestigkeit in sandigen und tonigen Böden in Abhängigkeit der effektiven Spannungen und Dehnungen. | Fig. 3: Résistance au cisaillement mobilisable dans les sols sableux et argileux en fonction des contraintes effectives et deplacements.

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 vom «unbewehrten» 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 Porenwasserdrücken 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 Saugspannungen im Porenwasser, die die scheinbare Kohäsion erzeugen (Ho & Fredlund, 1982).

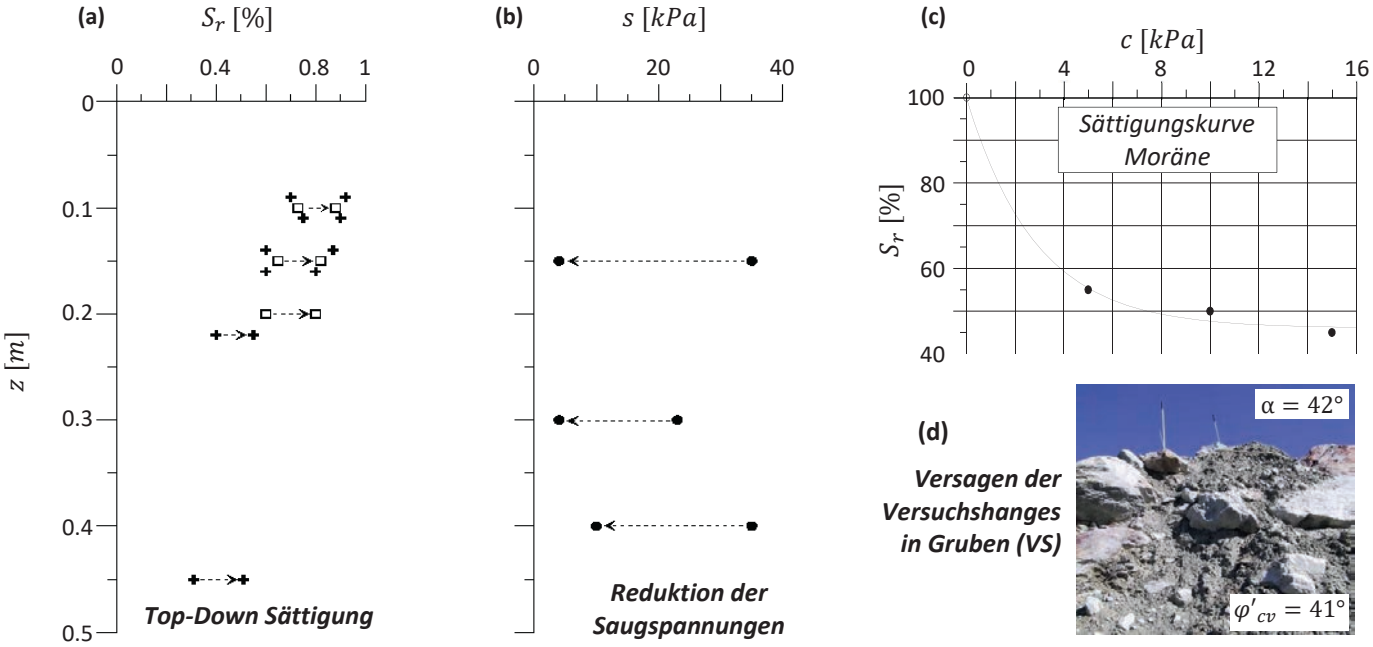


Abb. 4: Auswirkung des Niederschlags auf die Hangstabilität: (a) Zunahme der Sättigung S_r; (b) Abnahme der Saugspannungen s; (c) Aufsättigungskurve aus dem Labor; (d) Versagen des 42° steilen Moränehanges in Gruben (VS) (nach Springman et al. 2003). | Fig. 4: Effet des précipitations sur la stabilité des pentes: (a) augmentation de la saturation S_r; (b) diminution des absorptions par le sol s; (c) courbe de saturation issue du laboratoire; (d) défaillance de la pente en moraine à 42° à Gruben (VS) (d'après Springman et al. 2003).

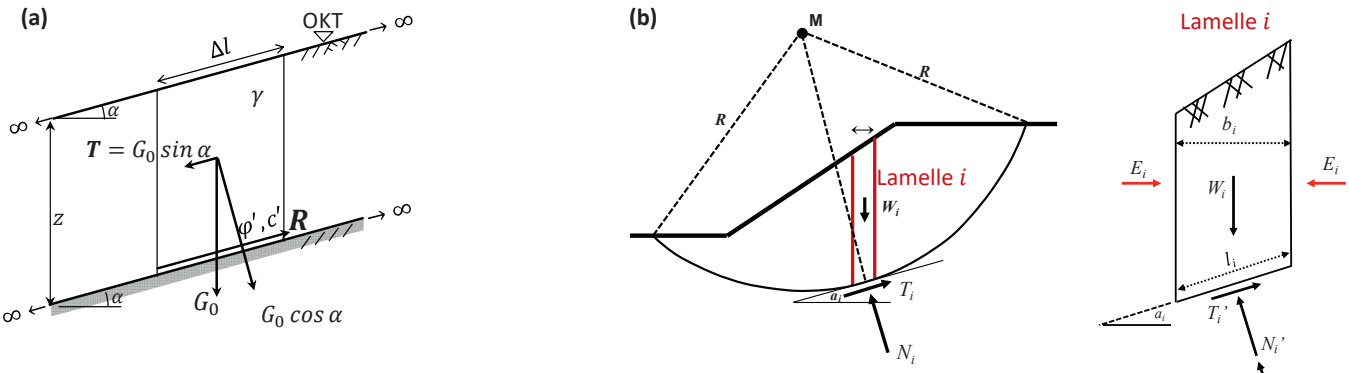
Wie Springman et al. (2012) aus ihren Feldversuchen in Gruben (VS), Tössegg (ZH) und Rüdlingen (SH) schliessen, verschwinden die Saugspannungen und damit auch die scheinbare Kohäsion, wenn der Boden durch Grundwasserspiegelerhöhungen, Niederschlag oder Schneeschmelze gesättigt wird. Weiterhin kann eine 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 Niederschlagereignissen 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 Aushubarbeiten 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 Erdbebenzeitverläufen 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, insbesondere in lockeren, feinkörnigen Böden geringer Durchlässigkeit, die verflüssigungsgefährdet sind (Sarma, 1975). Diese Erhöhung der Porenwasserdrücke führt zu einer Reduktion der rückhaltenden Kräfte und einer Destabilisierung des Hanges.

4. 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.

4.1. Grenzgleichgewichtsmethoden

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 Translationsrutschungen mit langen und wenig mächtigen Rutschmassen anhand dieser Methode mit genügender Genauigkeit beurteilt werden. Da die Gleitfläche hangparallel ist, ist nur die Betrachtung einer einzigen Lamelle der Länge Δl aus der Rutschmasse erforderlich. Abbildung 5a 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 Gleitfläche vorgegeben und die Rutschmasse in Lamellen unterteilt. Die Scherkräfte zwischen den Lamellen werden in den Gleichgewichtsgleichungen vernachlässigt. Aus dem Momentengleichgewicht um das Zentrum des Kreises, der die Gleitfläche beschreibt, ergibt sich der Sicherheitsfaktor der Böschung iterativ (Abb. 5b).
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 Rutschmasse gemacht werden. Darüber hinaus ist die Lage der Gleitfläche mit grossen Unsicherheiten behaftet, da sich diese als subjektiver Eingabeparameter erweisen kann.



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

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

Abb. 5: Schematische Darstellung (a) des Ansatzes der hangparallelen Gleitfläche und (b) der Methode nach Bishop | Fig. 5: Représentation schématique de (a) l'approche de la pente infinie avec écoulement parallèle à la pente et de (b) la méthode de calcul selon Bishop.

4.2. Finite-Elemente-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 Stoffgesetzen 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

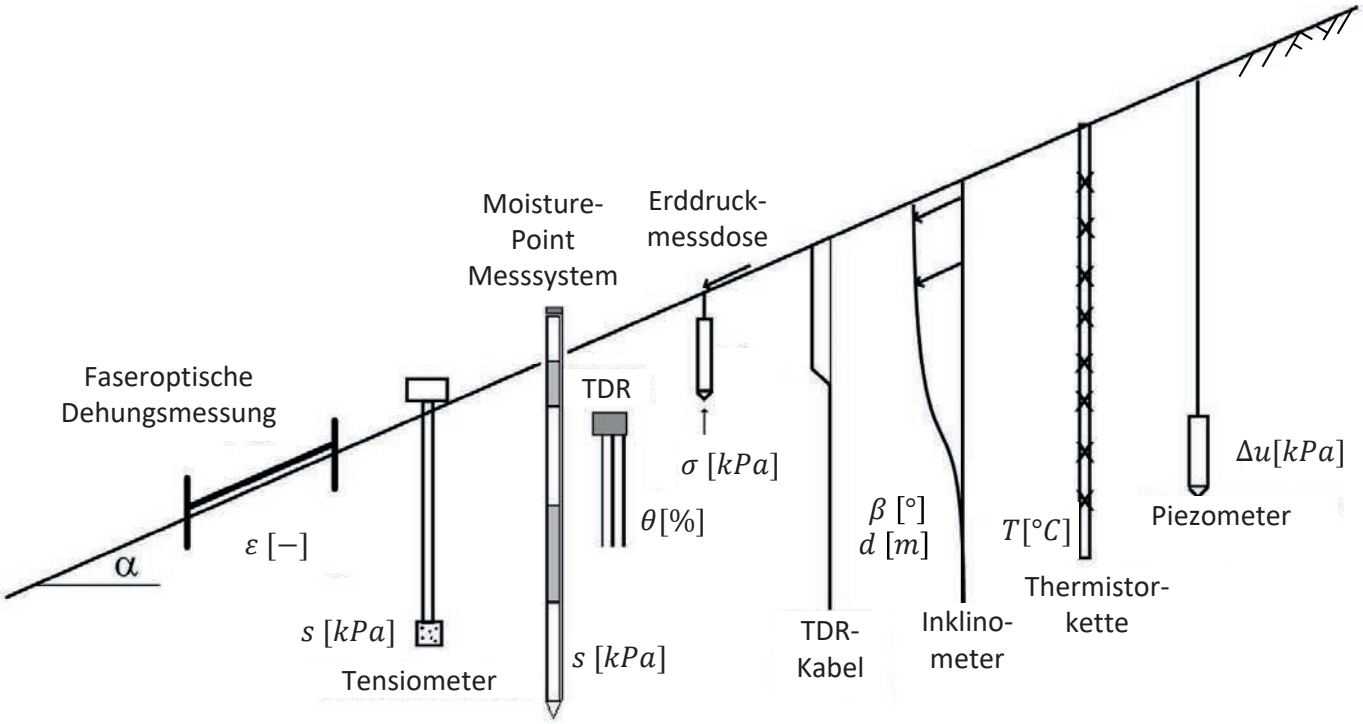


Abb. 6.: Schematische Darstellung von möglichen Systemen zur Beobachtung der Hangstabilität. | Fig. 6: Représentation schématique des systèmes possibles pour l'observation de la stabilité des versants.

Mechanismen realitätsnah modelliert werden. In diesem Zusammenhang sollten die Anwender hohes Fachwissen und Erfahrung mit sich bringen, was ein Hauptnachteil der Methode darstellen kann.

5. 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 geschätzt 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. durch FE-Methoden), kann man die Ergebnisse aus Triaxial- oder Oedometerversuchen verwenden. Diesbezüglich werden im Feld oft Pressiometerversuche 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 Hanges 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 (Teysseire, 2005; Thielen, 2007; Askarinejad, 2012) ist in der Abbildung 6 ersichtlich.
Nebst den traditionellen Vermessungsstationen oder photogrammetrischen Methoden können bei der Aufnahme von oberflächigen Hangverformungen $d_{(m)}$ Fernüberwachungssysteme (Satelliten) oder faseroptische Dehnungsmessungssysteme, Extensometer sowie Dehnmesstreifen eingesetzt werden. Für Tiefenmessungen der Verformungen oder bei der Identifizierung einer aktiven Gleitfläche 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 können Tensiometer oder Moisture-Point-Systeme (MP) benutzt werden, wobei die Änderungen der Porenwasserdrücke Δu mit Piezometer gemessen werden können. TDR-Sonden werden für die Abschätzung des volumetrischen Wassergehalts Φ eingesetzt. Zusätzlich können Thermistorketten und Wetterstationen für die Beobachtung der Bodentemperatur T und der klimatischen Bedingungen (Lufttemperatur und Feuchtigkeit, Niederschlag, Sonnenstrahlung, Wind, usw.) installiert werden.

6. Fazit

Der Beitrag gibt einen kurz gefassten Überblick über Rutschungen und deren bodenmechanische Aspekte und weist auf die Komplexität dieser Massenbewegungen und deren tiefgreifenden Auswirkungen in der Gesellschaft hin. Aus den zahlreichen unterschiedlichen Auslösern 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.

7. Referenzen

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 raumwirk-

samen 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, Wildegg, Veranstaltung 4401, Rapperswil.

Ho, D.G. & Fredlund, D.G. 1982. A multistage triaxial test for unsaturated soils. Geotechnical Testing Journal, 5(1): 18-28.

Jeremić, 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 Nidwalden 2005. Hangmuren bei Oberrickenbach (NW). Kantonaler 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. Ecolological 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.

Kontaktadresse
Dr. Alexandru Marin
ETH Zurich - Institut für Geotechnik
Stefano-Franscini-Platz 5
8093 Zürich
Tel.: 044 633 7370
Email: amarin@ethz.ch

Alexandru Marin

Schutz – Wald – Struktur: Einfluss auf flachgründige Rutschungen

Frank Graf
Alexander Bast
Christian Rickli
Peter Bebi

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. 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.

Keywords
Waldstruktur, Pflanzenfunktionen, flachgründige Rutschungen, multivariate Statistik, 3^D-Diversität

Protection – forêt – structure: influence sur les glissements de terrain peu profonds

Résumé
Les plantes remplissent des fonctions importantes dans la stabilisation des sols et la régulation du bilan hydrique. Elles augmentent ainsi la capacité de stockage de l'eau, cruciale afin de prévenir les glissements de terrain peu profonds. Un filtre sur trois niveaux et une analyse multifactorielle avec des aspects de mécanique des sols, de végétation et de topographie ont pu expliquer plus de 90% d'un ensemble de plus de 200 glissements survenus. En ce qui concerne la prévention des glissements de terrain peu profonds, une bonne structure forestière augmente non seulement la stabilité du sol mais a également une influence positive sur le bilan hydrique du sol. À cet égard, les forêts «optimales» présentent une grande diversité 3^D: diversité des espèces au-dessus et au-dessous du sol, âge, structure horizontale et verticale ainsi qu'un enracinement et une architecture des racines à différents stades de succession et de développement.

Mots-clés
Structure des forêts, fonctions des plantes, glissements de terrain peu profonds, statistiques multivariées, diversité 3^D.

HINWEIS:
Dieser Artikel wurde für die Kursunterlagen zum FAN-Herbstkurs 2019 mit Thema «Umgang mit flachgründigen Rutschungen und Hangmuren» verfasst und steht nun in überarbeiteter Form für das Mitteilungsblatt des Vereins für Ingenieurbiologie zur Verfügung.

Protezione – bosco – struttura: influenza sugli scivolamenti superficiali

Riassunto
Le piante svolgono importanti funzioni di stabilizzazione del suolo e di regolazione del bilancio idrico. Di conseguenza, aumentano anche la capacità di accumulo dell'acqua, che è fondamentale per evitare scivolamenti superficiali. Un filtro a 3 fasi e un'analisi multifattoriale con aspetti di meccanica del suolo, vegetazione e topografia hanno potuto spiegare oltre il 90% di oltre 200 smottamenti. Per quanto riguarda la prevenzione di scivolamenti superficiali, una buona struttura forestale non solo aumenta la stabilità del suolo, ma ha anche un'influenza positiva sul suo bilancio idrico. A questo proposito le foreste «ottimali» mostrano un'elevata diversità in tre dimensioni: diversità di specie sopra e sottoterra, età, struttura orizzontale e verticale, nonché radicamento in diverse fasi di successione e sviluppo.

Parole chiave
Struttura del bosco, funzioni delle piante, scivolamenti superficiali, statistica multifattoriale, diversità tridimensionale

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). Die Verbesserung bestehender sowie die Errichtung neuer Schutzmassnahmen ist daher unbestritten 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 SOSTANAH (www.nfp68.ch/de/projekte/themenschwerpunkt-4-bodeninformation-und-steuerung/bodenstabilitaet) gezeigt werden, dass gut gepflegte und strukturierte Wälder besser vor flachgründigen Rutschungen schützen (Moos et al. 2016, Graf et al. 2017, Bebi et al. 2019). 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. Interzeption, (Evapo-)Transpiration, hydraulische Konduktivität, Wasserspeichervermögen sowie die Bodenarmierung und -aggregierung 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). Pflanzen beeinflussen einerseits als Individuen und andererseits im Verbund als Vegetationsdecke unterschiedliche Prozesse, welche die Hangstabilität erhöhen. 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 (Graf & Frei 2013). 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 zudem den Nährstoffkreislauf an und fördern dadurch Sukzession und Diversität.
Nachfolgend werden die Resultate der Anwendung eines sogenannten 3-Stufen-Filters für die retrospektive Analyse flachgründiger Rutschungen und statistische Auswertungen mittels einer Multi Faktor Analyse (MFA) präsentiert sowie erste Ergebnisse einer Studie zu Waldstruktur und Bodenwasserhaushalt vorgestellt.

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), Vegetation (NaiS, Bestandescode, 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:

Bodenmechanik:
Hangneigung α nicht mehr als 5° steiler als der Reibungswinkel Φ' (Graf et al. 2009)

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 > 3 m) > 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 Rutschungsdatenbank (https://hangmuren.wsl.ch/login.html), in welcher mehr als 700 Ereignisse ausführlich dokumentiert sind. Die Charakterisierung der Vegetation, respektive der betroffenen Waldbestände, basiert auf dem Bestandescode, welcher in Rickli et al. (2008) beschrieben ist. Für die statistischen Auswertungen wurden die Faktorstufen des Bestandescodes angepasst (Tab. 1).
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 und den Bodenwasserhauhalt 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 standortsgemäss, wohingegen in einem «mässigen» Wald einige Bestandeslücken vorhanden sowie Baumarten und Bestandesgefüge nicht standortsgemäss 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. 3).
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 Waldzu-

Schichtung		Entwicklungsstufe	
0xxx	unbestockt	x0xx	unbestockt
1xxx 1	einschichtig	x1xx 1	Jungwuchs / Dickung
2xxx 2	mehrschichtig	x2xx 2	Stangenholz
3xxx 2	gut strukturiert	x3xx 3	Baumholz I (BHD 20-35 cm)
		x4xx 3	Baumholz II (BHD 35-50 cm)
		x5xx 3	Baumholz III BHD >50 cm)
		x6xx 4	gut strukturierter Bestand
Mischung		Deckungsgrad (DG; Kronendeckung)	
xx0x	unbestockt	xxx0	unbestockt
xx1x 1	> 80% Nadelholz	xxx1 1 (2)	gedrängt (DG = 90%)
xx2x 2	Mischbestand	xxx2 2	normal (DG = 80%)
xx3x 3	> 80% Laubholz	xxx3 2	locker (DG = 60%)
		xxx4 3 (2)	lückig (DG = 40%)
		xxx5 3	aufgelöst (DG = 20%)

Tabelle 1: Bestandescode-Parameter mit den verschiedenen Stufen nach Rickli et al. (2008).
Grau: *Unbestockte Flächen, in den (statistischen) Auswertungen nicht berücksichtigt*
Grün: *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)*
Braun: *Stufen für unzureichenden Schutz (Graf et al. 2017)* ➔ *schlecht strukturierter Wald*
Olive: *In Abhängigkeit von Höhenlage und Schichtung als Stufe für «optimalen» Schutz zulässig (siehe Text)*
Weisse Zahlen: *Für die Analysen verwendeter Bestandescode mit reduzierten Faktorstufen*
Tableau 1 : Paramètres des codes du stock avec les différents niveaux selon Rickli et al. (2008).
Gris : *Zones non peuplées, non prises en compte dans les évaluations (statistiques)*
Vert : *Niveaux pour une protection « optimale » contre les glissements peu profonds selon NaiS (Frehner et al. 2005), Rickli (2001), Rickli et al. (2008) et « SOSTANAH » (Graf et al. 2017)*
Brun : *Niveaux de protection insuffisants (Graf et al. 2017)* ➔ *Forêt mal structurée*
Olive : *En fonction de l'altitude et de la stratification, autorisé comme niveau de protection « optimale » (cf. texte)*
Chiffres blancs : *Code du stock utilisé pour les analyses avec des niveaux de facteurs réduits*

standskategorien (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 die Schutzwirkung von Waldbeständen ausübt (Bebi et al. 2019).
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%).

Multi Faktor Analyse (MFA)

Die Multi Faktor Analyse (Husson et al. 2017) der 207 flachgründigen Rutschungen bringt sowohl den Einfluss der Bodenparameter als auch der Waldstruktur unmissverständlich zum Vorschein. Was den Boden betrifft, ist es einerseits von Bedeutung, ob es sich um einen Reibungs- oder durch Saugspannung dominierten Boden handelt. Von den geotechnischen Parametern haben namentlich Wassergehalt, Porenziffer und Feinanteil, mit positiver sowie der Reibungswinkel Φ' mit negativer Korrelation den grössten Einfluss.
In zweiter Priorität ist es die Kohäsion c', die positiv und der Hangneigungswinkel α, der negativ korreliert (Tab. 2).

Im Rahmen der Waldstruktur, respektive des Bestandescodes, sind es mit abnehmender Effektstärke Entwicklungsstufe, Deckungsgrad, Schichtung und Mischung (Tab. 3). Zudem üben auch Region, Höhenlage und Unwetterereignis einen signifikanten Einfluss aus. Insgesamt erklären die ersten vier Hauptkomponenten über 90% der Varianz (Dim1: 46.5%, Dim2: 21.7%, Dim3: 14.5%, Dim4: 9.7%).

	Dim1	Korrelation	p-Wert	Dim2	Korrelation	p-Wert
	[%var] 46.5	[0,1]	[0,1]	[%var] 21.7	[0,1]	[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 fc [%]	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 2: 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. | Tableau 2 : Variables numériques significatives de l'analyse multifactorielle avec variance explicative, corrélation et valeur p pour les deux premières dimensions (Dim1, Dim2). Les valeurs respectives de la variance explicative de chaque variable s'élèvent à 100% et représentent 46,5% pour Dim1 et 21,7% pour Dim2. Les valeurs les plus influentes de la variance explicative [%var] et de la corrélation [0,1] sont mises en évidence en gris.

	Dim1		Dim2		Dim3		Dim4	
	R^2	p-Wert	R^2	p-Wert	cor // R^2	p-Wert	cor // R^2	p-Wert
	[0,1]	[0,1]	[0,1]	[0,1]	[0,1]	[0,1]	[0,1]	[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}	---	---	---	---
Mischung	---	---	---	---	---	---	0.11	8.2 e^{-06}

Tabelle 3: Signifikante kategorielle Variablen der Multi Faktor Analyse mit Korrelation (R^2) und p-Wert für die ersten vier Dimensionen (Dim1-4). 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. | Tableau 3 : Variables catégorielles significative de l'analyse multifactorielle avec corrélation (R^2) et valeur p pour les quatre premières dimensions (Dim1-4). Les valeurs de corrélation élevées [0,1] sont en gris.*
** : En ce qui concerne la défaillance, 3 types de sol ont été distingués, avec un matériau de sol qui est principalement stabilisé par friction (R), potentiel matriciel (S) ou une combinaison (K) des deux.*

Es hat sich allerdings 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 (Tab. 1) und entsprechend deren Grenzwerte überdacht und mit multiplen statistischen Analysen überprüft werden.

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 entsprechenden Anstieg des Porenwasserdrucks im Bodenkörper.
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 volumetrische Bodenwassergehalt (VWC) und die Bodentemperatur gemessen (Abb. 1).
Es hat sich bereits während des ersten Winterhalbjahres eine deutliche Differenz zwischen den beiden unterschiedlich strukturierten Waldpartien gezeigt, mit kühle-

ren Temperaturen und geringerem Wassergehalt in der «gut» strukturierten Fläche (Abb. 1d). 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. Es hat sich 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).

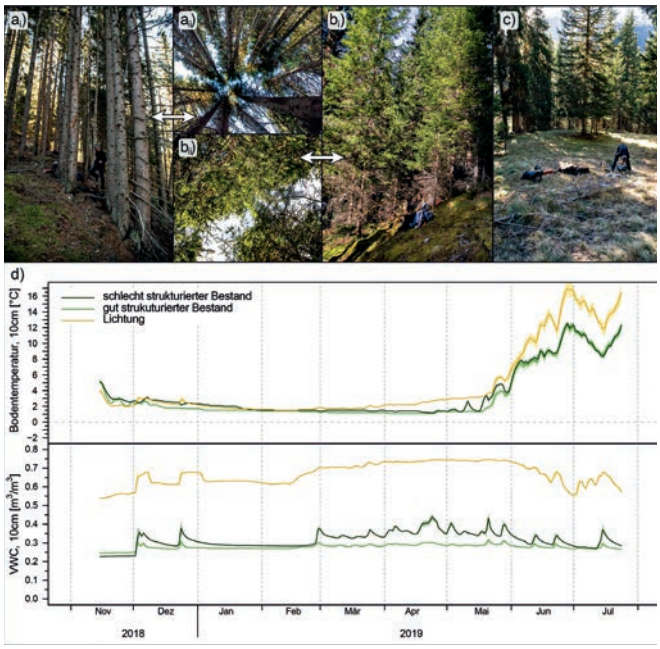


Abb. 1: Verlauf von Bodentemperatur und -feuchtigkeit (volumetrischer Bodenwassergehalt, VWC) in 10 cm Tiefe einer schlecht (ai, aii) und gut strukturierten Waldpartie (bi, bii) sowie einer Lichtung (c) eines subalpinen Fichtenwaldes im Dischmatal in Davos, GR (Fotos: Alexander Bast). | Fig. 1: Evolution de la température et de l'humidité du sol (teneur volumétrique en eau du sol, VWC) à 10 cm de profondeur d'une zone forestière peu (ai, aii) et bien structurée (bi, bii), ainsi que d'une clairière (c) d'une forêt d'épicéas subalpine dans la vallée de Dischma à Davos, GR (photos : Alexander Bast).

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 Porenziffer 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 (Dim1) und dem Bodentyp «Saugspannung» im Gegensatz zu «Reibung» und «Kombination» untermauert (Tab. 2, 3; https://www.wsl.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Mitarbeitende/graf/Graf_Ricklli_Bast_Poster_IMC_2019.pdf).
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 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. 1d). 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. 2).
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. 2). Denn eine vielfältige Myko-Rhizosphäre treibt die Sukzession der Pflanzengesellschaften an und ist ein wichtiger Promotor für die nachhaltige Entwicklung einer schützenden Vegetationsdecke. Deshalb soll auch der unterirdischen Arten- und Strukturvielfalt (Wurzelarchitektur) angemessene Aufmerksamkeit zuteilwerden.

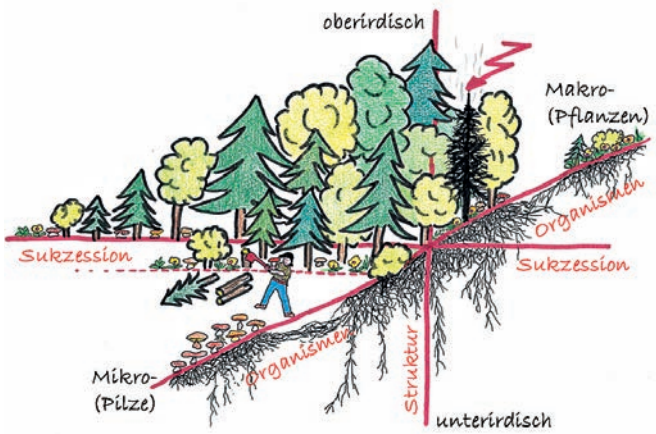


Abb. 2: 3^0-Diversität unter Berücksichtigung von Mikro- und Makro-Organismen (Pflanzen- und Mykorrhizapilz-Arten), ober- und unterirdischer Struktur sowie Sukzession und deren Regulierung durch anthropogene Eingriffe (Pflege und Unterhalt) und natürliche Störungen wie Windwurf, Borkenkäfer, Feuer, Lawinen, ... (Zeichnung von Véronique Graf-Morgen, 2016). | Fig. 2: Diversité 3^0 en considérant les micro et macro-organismes (espèces de plantes et de champignons mycorhiziens), la structure du sol et du sous-sol ainsi que la succession et sa régulation par les interventions anthropiques (soins et entretien) et les perturbations naturelles telles que les chablis, les bostryches, le feu, les avalanches etc. (Dessin de Véronique Graf-Morgen, 2016).

Literatur

Bebi P, Bast A, Ginzler C, Rickli C, Schöngrunder K, Graf F (2019) Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse, Schweiz. Z. Forstwes. 170, 318–325.

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.

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.

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.

Graf F, Bebi P, Braschler U, De Cesare G, Frei M et al. (2017) Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen. WSL Berichte, 56. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 42 p.

Graf F, Frei M (2013) Soil aggregate stability related to soil density, root length, and mycorrhiza using site-specific *Alnus incana* and *Melanogaster variegatus* s.l. Ecol. Eng. 57, 314–323.

Graf F, Frei M, Böll A (2009) Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. FOSNOLA 82, 61-78.

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.

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 Surf. Process. Landforms 41, 951–960.

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. Birmensdorf, 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. Recent Advances in Geotechnical Research. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, 175-185.

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, Graf F, Springman SM (2019) An investigation of plant-induced suction and its implications for slope stability. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 172, 520-529.

Kontaktadressen

Frank Graf
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
Flüelastrasse 11
7260 Davos Dorf
Tel: +41 81 417 02 10
graf@slf.ch

Frank Graf

Alexander Bast
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
Flüelastrasse 11
7260 Davos Dorf
Tel: +41 81 417 02 78
bast@slf.ch

Alexander Bast

Christian Rickli
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf
Tel: +41 44 739 24 03
christian.rickli@wsl.ch

Christian Rickli

Peter Bebi
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
Flüelastrasse 11
7260 Davos Dorf
Tel: +41 81 417 02 73
bebi@slf.ch

Peter Bebi

Samen und Pflanzen für die Hangsicherung
zusammengestellt nach Wurzelprofilen und Erosionsschutzwirkung.
Objektbesichtigung kostenlos
Lieferung ganze Schweiz und EU

schutzfilisur
100 jahre Samen Pflanzen AG

Schutz Filisur, Samen u. Pflanzen AG, CH-7477 Filisur
Tel. 081 410 40 00, Fax. 081 410 40 77
samenpflanzen@schutzfilisur.ch

Die Rolle der Bodenhydrologie auf die Auslösung flachgründiger Rutschungen

Peter Lehmann

HINWEIS:
Dieser Artikel wurde für die Kursunterlagen zum FAN-Herbstkurs 2019 mit Thema «Umgang mit flachgründigen Rutschungen und Hangmuren» verfasst und steht nun in leicht überarbeiteter Form für das Mitteilungsblatt des Vereins für Ingenieurbiologie zur Verfügung.

Zusammenfassung
Die Verteilung des Niederschlagswassers in steilen Hängen bestimmt mit, wo das Bodenmaterial geschwächt wird und Rutschungen ausgelöst werden können. Diese Wasserverteilung hängt stark von den hydrologischen Prozessen und den hydraulischen Eigenschaften des Bodens ab. Die hydraulischen Eigenschaften bestimmen, wieviel Wasser infiltriert, wie stark sich stabilisierende Kapillarkräfte abbauen und ob sich ein freier Wasserspiegel ausbildet, unter dessen Einfluss sich häufig Störungen ausbreiten können. Um den Einfluss der Wasserverteilung auf die Kräfteverhältnisse im Hang und das Risiko einer Rutschung abzuschätzen, müssen aber nicht nur die Materialeigenschaften bekannt sein, sondern insbesondere deren räumliche Verteilung. So reicht es nicht unbedingt aus, wenn es an einzelnen Stellen zur Schwächung oder zu Brüchen kommt, da Kräfte auf umgebende stärkere Gebiete übertragen werden können. Nur wenn sich eine Störung ähnlich einer Kettenreaktion fortpflanzen kann, werden Bodenelemente so stark zerstört, dass eine Rutschung entsteht. Mittels Messungen und Modellen wird in der Forschung versucht, die Wasserverteilung und deren Einfluss auf die Kräfteverhältnisse im Boden abzuschätzen. 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.

Keywords:
Kapillarkräfte, Infiltration, Heterogenität, Hangrutschung, Murgang

Le rôle de l'hydrologie des sols dans le déclenchement des glissements de terrain peu profonds

Résumé
La répartition des eaux pluviale sur les pentes raides détermine également les endroits où les matériaux du sol sont affaiblis et où des glissements de terrain peuvent être déclenchés. Cette répartition de l'eau dépend fortement des processus hydrologiques et des propriétés hydrauliques du sol. Les propriétés hydrauliques déterminent la quantité d'eau qui s'infiltre, la réduction des forces capillaires stabilisatrices et la formation d'un niveau d'eau libre sous l'influence duquel les perturbations peuvent souvent se propager. Afin d'estimer l'influence de la répartition de l'eau sur l'équilibre des forces sur la pente et le risque de glissement de terrain, il faut non seulement connaître les propriétés des matériaux, mais surtout leur répartition spatiale.

Par exemple, il n'est pas nécessairement suffisant qu'un affaiblissement ou des ruptures se produisent en des points individuels, car les forces peuvent être transférées vers des zones environnantes plus fortes. Ce n'est que dans le cas où une perturbation peut se propager comme une réaction en chaîne que les éléments du sol sont détruits au point de provoquer un glissement de terrain. Les chercheurs utilisent des mesures et des modèles afin d'estimer la répartition de l'eau et son influence sur l'équilibre des forces dans le sol. L'influence de l'hydrologie du sol sur le déclenchement des glissements de terrain ne peut être décrite que si l'interaction et la liaison entre les zones plus fortes et plus faibles sont prises en compte.

Mots-clés
Forces capillaires, infiltration, hétérogénéité, glissement de terrain, lave torrentielle

Il ruolo dell'idrologia del suolo sull'inizio di scivolamenti superficiali

Riassunto
La distribuzione delle piogge su pendii ripidi influisce sul punto in cui il materiale del suolo si indebolisce e possono verificarsi frane. Questa distribuzione dell'acqua dipende fortemente dai processi idrologici e dalle proprietà idrauliche del suolo. Le proprietà idrauliche determinano quanta acqua si infiltra, quanto le forze capillari stabilizzanti vengono ridotte e se si forma un pelo dell'acqua libero sotto l'influenza del quale spesso si possono diffondere disturbi. Per stimare l'influenza della distribuzione dell'acqua sull'equilibrio delle forze del pendio e, di conseguenza sul rischio di frana, non solo devono essere note le proprietà dei materiali, ma soprattutto la loro distribuzione spaziale. Ad esempio, non è necessariamente sufficiente se si verificano indebolimenti o fratture in singoli punti, poiché le forze possono essere trasferite nelle aree circostanti più forti. Solo se un disturbo può propagarsi in modo simile a una reazione a catena, la struttura del suolo viene distrutta a tal punto che si verifica una frana. Nella ricerca si utilizzano misure e modelli per stimare la distribuzione dell'acqua e la sua influenza sull'equilibrio delle forze nel terreno. Solo se si tiene conto dell'interazione e dell'interrelazione di aree più forti e più deboli, si può descrivere l'influenza dell'idrologia del suolo sull'innesco di frane.

Parole chiave
Forze capillari, infiltrazione, eterogeneità, frana, colata detritica

1. Einleitung

Die Vorhersage von flachgründigen, durch starken Niederschlag ausgelöste Rutschungen ist äusserst schwierig und bedingt weitreichender Kenntnisse über die Wasserverteilung und deren Einfluss auf die Kräfteverhältnisse im Hang. So ist zwar allgemein bekannt, dass nasse Böden schwerer und schwächer sind und die Bildung eines Wasserspiegels über einer Schichtgrenze 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 führen oder durch stärkere Elemente stabilisiert wird, hängt von den räumlichen Eigenschaften dieses Mosaiks ab. In diesem Artikel werden die wichtigsten bodenhydrologischen Eigenschaften und Prozesse kurz beschrieben und erklärt, welche Rolle sie auf die Auslösung von Rutschungen haben und wie sie in Modellen implementiert werden können.

2. Material und Methoden

2.1 Bodenhydrologische Eigenschaften

Die Festigkeit eines Bodens hängt stark von dessen Textur und dem Wassergehalt (Wasservolumen pro Bodenvolumen) ab. Neben der Kohäsion, der Wurzelverstärkung und der Gewichtskraft wird die Bodenfestigkeit auch durch die Kapillarkraft in den engen Hohlräumen zwischen Bodenkörnern verstärkt. Der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Kapillarkraft (oder Saugspannung) unterscheidet sich für die verschiedenen Bodenarten und beschreibt, wie viel Wasser durch Kapillarkräfte zurückgehalten wird, wenn Gravitationskräfte und die trockene Atmosphäre dem Boden Wasser entziehen. Wie in Abbildung 1a gezeigt, sind die Kapillarkräfte im sandigen Boden schwach und bereits bei geringen Kräften entleeren sich die Hohlräume im Sand. Feinere Böden binden Wasser aufgrund der kleineren Poren viel stärker und der Wassergehalt nimmt weniger rasch ab. Die Kapillarkräfte lassen sich durch einfache Gesetzmässigkeiten (Lu et al., 2010) in Bodenstärke umrechnen (Abbildung 1b). So sind feinkörnige Böden stärker als sandige Materialien und die Stärke nimmt mit abnehmendem Wassergehalt zu. Sandige Böden sind sowohl schwach bei nassen wie auch bei ganz trockenen Bedingungen.

Da sich der Wassergehalt während eines Niederschlagsereignisses erhöht, verändert sich auch die Bodenstärke. Der Wassergehalt eines Bodens, der sich während eines starken Niederschlags einstellt, hängt vom Anfangswassergehalt ab und der Geschwindigkeit, mit der Wasser in den

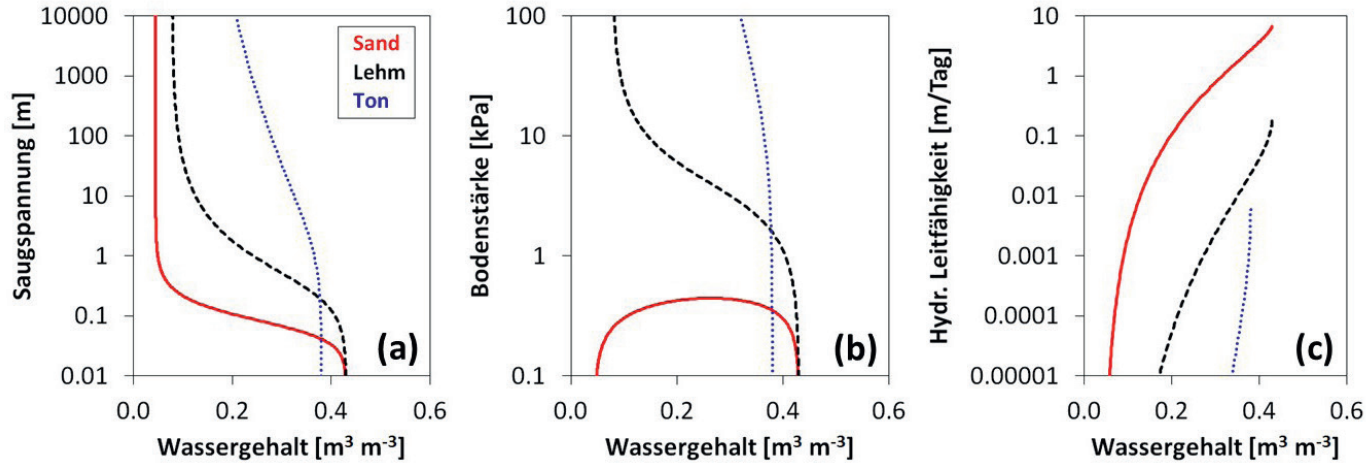


Abb. 1: Einfluss des Wassergehaltes auf Bodeneigenschaften, die für die Rutschungsauslösung von Bedeutung sind. (a) Der Zusammenhang zwischen Kapillarkraft (ausgedrückt als Saugspannung) und Wassergehalt gibt an, wie stark sich der Wassergehalt mit zunehmenden Kräften verändert. (b) Die Kapillarkräfte bestimmen die Bodenstärke, die bei feinkörnigen Böden mit abnehmendem Wassergehalt zunimmt (trockene sandige Böden sind im Gegensatz dazu geschwächt). (c) Die Wasserverteilung im Boden wird durch die hydraulische Leitfähigkeit bestimmt. Die verschiedenen Eigenschaften werden hier für drei Bodentexturen gezeigt (Sand-, Lehm- und Tonboden). Modifiziert nach Lehmann et al. (2019a). | Fig. 1: Influence de la teneur en eau sur les propriétés du sol importantes pour le déclenchement d'un glissement de terrain. (a) La relation entre la force capillaire (exprimée par l'énergie de rétention) et la teneur en eau indique dans quelle mesure la teneur en eau change avec l'augmentation des forces. (b) Les forces capillaires déterminent l'épaisseur du sol, qui augmente dans les sols à grain fin dont la teneur en eau diminue (en revanche, les sols sableux secs sont affaiblis). (c) La distribution de l'eau dans le sol est déterminée par la conductivité hydraulique. Les différentes propriétés sont présentées ici pour trois textures de sol (sableux, limoneux et argileux). Modifié selon Lehmann et al. (2019a).

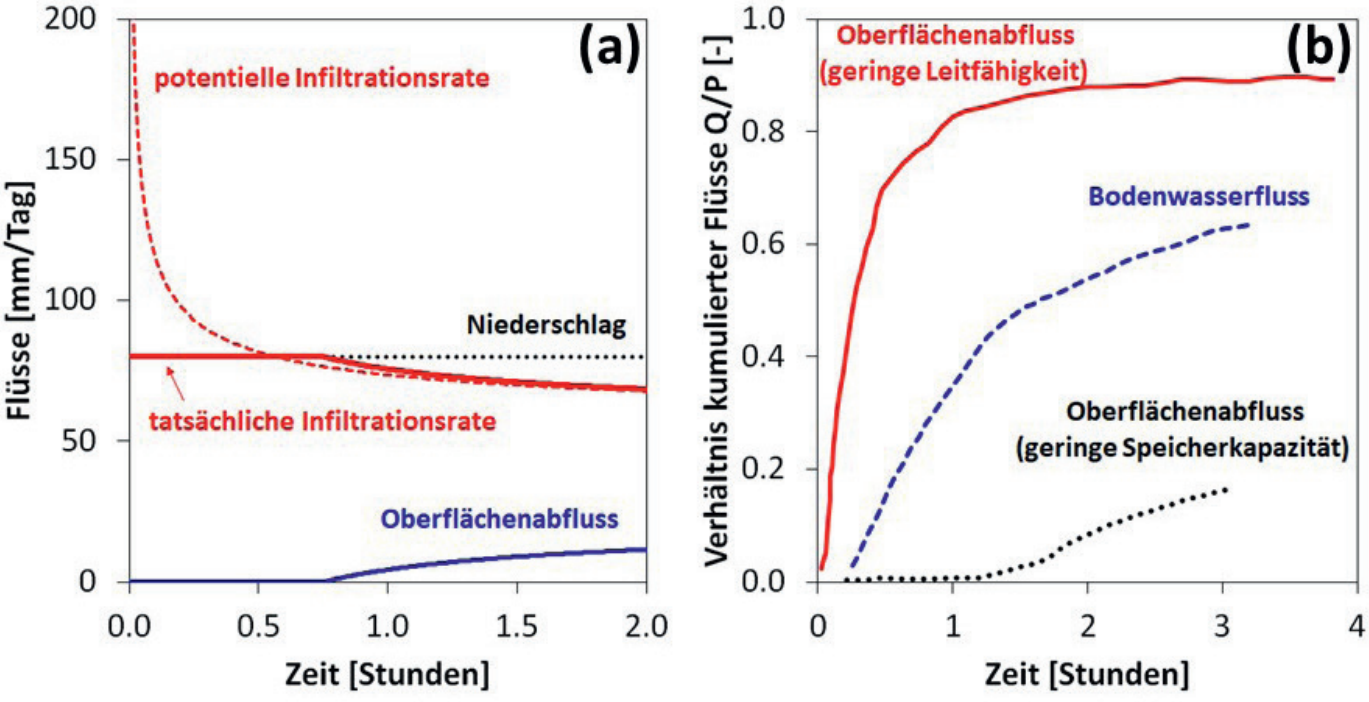


Abb. 2: Bodenhydrologische Prozesse beeinflussen die Wasserverteilung im Boden. (a) Simulierte Wasserinfiltration und Oberflächenabfluss eines schluffigen Lehms bei einer Niederschlagsrate von 80 mm pro Tag (schwarz punktierte Linie). Die gestrichelte rote Linie zeigt die aus der Theorie berechnete maximal mögliche Infiltrationsrate. Ist diese Rate geringer als die Niederschlagsrate, kann nur ein bestimmter Teil tatsächlich infiltrieren (rote Kurve) und ein Teil des Wassers fliesst als Oberflächenabfluss ab (blaue Kurve). (b) Experimente von Scherrer und Naef (2003) zeigen, dass sich Wasser bei starker Beregnung ganz unterschiedlich hangabwärts bewegen kann (Verhältnis des kumulierten Abflusses Q zur kumulierten Niederschlagsmenge P). Ist die Infiltrationskapazität zu gering, fliesst Wasser hauptsächlich entlang der Oberfläche ab (ausgezogene rote Linie). Kann das Wasser infiltrieren, fliesst das Wasser hangabwärts durch den Boden und fliesst zeitlich verzögert aus (blau gestrichelte Linie). Im dritten Fall kann nach einiger Zeit kein Wasser mehr eindringen, weil der Boden gesättigt wird und weiteres Wasser an der Oberfläche abfliesst (schwarz gepunktete Linie). | Fig. 2: Les processus hydrologiques du sol influencent la distribution de l'eau dans le sol. (a) Simulation de l'infiltration d'eau et du ruissellement en surface d'un argile limoneux à un taux de précipitation de 80 mm par jour (ligne pointillée noire). La ligne rouge en pointillé indique le taux d'infiltration maximum possible calculé théoriquement. Si ce taux est inférieur au taux de précipitation, seule une certaine partie peut effectivement s'infiltrer (courbe rouge) et une partie de l'eau s'écoule sous forme de ruissellement de surface (courbe bleue). (b) Les expériences de Scherrer et Naef (2003) montrent que l'eau peut ruisseler de manière très différente lors d'intenses précipitations (rapport entre le ruissellement cumulé Q et les précipitations cumulées P). Si la capacité d'infiltration est trop faible, l'eau s'écoule principalement à la surface (ligne rouge prolongée). Si l'eau peut s'infiltrer, elle s'écoule vers l'aval en pénétrant dans le sol et s'écoule avec un certain retard (ligne bleue en pointillé). Dans le troisième cas, l'eau ne peut plus s'infiltrer après un certain temps car le sol devient saturé et l'eau supplémentaire s'écoule à la surface (ligne noire en pointillé).

Boden infiltrieren und so zur Bildung eines destabilisierenden Wasserspiegels führen kann. Diese Verlagerungsgeschwindigkeit wird durch die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens mitbestimmt (Abbildung 1c). Die Darstellung in der Log-Skala zeigt, wie stark sich die hydraulische Leitfähigkeit mit der Bodenkörnung und dem Wassergehalt ändert. Ungenauigkeiten in der Bestimmung des Wassergehaltes können zu grossen Unsicherheiten der Fliessgeschwindigkeiten und somit der neuen Wasserverteilung führen. Die starke Änderung mit dem Wassergehalt erschwert entsprechend genaue Vorhersagen.

2.2 Bodenhydrologische Prozesse

Die hydraulischen Bodeneigenschaften sind wichtig, um abschätzen zu können, wie viel Wasser in den Boden eindringen kann und dort in die Tiefe versickert und hangabwärts fliesst. Die Infiltrationskapazität eines Bodens lässt sich aus dem Zusammenhang zwischen Wassergehalt, Kapillarkräften und hydraulischer Leitfähigkeit aus der Theorie berechnen. Je stärker die Saugkräfte und je grösser die hydraulische Leitfähigkeit, umso grösser die Infiltrationsrate. Da das Wasser bei anhaltendem Regen durch eine zunehmend dickere Bodenschicht nach unten 'gezogen' werden muss, nimmt die Infiltrationsrate mit der Zeit ab. Wird die Infiltrationskapazität geringer als die Beregnungsrate, kommt es mit einer gewissen Verzögerung zu Oberflächenabfluss, wie es in der Abbildung 2a für einen schluffigen Lehm gezeigt ist.

Infiltriertes Wasser kann nach unten versickern, bis es auf Schichtgrenzen oder felsigen Untergrund trifft und hangabwärts fliesst. In mehreren Feldexperimenten (Faeh et al., 1997; Scherrer und Naef, 2003; Scherrer et al., 2007) wurde der Zusammenhang zwischen Bodenaufbau und dominanten Fliessprozessen untersucht. Neben den Bodeneigenschaften war der Einfluss der Vegetation auf die Wasserverlagerung besonders wichtig: Durch Wurzelwachstum (und andere biologische und auch physikalische bodenbildende Prozesse) werden präferentielle Fliesswege gebildet, die das infiltrierte Wasser sehr schnell umverteilen. In Abbildung 2b sind drei Beispiele aus Scherrer und Naef (2003) gezeigt, die die Auswirkung unterschiedlicher Fliessprozesse auf die Abflussdynamik in den Versuchsflächen veranschaulichen. So kann es sowohl durch geringe Speicherkapazität als auch durch geringe hydraulische Leitfähigkeit zu Oberflächenabfluss kommen. Ist die Infiltrationsrate nicht einschränkend, kann das Wasser je nach Bodenaufbau in den Untergrund verlagert werden oder entlang einer Schichtgrenze hangabwärts fliessen.

3. Resultate

3.1 Einsichten aus Feldexperimenten

Im vorherigen Abschnitt wurde diskutiert, dass sich Wasser im Boden je nach Bodenaufbau unterschiedlich verteilen kann. Um den Zusammenhang zwischen Bodenwasserverteilung und Auslösung der Rutschung experimentell zu untersuchen, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts

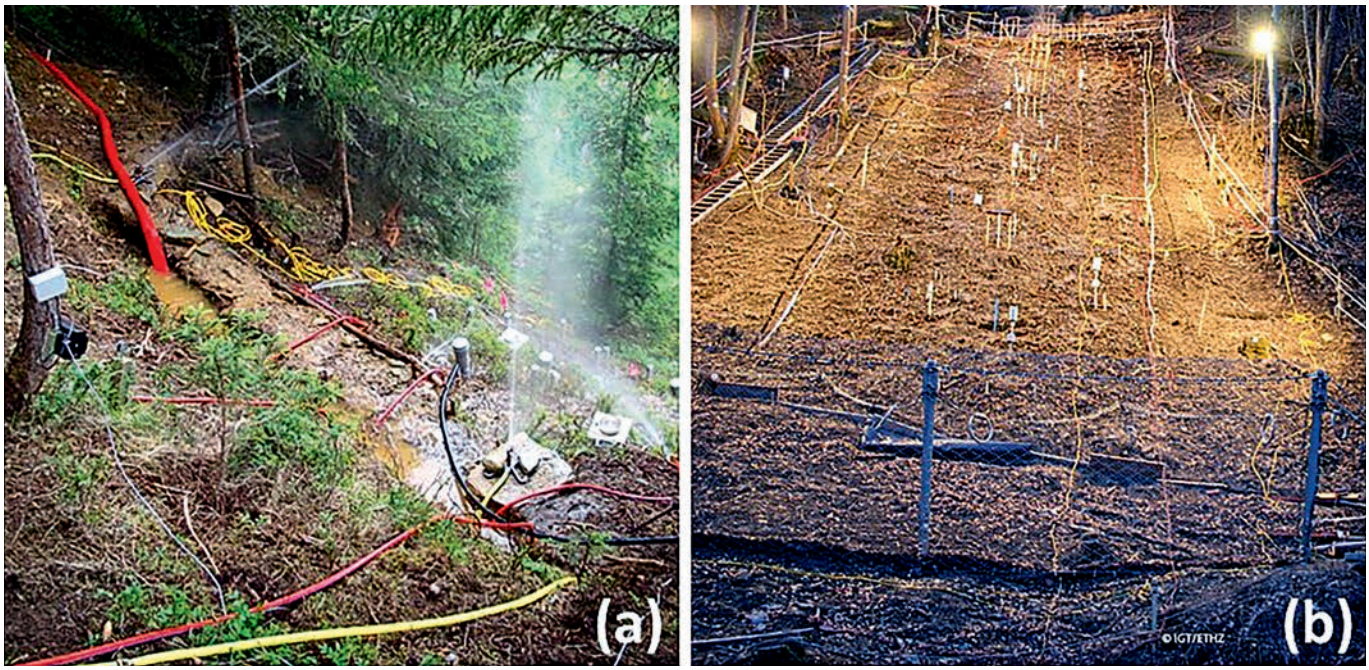


Abb. 3: Feldversuche zur Auslösung von Hangrutschungen in Wiler (a) und Rüdlingen (b). Um eine Rutschung auszulösen, wurden die Hänge intensiv bewässert. Verschiedene Sensoren erfassten die zunehmende Wassersättigung (und Verformung) des Bodens. Der in (b) gezeigte Hang rutschte im März 2009. Aus Lehmann et al. (2019a) | Fig. 3: Essais sur le terrain pour déclencher des glissements de terrain à Wiler (a) et Rüdlingen (b). Pour déclencher un glissement de terrain, les versants ont été intensivement arrosés. Divers capteurs ont enregistré l'augmentation de la saturation en eau (et la déformation) du sol. Le versant indiqué en (b) a glissé en mars 2009. D'après Lehmann et al. (2019a).

TRAMM (https://www.wsl.ch/en/projects/cces-tramm-project.html) versucht, Rutschungen experimentell durch starke Bewässerung auszulösen (Abbildung 3). Diese Experimente fanden in Wiler (Kanton Wallis; Abbildung 3a) und Rüdlingen (Kanton Schaffhausen; Abbildung 3b) statt. In den insgesamt vier Feldexperimenten 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 lokale 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, in Rüdlingen im Frühling 2009, kam es zur Auslösung einer Rutschung (Springman et al., 2012; Askarinejad and Springman, 2018; Askarinejad et al., 2018; Sitarenios et al., 2019). Dieses erstaunliche Resultat kann nur durch die Betrachtung der räumlichen Zusammenhänge im Hang verstanden werden. Mittels geoelektrischer Methoden wurde die Wasserverteilung entlang des Hangs zu verschiedenen Zeiten gemessen (Lehmann et al., 2013). Dazu werden an der Bodenoberfläche Stromstösse injiziert und elektrische Spannungen gemessen, um daraus die räumliche Verteilung des elektrischen Widerstands im Untergrund zu bestimmen (Loke und Barker, 1996). Wird der Wassergehalt erhöht, sinkt der elektrische Widerstand. Aus den Verminderungen des elektrischen Widerstandes, lässt sich die Zunahme des Wassergehaltes abschätzen. Nur im Feldversuch mit ausgelöster Rutschung konnte sich ein kontinuierliches Band mit Wassersättigung ausbilden (Abbildung 4b), 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 (Abbildung 4a). In Rüdlingen wurde dank intensiver Beregnung im empfindlichsten Bereich eine Rutschung ausgelöst, weil ein ca. 20 m langer Bereich aufgesättigt wurde. Die Sättigung eines kontinuierlichen Bereiches liess sich auch durch die Modellierung mit einem bodenphysikalischen Modell (Hydrus, Simunek et al., 1996) reproduzieren (Abbildung 4c).

3.2 Einsichten aus der Modellierung

Die Muster der Wasserverteilung innerhalb eines Hangs oder eines Einzugsgebietes lassen sich mit gängigen Messmethoden nur in Ausnahmefällen festhalten. Als Alternative hierzu besteht die Möglichkeit, realistische Bodenwassermuster mittels Modellierung zu erzeugen. Die Modellierung bietet neben der Simulation 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; https://step.ethz.ch/step-tramm/software.html), das die Wasser- und Kräfteverteilung im ganzen Einzugsgebiet berechnet. Es simuliert

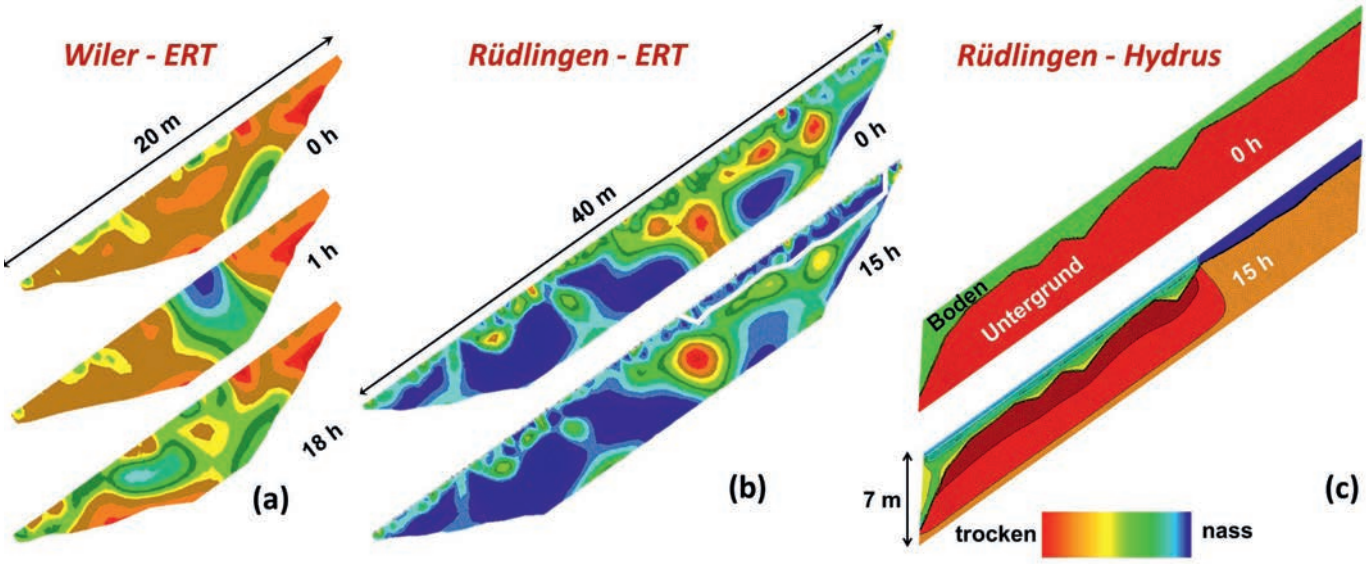


Abb. 4: Räumliche Verteilung des Wassergehaltes ermittelt durch geoelektrische Methoden («ERT») und Simulationen (Modell «Hydrus») zu verschiedenen Zeiten nach Start der Beregnung. In Wiler gelangte viel Wasser in den felsigen Untergrund, ohne den Boden stark zu schwächen (a). In Rüdlingen formierte sich eine kontinuierliche Zone mit hoher Wassersättigung, die schliesslich abrutschte (markiert durch weisse Linie). Die Sättigung dieser Zone wurde in der Modellierung rekonstruiert. Aus Lehmann et al. (2019a). | Fig. 4: Distribution spatiale de la teneur en eau déterminée par des méthodes géoélectriques (« ERT ») et des simulations (modèle « Hydrus ») à différents moments après le début des précipitations. À Wiler, une grande quantité d'eau s'est infiltrée dans le sous-sol rocheux sans affaiblir fortement le sol (a). À Rüdlingen, une zone continue de forte saturation en eau s'est formée, qui a fini par glisser (marquée par une ligne blanche). La saturation de cette zone a été reconstituée dans la modélisation. D'après Lehmann et al. (2019a).

die wichtigsten bodenhydrologischen Prozesse (zeitabhängige Wasserinfiltration und Wasserfluss im Boden) und berücksichtigt auch die verstärkenden Effekte der Baumwurzeln (Schwarz et al., 2010). Das Modell benötigt Informationen bezüglich der Regenmenge, Boden- und Waldverteilung und ein digitales Höhenmodell (Abbildung 5a). Alle diese Informationen sind weltweit frei verfügbar (mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen). Das Modell berechnet zudem die Bodentiefe und bestimmt für jeden Zeitschritt die Wasserverteilung und die sich daraus ergebenden Stärken und Kräfte. Wird eine Bodensäule so stark geschwächt, dass sie instabil wird, werden frei werdende Kräfte umverteilt, bis (i) ein stabiler Zustand erreicht wird oder (ii) weitere Bodensäulen instabil werden, bis schliesslich die Kräfte so gross werden, dass ein Abrutschen der Masse erfolgt. Die Verlagerung der abgerutschten Masse wird mit einfachen empirischen Ansätzen berechnet (Rickenmann, 1999).

Mit STEP-TRAMM lassen sich die bodenhydrologischen und mechanischen Prozesse auf der Skala von Einzugsgebieten (10-100 km^2) gut abbilden und berechnen, wann und wo im Einzugsgebiet Rutschungen auftreten können. Als Beispiel einer Anwendung ist in Abbildung 5b der simulierte Einfluss der Abholzung auf die Auslösung von Rutschungen gezeigt. 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, Anzahl und anderen Merkmalen (Höhenlage, Gefälle etc.) übereinstimmen.

4. Diskussion

Solche Modelle, die die bodenhydrologischen Prozesse miteinbeziehen, können auch für Frühwarnsysteme (Stähli et al., 2015) für flachgründige Rutschungen von grosser Bedeutung sein. Bisher basieren Frühwarnsysteme meist auf Niederschlags-Grenzwerten, die die Stärke und Länge eines Niederschlagsereignisses mit dem Risiko des Auftretens einer Rutschung verknüpfen (eine aktuelle Analyse findet sich in Leonarduzzi et al., 2017). Wie weiter oben gezeigt wurde, ist die Wasser- und Kraftverteilung in einem Gebiet stark von den bodenhydrologischen Eigenschaften geprägt und das gleiche Niederschlagsmuster kann sich in verschiedenen Böden in ganz unterschiedlichen Wasserverteilungen manifestieren. Solche Niederschlags-Grenzwerte können daher in der Regel nicht auf Gebiete mit unterschiedlicher Bodenhydrologie übertragen werden. Kürzlich haben Wicki et al. (2020) aber gezeigt, dass Grenzwerte auch aus der bodenhydrologischen Reaktion auf ein Niederschlagsereignis abgeleitet werden können. So kann aus der zeitlichen Veränderung des Wassergehaltes abgeschätzt werden, wie gross das Risiko einer Rutschung ist. Bisher wurde dies mittels gemessener Wassergehaltsdynamik gezeigt. Sind die hydraulischen Bodeneigenschaften bekannt, kann die für die Rutschung relevante Wassergehaltsdynamik auch simuliert werden.
Hier können Modelle wie STEP-TRAMM Beobachtungen unterstützen, indem für viele Niederschlagsszenarien die Wahrscheinlichkeit von Rutschungen berechnet werden. In Abbildung 6 ist ein Beispiel für ein Gebiet in Vancouver (Kanada) gezeigt, wo Simulationen den empirischen Grenzwert gut reproduzieren können. Dazu wurden sowohl

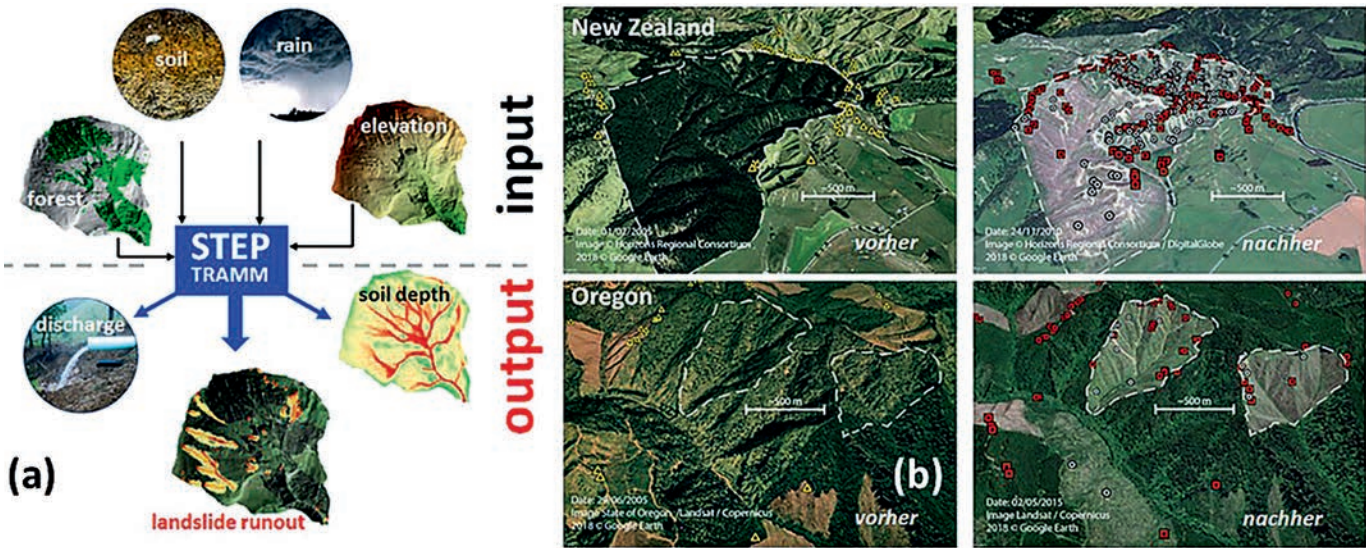


Abb. 5: Anwendung des Modells STEP-TRAMM zur Simulation von Rutschungen und Hangmuren. (a) Darstellung der Information, die die Benutzerin oder der Benutzer eingeben muss und die im Modell berechneten Prozesse. (b) Beispiel einer Anwendung zur Berechnung des Einflusses der Abholzung auf Rutschungen (aus Lehmann et al., 2019b). Simulierte Rutschungen sind mit farbigen Symbolen und gemessene Rutschungen mit weissen Symbolen dargestellt. | Fig. 5: Application du modèle STEP-TRAMM pour simuler les glissements de terrain et les laves torrentielles. (a) Représentation des informations que l'utilisateur/-trice doit entrer et les processus calculés dans le modèle. (b) Exemple d'application pour calculer l'influence de la déforestation sur les glissements de terrain (de Lehmann et al., 2019b). Les simulations de glissements de terrain sont représentées par des symboles colorés et les mesures des glissements par des symboles blancs.

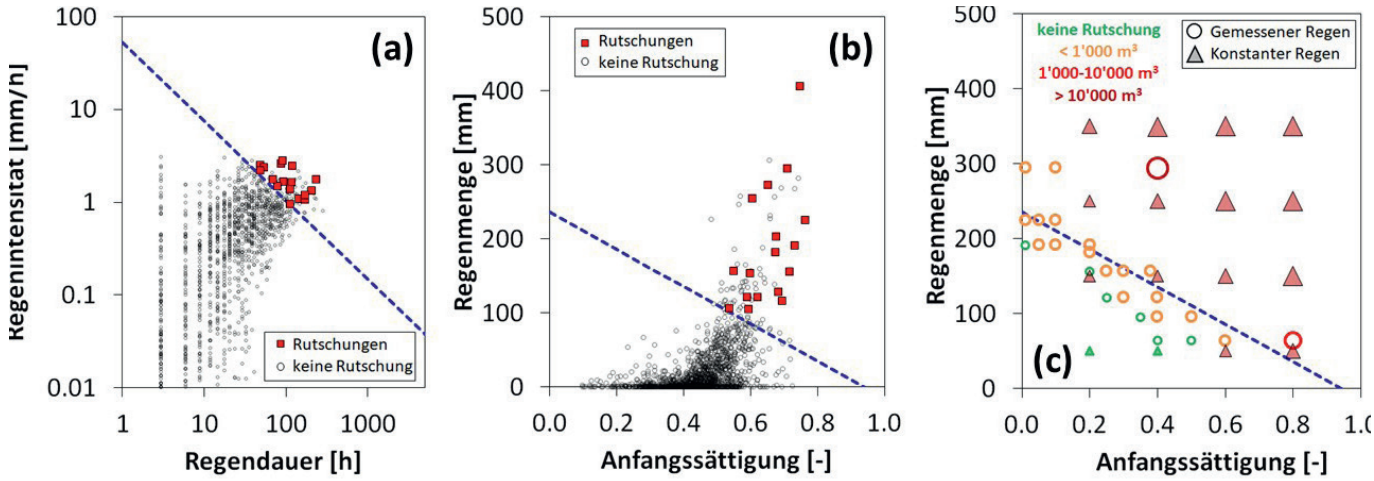


Abb. 6: Anwendung des Modelles STEP-TRAMM zur Bestimmung von Niederschlagsschwellenwerten (hier ein Beispiel für ein Gebiet in Vancouver, Jakob and Weatherly, 2003). Empirischer Niederschlagsschwellenwert als Funktion der gemessenen Regendauer (a) und der berechneten Bodenwassersättigung (b). Niederschlagsereignisse, die zu keiner Rutschung führten, sind mit kleinen Kreisen dargestellt; Ereignisse mit Rutschungen sind mit roten Quadraten gezeigt. (c) Rekonstruktion des Schwellenwertes durch Simulationen mit STEP-TRAMM. Für verschiedene Niederschlagsereignisse wurden die jeweiligen Rutschungsvolumen bestimmt (Simulationen ohne Rutschungen sind mit grünen, kleine Rutschungen mit orangen und grosse Rutschungen mit roten Symbolen dargestellt). Modifiziert nach Lehmann et al. (2019a). | Fig. 6: Application du modèle STEP-TRAMM pour déterminer les seuils de précipitation (ici un exemple pour une région de Vancouver, Jakob et Weatherly, 2003). Valeur de seuil empirique des précipitations en fonction de la durée de la pluie mesurée (a) et de la saturation en eau du sol calculée (b). Les précipitations n'ayant pas entraîné de glissements de terrain sont représentées par des petits cercles ; les événements avec glissements de terrain sont représentés par des carrés rouges. c) Reconstruction de la valeur seuil par des simulations avec STEP-TRAMM. Les volumes respectifs des glissements de terrain ont été déterminés pour différents événements de précipitation (les simulations sans glissements de terrain sont indiquées en vert, les petits glissements en orange et les grands glissements de terrain en rouge). Modifié selon Lehmann et al (2019a).

die bodenhydrologischen Prozesse als auch die Kräfteverteilungen für verschiedene gemessene und künstliche Niederschlagsereignisse berechnet.

5. Folgerungen

Die hydraulischen Eigenschaften von Böden hängen extrem von der Zusammensetzung und dem Zustand (Wassergehalt) des Bodens ab. Diese Sensitivität erschwert das Vorhersagen der bodenhydrologischen Prozesse und deren Einfluss auf die Auslösung von Rutschungen. Um Vorhersagen zu verbessern, braucht es Fortschritte in mehreren Bereichen. Einerseits müssen die Kenntnisse über die lokalen Bodeneigenschaften verbessert werden. Zwar gibt es bereits (globale) Karten von Bodeneigenschaften mit einer Auflösung von 250 m (Hengl et al., 2017; www.opendandmap.org); diese Karten sind aber zu wenig an örtliche Verhältnisse und Beprobungen angepasst. Zudem muss der Einfluss der Bodenstrukturen auf die hydrologischen Prozesse besser beschrieben werden: Aktuelle Karten von Bodeneigenschaften basieren oft nur auf Informationen über die Bodentextur und können so die Fliessvorgänge nur unzureichend quantifizieren. Schliesslich wäre ein dichteres Netzwerk an Messungen der Bodenfeuchte hilfreich, um ein verbessertes Verständnis der hydrologischen Prozesse zu gewinnen und die bodenhydrologischen Prozesse genauer quantifizieren und simulieren zu können.

Literatur

Askarinejad, A., & Springman, S. M. (2018). A novel technique to monitor subsurface movements of landslides. Canadian Geotechnical Journal, 55(5), 620-630.

Askarinejad, A., Akca, D., & Springman, S. M. (2018). Precursors of instability in a natural slope due to rainfall: a full-scale experiment. Landslides, 15(9), 1745-1759.

Faeh, A. O., Scherrer, S., & Naef, F. (1997). A combined field and numerical approach to investigate flow processes in natural macroporous soils under extreme precipitation.

Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., ... & Guevara, M. A. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. PLoS one, 12(2), e0169748.

Jakob, M., & Weatherly, H. (2003). A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia. Geomorphology, 54(3-4), 137-156.

Lehmann, P., Gambazzi, F., Suski, B., Baron, L., Askarinejad, A., Springman, S. M., ... & Or, D. (2013). Evolution of soil wetting patterns preceding a hydrologically induced landslide inferred from electrical resistivity survey and point measurements of volumetric water content and pore water pressure. Water Resources Research, 49(12), 7992-8004.

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

Lehmann, P., Stähli, M. & Or, D. (2019a). Einfluss bodenhydrologischer Prozesse auf die Auslösung flachgründiger Rutschungen und Hangmuren In: Umgang mit spontanen Rutschungen und Hangmuren: Herbstkurs 2019; Kursunterlagen (S. 37-39). Bern: FAN Fachleute Naturgefahren Schweiz

Lehmann, P., von Ruette, J., & Or, D. (2019b). Deforestation effects on rainfall-induced shallow landslides: remote sensing and physically-based modelling. Water Resources Research, 55(11), 9962-9976.

Leonarduzzi, E., Molnar, P., & McArdell, B. W. (2017). Predictive performance of rainfall thresholds for shallow landslides in Switzerland from gridded daily data. Water Resources Research, 53(8), 6612-6625.

Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method 1. Geophysical prospecting, 44(1), 131-152.

Lu, N., Godt, J. W., & Wu, D. T. (2010). A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. Water Resources Research, 46(5), W05515.

Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. Natural hazards, 19(1), 47-77.

Schwarz, M., Lehmann, P., & Or, D. (2010). Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes–from a bundle of roots to tree stands. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 35(3), 354-367.

Scherrer, S., & Naef, F. (2003). A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. Hydrological processes, 17(2), 391-401.

Scherrer, S., Naef, F., Faeh, A. O., & Cordery, I. (2007). Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. Hydrology and Earth System Sciences, 11(2), 907-922.

Simunek, J., Sejna, M., & Van Genuchten, M. T. (1996). The HYDRUS-2D software package for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Version 1.0. US Department of Agriculture Riverside, California.

Sitarenios, P., Casini, F., Askarinejad, A., & Springman, S. (2019). Hydro-mechanical analysis of a surficial landslide triggered by artificial rainfall: the Ruedlingen field experiment. Géotechnique, 1-14.

Springman, S., Askarinejad, A., Casini, F., Friedel, S., Kienzler, P., Teysseire, P., & Thielen, A. (2012). Lesson learnt from field tests in some potentially unstable slopes in Switzerland. Acta geotechnica Slovenica. 1. 5–29.

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.

Wicki, A., Lehmann, P., Hauck, C., Seneviratne, S. I., Waldner, P., & Stähli, M. (2020). Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning. Landslides, 1-16.

Kontaktadresse:

Peter Lehmann
Soil and Terrestrial Environmental Physics
ETH Zürich
Universitätstrasse 16
8092 Zürich
044 632 63 45
E-Mail: peter.lehmann@env.ethz.ch

Peter Lehmann

Aspekte der Beurteilung spontaner Rutschungen und Hangmuren

Roland Wyss
Benjamin Stricker

Zusammenfassung
Die Gefahrenbeurteilung von spontanen Rutschungen und Hangmuren erfolgt heute meist auf Basis der AGN-Methodik von 2004 respektive der Vollzugshilfe «Schutz vor Massenbewegungsgefahren» (BAFU 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, die Durchlässigkeit und die Diskontinuitäten in Fest- und Lockergestein und die Reaktion der Wasserführung auf langanhaltende oder kurzzeitige Starkniederschläge. Felduntersuchungen der AGN zeigen eine klare Korrelation zwischen beobachteten Ereignissen im Feld und hydrogeologischen Förderfaktoren wie wasserführenden Felsschichten im Untergrund, Stauhorizonten im Felsuntergrund oder Hinweisen auf wasserführende Lockergesteine.
Die lokale, direkte Erkundung des geologischen-hydrogeologischen Untergrundes im Feld bleibt ein wichtiges Element bei der Gefahrenbeurteilung spontaner Prozesse. Zum Beispiel erlauben Sondierungen mit Bohrstock kostengünstig eine bessere Kenntnis wichtiger Beurteilungsparameter wie Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht, Vorhandensein von Durchlässigkeitsdiskontinuitäten, Hinweise auf Hangwassereinfluss oder Lage des Felsuntergrundes. Damit ist oft erst eine Abstufung der Gefährdung in den Ausbruchgebieten, z. B. bei der Gefahrenbeurteilung oder für Objektschutzgutachten möglich.
Eine erste Anwendung der Erkenntnisse der Arbeiten der Projektgruppe der AGN erfolgte bei der Dispositionsanalyse bezüglich Hangmuren und Spontanrutschungen entlang einer SBB-Bahnlinie. Mit einer eigens entwickelten praxisnahen Methodik wurden entlang der SBB-Bahnlinie Gümligen BE – Fluhmühle LU geodatenbasiert potenzielle Hangmuren-Anrissgebiete identifiziert und darauf aufbauend mittels 2-D-Modellierung potenziell betroffene Streckenabschnitte identifiziert. Eine vertiefte Bearbeitung mit Erhebungen im Feld und einer Detailbeurteilung sind noch ausstehend.

Keywords:
Naturgefahren, Hangmuren, spontane Rutschungen, Geologie, Hydrogeologie, Plastizität

HINWEIS:
Der erste Teil dieses Artikels wurden für die Kursunterlagen zum FAN-Herbstkurs 2019 mit Thema «Umgang mit flachgründigen Rutschungen und Hangmuren» verfasst. Die vorliegende, ergänzte und überarbeitete Fassung steht nun für das Mitteilungsblatt des Vereins für Ingenieurbiologie zur Verfügung.

Aspects de l'évaluation des glissements de terrain spontanés et des laves torrentielles

Résumé
Aujourd'hui, l'évaluation des risques de glissements de terrain spontanés et des laves torrentielles est généralement basée sur la méthodologie AGN de 2004 et l'aide à l'exécution « Protection contre les dangers liés aux mouvements de masse » (OFEV 2016). Parmi les facteurs influençant les processus de laves torrentielles (disposition de base et facteurs de soutien spécifiques), il faut tenir compte suffisamment des facteurs géologiques et hydrogéologiques. Il s'agit en particulier des lithologies des roches solides et meubles ainsi que leur disposition hydrogéologique telle que l'écoulement de l'eau, la perméabilité et les discontinuités dans les roches solides et meubles, ainsi que la réaction de l'écoulement des eaux à la suite de fortes précipitations de longue ou de courte durée.
Les enquêtes de terrain de l'AGN montrent une corrélation claire entre les événements observés sur le terrain et les facteurs de soutien hydrogéologiques tels que les couches rocheuses aquifères dans le sous-sol, les horizons d'engorgement dans l'assise rocheuse ou les indications de roches meubles aquifères.
L'exploration locale et directe du sous-sol géologique-hydrogéologique sur le terrain reste un élément important dans l'évaluation des risques des processus spontanés. Par exemple, les sondages effectués à l'aide d'une sonde de forage permettent de façon économique de mieux connaître des paramètres d'évaluation importants tels que l'épaisseur de la couche mobilisable, la présence de discontinuités de perméabilité, des indications de l'influence de l'eau de pente ou la position de l'assise rocheuse. C'est souvent à partir de là que l'on peut classer le risque dans les zones de rupture, par exemple pour l'évaluation des risques ou pour les expertises de protection des biens.
Une première application des résultats des travaux du groupe de projet AGN a été l'analyse de la disposition des laves torrentielles et des glissements spontanés le long d'une ligne ferroviaire des CFF. Grâce à une méthodologie pratique spécialement mise au point, les zones menacées par des laves torrentielles potentielles le long de la ligne ferroviaire des CFF Gümligen BE - Fluhmühle LU ont été identifiées sur la base de géodonnées, puis les sections de la ligne susceptibles d'être touchées ont été identifiées à l'aide d'une modélisation en 2D. Une analyse approfondie avec des relevés sur le terrain et une évaluation détaillée sont encore en cours.

Mots-clés
Dangers naturels, laves torrentielles, glissements spontanés, géologie, hydrogéologie, plasticité

Aspetti della valutazione di frane spontanee e colate detritiche

Riassunto
Al giorno d'oggi la valutazione dei rischi di frane e smottamenti spontanei su pendii si basa di norma sulla metodologia AGN del 2004 e sull'aiuto all'esecuzione «Protezione contro i pericoli dovuti ai movimenti di versante» (UFAM 2016). Tra i fattori che influenzano i processi di movimenti di versante (predisposizione e fattori d'influenza specifici), devono essere presi in considerazione i fattori geologici e idrogeologici. In particolare, si tratta delle litologie delle rocce solide e sciolte e della loro disposizione idrogeologica, come per es. la conduttività idraulica, la permeabilità e le discontinuità nella roccia solida e sciolta e la reazione della conduttività idraulica alle precipitazioni di lunga o breve durata.
Le indagini sul terreno dell'AGN mostrano una chiara correlazione tra gli eventi osservati sul campo e i fattori d'influenza idrogeologici, come gli strati di roccia ad alta conduttività idraulica nel sottosuolo, gli orizzonti di sbarramento nella roccia portante o le indicazioni di rocce sciolte particolarmente porose.
Lo studio locale e diretto delle caratteristiche geologiche-idrogeologiche del terreno rimane un elemento importante nella valutazione del rischio dei processi spontanei. Ad esempio, dei sondaggi permettono di conoscere meglio importanti parametri di valutazione come lo spessore dello strato mobilizzabile, la presenza di discontinuità della permeabilità, indicazioni sull'afflusso di acque di pendio o la posizione della roccia madre. Per questo spesso è possibile valutare il rischio solo nelle aree di distacco, per es. durante la valutazione del pericolo o per una perizia per la protezione di un oggetto.
Una prima applicazione dei risultati dei lavori del gruppo di progetto dell'AGN è stata l'analisi di colate detritiche e scivolamenti spontanei lungo una linea ferroviaria delle FFS. Utilizzando una metodologia pratica appositamente sviluppata, sono state identificate, sulla base di geodati, le potenziali aree di distacco di frane lungo la linea ferroviaria FFS Gümligen BE – Fluhmühle LU. Sulla base di ciò, sono state identificate le sezioni potenzialmente interessate della linea utilizzando la modellizzazione 2D. È ancora in corso un'analisi approfondita con indagini sul campo e una valutazione dettagliata.

Parole chiave
Pericoli naturali, colate detritiche, scivolamenti spontanei, geologia, idrogeologia, plasticità

1. Einleitung

Die nachfolgenden Ausführungen basieren im Wesentlichen auf Arbeiten, die im Rahmen eines Projekts der Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren (AGN) durchgeführt wurden (s. AGN 2016, Wyss et al. 2018), auf einer Dispositions- und Risikoanalyse für den Prozess Hangmuren entlang einer SBB-Linie sowie auf umfassenden Erfahrungen im Zusammenhang mit geologischen und hydrogeologischen Feldarbeiten.

1.1 Ausgangslage

Hangmuren und spontane Rutschungen werden heute oft auf 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.
Die konsequente Anwendung der AGN-Methode hat aber auch Mängel und behandelt gewisse Aspekte nicht. So entstehen oft zu grosse Gefahrenflächen (vor allem blaue Gefahrenstufe), obwohl die Ereignisse zeigen, dass innerhalb der Flächen grosse Unterschiede bezüglich Disposition auftreten. Auch können mit der Methode nur Aussagen zum Ort von möglichen Ausbrüchen gemacht werden, nicht aber zu den Intensitäten. Weiter können die Prozessräume mit der AGN-Methode nicht abgegrenzt werden (Wyss et al. 2019). Regionalgeologische und hydrogeologische Kenntnisse und eine gute Feldansprache sind für die Beurteilung der Grunddisposition und der Förderfaktoren von Hangmuren und spontanen Rutschungen von zentraler Bedeutung.

1.2 Definitionen

Bei Hangmuren und spontanen Rutschungen handelt es sich um zwei Endglieder von Prozessen, welche aber graduell ineinander übergehen können. Sie werden beide meist bei starken oder langanhaltenden Niederschlägen ausgelöst. Die geologisch-geotechnischen Eigenschaften der Lockergesteinsschichten und hohe Porenwasserdrücke in den Lockergesteinen haben dabei entscheidenden Einfluss auf Prozessauslösung und -ablauf. 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

Abb. 1: Hangmure mit grosser Reichweite und «Levées» in Schwellbrunn AR (2011, links), Schadenereignisse in Vals GR (2014, rechts). | Fig. 1: Laves torrentielles à grande portée et « Levées » à Schwellbrunn AR (2011, à gauche), événements dommageables à Vals GR (2014, à droite).

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:

- Analyse bestehender Daten und historischer Ereignisse.
- Geländebeobachtungen mit Kartierung der prozessspezifischen Spuren im Gelände, welche in der **Karte der Phänomene** dargestellt werden.
- **Interpretation der Daten und Beobachtungen** zur Gefahrenbeurteilung. Diese erfolgt entweder gutachterlich mit empirischen Schätzmethoden und/oder Berechnungen mit prozessspezifischen Modellen.

Aufgrund dieser drei Hilfsmittel müssen Aussagen zu Prozesshäufigkeiten und Prozessintensitäten gemacht werden. Die Einstufung in die Gefahrenstufen (rot, blau, gelb, gelbweiss) 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. Anderseits bestehen heute auch physikalische Modelle, welche die Ausbreitung und das Fliessverhalten von Hangmuren berechnen können. Aber auch hier bestehen wesentliche Unschärfen, u. a. aufgrund lückenhafter Datengrundlage und erforderlicher Annahmen für die Eingabeparameter.

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 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 wie biologische und anthropogene Einflüsse verändert werden.
Als eigentlicher **Auslöser** wirken letztlich meist 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.

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 (s. auch Bollinger et al. 2009, Gruner & Wyss 2009).
In der Karte der Phänomene werden nur Spuren von Prozessen dokumentiert. Für wirklich aussagekräftige Beurteilungen müssen geologisch relevante Informationen zwingend berücksichtigt werden.
Der geologische Untergrund beeinflusst entscheidend die Entstehung von spontanen Rutschungen und Hangmuren auf verschiedene Arten. Hänge mit tonigem oder mergeligem Untergrund (z. B. Palfris Mergel, Gisigermergel, Opalinuston etc.) sind stark rutschanfällig. Hänge mit unterschiedlich durchlässigem Aufbau sind deutlich rutschanfälliger als

homogen aufgebaute Hänge. Dabei ist in tonigen Zwischenlagen oder in tonreichen Lockergesteinsablagerungen die Art bzw. die Beschaffenheit der auftretenden Tonmineralien von Bedeutung. Tone, im geotechnischen Sinn, bestehen in unterschiedlichen geologischen Regionen aus unterschiedlichen Tonmineralien und weisen damit andere Plastizitätseigenschaften auf. Je nach geologisch-tektonischem Gebiet mit unterschiedlichen Tonmineralien (Metamorphosegrad) muss das Auftreten von «tonigen» Fest- oder Lockergesteinen anders beurteilt werden.
Die Ereignisse von 2005 (langanhaltende Niederschläge in weiten Teilen der Schweiz) zeigten zudem den starken Einfluss der Hydrogeologie des Felsuntergrundes auf die Entstehung von Hangmuren. In Gebieten mit verkarsteten Kalken kam es zu einem raschen Anstieg des Bergwasserspiegels und so zur Infiltration von Bergwasser in die Lockergesteinsbedeckung. Stark schwankende Bergwasserspiegel können aber auch in anderen geologischen Konstellationen beobachtet werden.

3. Untersuchungen der AGN

In einem Projekt der AGN im Auftrag des BAFU wurden in neun geologisch unterschiedlichen Testgebieten mit Hangmurenereignissen (OMM, Gurnigel-Flysch, Lias, Helvetikum, Drusberg-Decke, Stad-Mergel, Jura, USM, Nordpenninischer Flysch) systematische Erhebungen zur Geologie, Hydrogeologie und zu Lockergesteinseigenschaften (Silt-/Tongehalt, Plastizität) durchgeführt (AGN 2016, Wyss et al. 2018).
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.

3.1 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 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 Bohrstock Proben für die Bestimmung des Silt-/Tongehaltes und der Plastizität im Feldlabor (Methode GEOLEP) gewonnen werden.

3.2 Zusammenfassung der Resultate der Feldaufnahmen

Bezüglich Hangneigungen und Plastizitäten weisen die untersuchten Gebiete heterogene Charakteristika auf.
Allen untersuchten Gebieten gemeinsam sind hydrogeologische Förderfaktoren wie:

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

In allen Gebieten gab es erwartungsgemäss eine Korrelation zwischen dem Plastizitätsindex und dem Silt-/Tongehalt der gemessenen Proben. In Anrissbereichen dominieren relativ hohe Plastizitätswerte und entsprechend hohe Silt-/Tongehalte. Die Hangneigung und die spezifischen Förderfaktoren spielen eine entscheidende Rolle. Das Gesamtsystem ist jedoch nicht nur durch diese zwei Parameter bestimmbar. Generell kann festgehalten werden, dass Lockergesteinsdecken mit vergleichsweise höheren 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, was aber auf einer grösseren Datenbasis noch zu beweisen ist.

3.3 Erkenntnisse der AGN-Studie

Die 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 die AGN-Studie 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. Die Beurteilungsgenauigkeit der Ausbruchgebiete kann durch vertiefte Untersuchungen wie z. B. einfache Handsondierungen mit Korngrössenanalysen, evtl. ergänzt

mit Plastizitätsmessungen, verbessert werden. Nur schon Bohrstocksondierungen führen zu einer Verbesserung der Beurteilungsdatenlage bezüglich Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht, der Durchlässigkeitsunterschiede, Hinweisen auf Hangwassereinfluss und der Lage der Felsoberfläche.
Die Korngrössenverteilung der Deckschichten erlaubt eine Abschätzung der Durchlässigkeitskontraste in Bezug auf den unterliegenden Fels.
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.
Mit den Untersuchungen der AGN ist keine signifikante Verbesserung der Beurteilung der Hangmuren-Häufigkeit erreicht worden, da die Beurteilung der Ausbruchhäufigkeit primär von der Eintretenswahrscheinlichkeit von Starkniederschlägen, der Hangneigung und dem Einfluss von Förderfaktoren abhängt.

4. Anwendung der Erkenntnisse der AGN

Aufbauend auf der Publikation der AGN (Wyss et al. 2018) hat die Dr. Roland Wyss GmbH im Auftrag der SBB eine praxisnahe Methodik 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 damit auch gefährdete Streckenabschnitte ermittelt werden.

4.1 Ausgangslage und Vorgehen

Abb. 2: Spontanrutschung aus einer künstlichen Eisenbahnböschung (Bühler AR, 2013). | Fig. 2: Glissement de terrain spontané d'un remblai de chemin de fer artificiel (Bühler AR, 2013).

Die Dispositionsanalyse wurde auf der SBB-Linie Gümligen BE – Fluhmühle LU (Streckenlänge 83 km) durchgeführt, welche in der Vergangenheit durch zahlreiche Hangmurereignisse betroffen war. Um präventiv die relevantesten Stellen zu sichern und zielgerichtet die finanziellen Mittel einzusetzen benötigen die SBB deshalb ein praxistaugliches und robustes Werkzeug.
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 folgenden, bestehenden Daten verwendet: Topographie (SwissAlti3D, Swisstopo), Geologie (Geocover, Geol. Atlas; Swisstopo), Daten zur Bodenbedeckung (AV-Daten der Kantone, IVEG-SBB), Oberflächenabfluss (Hinweiskarte, BAFU) sowie Erdbauwerke und Schutzbauten (SBB). Zur Kalibrierung der Modellparameter und Validierung der Ergebnisse wurden zudem Ereigniskataster (Kantone, SBB) und bereits bestehende Gefahrenbeurteilungen verwendet.
Für die Dispositionsanalyse wurden im Untersuchungsgebiet (ca. 12 km^2) 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 ge-

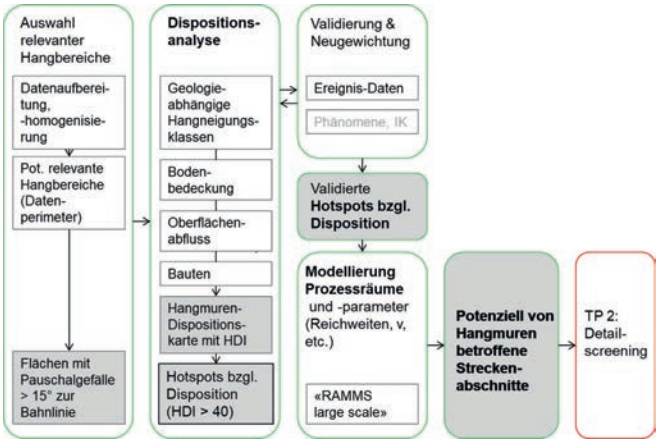


Abb. 3: Konzept Grobscreening (grün: Teilprojekt 1; rot: Teilprojekt 2, pendent). (Abkürzung HDI: Hangmuren-Dispositionsindex) | Fig. 3: Concept de filtrage approximatif (vert : sous-projet 1 ; rouge : sous-projet 2, en attente). (Abréviation HDI: Hangmuren-Dispositionsindex, indice de disposition aux laves torrentielles).

wichtet. Der Einfluss von Oberflächenabfluss wurde aufgrund der Fliesstiefe gewichtet. Die Klassierung von Erdbauwerken und Schutzbauten erfolgte grob in Abhängigkeit von Typ und Baujahr. Die Gewichtung der einzelnen verwendeten Inputfaktoren erfolgte gutachterlich. Aus den Einzelfaktoren wurde ein auf 100 normierter Hangmuren-Dispositionsindex (HDI) abgeleitet. 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» durch das SLF verwendet. Die Inputparameter für die RAMMS-Modellierungen wurden aufgrund vorliegender regionaler Ereignisanalysen und Studien und eigener Sensitivitätstests festgelegt.
Der zweite Arbeitsschritt mit einem Detailscreening ist noch pendent. Bei diesem wären insbesondere gutachterliche Detailabklärungen vor Ort durchzuführen, um das Modell der Phase 1 zu kalibrieren und eine Detailbeurteilung vornehmen zu können.

4.2 Ergebnisse Grobscreening

In den für die Bahnlinie relevanten Hangbereichen wurden aufgrund des Grobscreenings über 400 Hotspots oberhalb der Bahnlinie eruiert. Die Flächen der Anrissgebiete weisen im Mittel eine Grösse von ca. 250 m^2 auf (Bandbreite 16 bis 6'700 m^2). Talseitig der Bahnlinie wurden 270 weitere Hotspots identifiziert. Diese gelten als Hinweisbereiche für potenzielle talseitige Hanginstabilitäten. Aufgrund der Prozessmodellierungen mittels RAMMS ergaben sich total 70 potenziell betroffene Streckenabschnitte mit einer durchschnittlichen Länge von 170 m.
Der gewählte Ansatz erwies sich als grundsätzlich geeignet für grossflächige Screenings bezüglich der Grunddisposition für potenzielle Ereignisse mit einer Wiederkehrperiode in der Grössenordnung von rund 100 Jahren. Vor einer weiteren Anwendung sind jedoch bestehende Unsicherheiten, beispielsweise bezüglich Gewichtung der Inputfaktoren, getroffener Annahmen oder Qualität der verwendeten Daten, zu reduzieren. Für eine Gefahrenkartierung oder eine Einzelfallbeurteilung sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Weiter sollte die angewandte Methodik in Gebieten mit anderer Geologie getestet bzw. validiert werden.

5. Fazit

Verschiedene Faktoren begünstigen die Entstehung von Hangmuren. Der Einfluss dieser Förderfaktoren ist fallweise zu prüfen. Grosses Gewicht haben Hinweise auf aktive oder frühere Massenbewegungen, die Beschaffenheit des Felsuntergrundes, dessen Hydrogeologie, die Art der Lockergesteinsbedeckung, deren Plastizität und die Korngrössenverteilung, die Landnutzung, die potentiellen Wassereinflüsse in

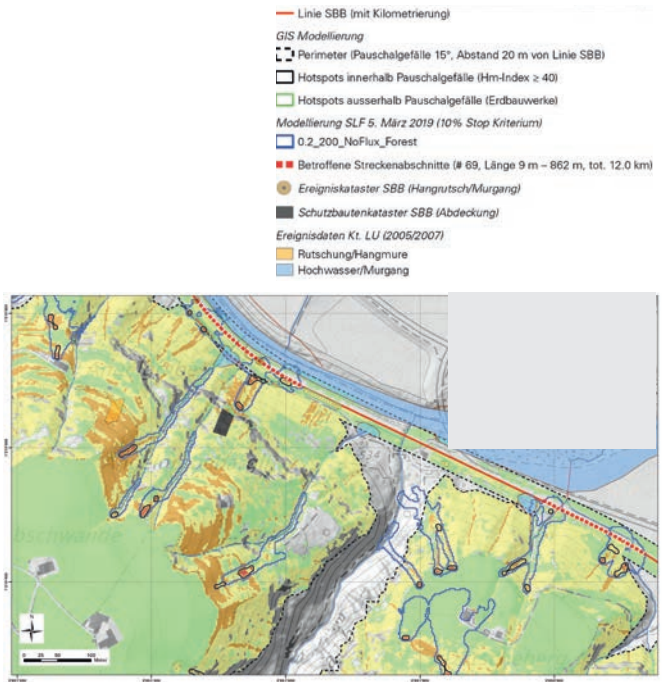


Abb. 4: Hotspots bezüglich Disposition für Hangmuren und modellierte Prozessräume (Streckenabschnitt «Langnauerwald» zwischen Malters und Wolhusen). Rot: HDI > 40; Schwarz umrandet: Potenzielle Anrissgebiete, generalisiert; Blau: Mit RAMMS modellierte Prozessräume; Rot strichliert: Potenziell betroffene Streckenabschnitte, generalisiert. | Fig. 4: Hotspots en ce qui concerne la disposition des laves torrentielles et des zones de processus modélisées (section « Langnauerwald » entre Malters et Wolhusen). Rouge: HDI > 40; bordure noire: zones de rupture potentielles, généralisées; bleu: zones de processus modélisées avec RAMMS; rouge en pointillé: sections potentiellement affectées, généralisées.

Gebirge und im Hangbereich (Sättigung des Lockergesteins, Druck, Strömungskraft) sowie anthropogene Faktoren.
Die Untersuchungen der AGN fokussieren auf den Anrissbereich der Hangmuren. Die Berücksichtigung der geologischen und hydrogeologischen Disposition erlaubt eine bessere Charakterisierung im Anrissbereich. Mit den durchgeführten Feldmessungen ist eine qualitative Beurteilung des Einflusses der Plastizität auf das Verhalten der Hangmuren möglich.
Aufbauend auf den Ansatz der AGN (2016) wurde für die SBB AG eine praxisorientierte Methode für eine Dispositionsanalyse in einem grösseren Gebiet entwickelt. Geodatenbasiert wurden potenzielle Hangmuren-Anrissgebiete mit einem objektiven Verfahren ermittelt. Mit diesen Anrissgebieten konnten mögliche Prozessräume modelliert und damit potenziell gefährdete Streckenabschnitte identifiziert werden. Das Ergebnis ist eine grundsätzlich geeignete Entscheidungsgrundlage für die Festlegung weitergehender Untersuchungen.

Verwendete Unterlagen

AGN (2004): Gefahreneinstufung 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.

Bollinger, D., Gruner, U. & Wyss, R. (2009): Hochwasser August 2005 – Analyse der Hanginstabilitäten. Swiss Bull. angew. Geol. 14/1+2, p. 135–151.

Gruner, U. & Wyss, R. (2009): Anleitung zur Analyse von Rutschungen. Swiss Bull. angew. Geol. 14/1+2, p. 153–157.

Wyss, R., Gruner, U. & Liniger, M. (2018): Verbesserung der Hangmurenbeurteilung. Swiss Bull. angew. Geol. 23/1, p. 57–71.

Wyss, R., Stricker, B., Gruner, U. & Liniger, M. (2019): Untersuchungen zur Verbesserung der Hangmurenbeurteilung. FAN Herbstkurs 2019, p. 31–40.

Dank

Wir möchten uns bei folgenden Personen und Institutionen herzlich bedanken: Bei Dr. B. Loup (BAFU) für die Möglichkeit der vertieften Bearbeitung des Themas Hangmuren und spontane Rutschungen, Florian Hofstetter (SBB AG) für die beauftragte Studie und bei den Kollegen der AGN, Dres. Markus Liniger und Ueli Gruner, für ihre wesentlichen Beiträge im Verlaufe der durchgeführten Arbeiten.

Kontaktadresse

Dr. Roland Wyss GmbH
Zürcherstrasse 105
8500 Frauenfeld
Tel. +41 52 721 79 00
E-Mail: wyss@rwgeo.ch

Roland Wyss

Benjamin Stricker
E-Mail: stricker@rwgeo.ch

Benjamin Stricker

hydrosaat

Unser Beratungs- und Ausführungsteam begleitet Ihre Projekte mit 55 Jahren Know-how.

Ansaat
Wir begrünen alle Flächen und Böschungen in jedem Gelände und an jedem Standort.

EcoTex®-Geotextilien als Erosionsschutz
Wir liefern und verlegen Geotextilien aus Kokosfasern oder Jute; natürlich und biologisch abbaubar.

Sedummatten
Sie suchen vorkultivierte, sofort verlegbare Sedummatten für die extensive Begrünung von Böschungen, Verkehrsinseln, Garten- und Rasenabschlüssen oder Garagen und Carports? Wir liefern sie.

Ingenieurbiologie
Wir sind Ihr Ansprechpartner für verschiedene Stützkonstruktionen für Uferzonen und Böschungen.

Mehr Informationen und interessante Referenzobjekte finden Sie auf unserer Internetseite www.hydrosaat.ch.

Senden Sie uns eine Mail an hydrosaat@hydrosaat.ch oder rufen Sie uns an unter 026 322 45 25. Wir freuen uns auf Ihre Kontaktaufnahme!

Niederschlags-schwellenwerte für flachgründige Rutschungen in der Schweiz: Vorteile und Limitationen

Elena Leonarduzzi
Peter Molnar

HINWEIS:
Dieser Artikel wurde für die Kursunterlagen zum FAN-Herbstkurs 2019 mit Thema «Umgang mit flachgründigen Rutschungen und Hangmuren» verfasst und steht nun in leicht überarbeiteter Form für das Mitteilungsblatt des Vereins für Ingenieurbiologie zur Verfügung.

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 Alarme und nicht nur positive Vorhersagen berücksichtigt.
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 Datenreihen 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 für Erdrutsche nicht berücksichtigt. Weiter sind viele Fehlalarme zu verzeichnen.

Keywords:
Flachgründige Rutschungen, Warnsysteme, Niederschlagsschwellenwerte

Valeurs de seuil des précipitations pour les glissements de terrain peu profonds en Suisse: avantages et limites

Résumé
Les glissements de terrain sont un risque naturel répandu dans les régions alpines et se produisent partout dans le monde. Ils entraînent des dommages importants à l'environnement bâti et aux infrastructures (rail, route) et même des pertes de vies humaines. Des valeurs de seuil de précipitations simples sont souvent utilisées à des fins de prévision. Nous montrons ici comment les valeurs de seuil des précipitations journalières et par heure peuvent être définis objectivement. L'approche est basée sur

un ensemble unique de données sur les glissements de terrain et les précipitations disponibles pour la Suisse, qui prend en compte à la fois les conditions dans lesquelles les glissements de terrain se sont produits et les conditions sans glissements de terrain. Ainsi, les fausses alertes et pas seulement les prévisions positives sont explicitement prises en compte.
Les meilleures prévisions ont été faites avec une fonction de puissance intensité-durée, suivie par l'intensité moyenne et maximale des précipitations et enfin les précipitations totales. La durée des précipitations n'a en soi qu'un pouvoir prédictif limité. Les valeurs de seuil définies avec les données de précipitations horaires ont mieux permis de prévoir les événements que les seuils définis avec les données quotidiennes. Cependant, en raison de séries de données plus courtes, celles-ci sont moins robustes et plus difficiles à utiliser dans un environnement opérationnel. Les valeurs de seuil des précipitations ont certaines limites. Il s'agit notamment de la résolution des données de pluie et du fait que celles-ci dépendent du lieu. En outre, les conditions préalables et autres facteurs de prédisposition ne sont pas pris en compte. De plus, il y a beaucoup de fausses alertes.

Mots-clés
Glissements de terrain peu profonds, systèmes d'alerte, valeurs de seuil des précipitations

Soglie delle precipitazioni per scivolamenti superficiali in Svizzera: vantaggi e limitazioni

Riassunto
Le frane sono un pericolo naturale diffuso nelle regioni alpine di tutto il mondo, provocano danni significativi alle costruzioni e alle infrastrutture (ferrovie, strade), e possono persino portare alla perdita di vite umane. Dei semplici valori soglia per le precipitazioni sono spesso utilizzati per la loro previsione. Nell'articolo si mostra come i valori soglia per le precipitazioni giornaliere e orarie possano essere oggettivamente definiti.
L'approccio si basa su una banca dati di informazioni sulle frane e sulle precipitazioni disponibili per la Svizzera e tiene conto sia delle condizioni in cui si sono verificate le frane che di quelle senza frane. Pertanto, non solo le previsioni positive, ma anche i falsi allarmi sono esplicitamente considerati. Le migliori previsioni sono ottenute con una soglia di intensità-durata, seguita dall'intensità media e massima delle precipitazioni e infine dalle precipitazioni totali. La durata delle precipitazioni considerata individualmente ha un limitato potere predittivo.
Le soglie definite con i dati sulle precipitazioni orarie risultano migliori nel prevedere gli eventi rispetto alle soglie definite con i dati giornalieri, ma, a causa inferiore lunghezza storica della serie di dati orari, queste soglie hanno una minore robustezza e sono più difficili da utilizzare in un contesto operativo. Infine, in questo articolo, si evidenziano le maggiori limitazioni delle soglie di precipitazione per la predizione di frane, legate alla stazionarietà e la risoluzione dei dati di precipitazione, alla mancata inclusione delle condizioni di saturazione antecedente e dei fattori predisponenti e all'elevato numero di falsi allarmi.

Parole chiave
Scivolamenti superficiali, sistemi di allarme, valori soglia per le precipitazioni

Einführung

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 als eine Kombination 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 km^2 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 subtäglichen Variabilität wurden Wetterradardaten 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 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 Vorhersagekraft, sofern sie mit dem Gesamtregen in 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 Variablen 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.

		Maximale Intensität	Mittlere Intensität	Niederschlagssumme	Dauer	ID-Kurve
Tagesniederschlag	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	-

Tabelle 1: Beste Schwellenwerte, erhalten durch Maximierung der TSS (True Skill Statistic) für die verschiedenen Niederschlagseigenschaften 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. | Tableau 1 : Meilleures valeurs de seuil obtenues en maximisant les TSS (True Skill Statistic, statistiques des compétences réelles) pour les différentes caractéristiques des précipitations en utilisant les précipitations quotidiennes ou horaires. Fausses alertes (FA), True Positive (TP) et valeurs correspondantes de TSS ainsi que les statistiques AUC (Area Under the Curve) pour la caractéristique de précipitation correspondante. L'AUC ne peut pas être calculée pour la courbe intensité-durée (ID), car l'optimisation est basée sur les deux paramètres qui décrivent une courbe de loi exponentielle.

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 Ergebnisse von der Genauigkeit der Datenbank der Rutschungen (Leonarduzzi et al., 2017; Leonarduzzi and Molnar, 2020) 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 Regenereignissen, 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 Bodenfeuchte 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 Metho-

den 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. Diese interagieren mit den Niederschlagsschwellenwerten. Auch wenn an einer Stelle eine 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 entsprechende 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 (Leonarduzzi and Molnar, 2020.) 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

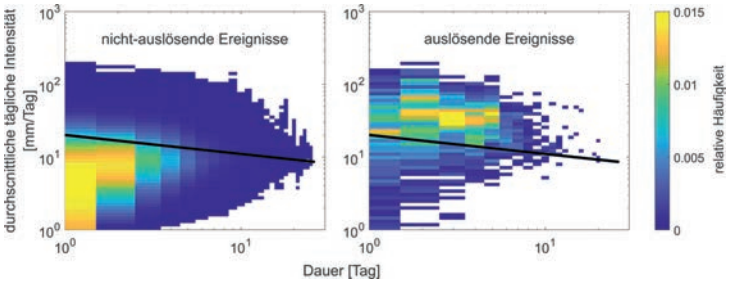


Abb. 1: Intensitäts-Dauer-Diagramme mit der Linie des Schwellenwertes, die sich durch die Maximierung der TSS (schwarze Linie) mit täglichen Daten ergab. Links die farbliche Darstellung der relativen Häufigkeit der nicht auslösenden Ereignisse und rechts die der auslösenden Ereignisse. | Fig. 1 : Graphiques intensité-durée avec la ligne de la valeur seuil obtenue en maximisant le TSS (ligne noire) avec les données quotidiennes. À gauche, la représentation colorée de la fréquence relative des événements non-déclencheurs et à droite, la fréquence relative des événements déclencheurs.

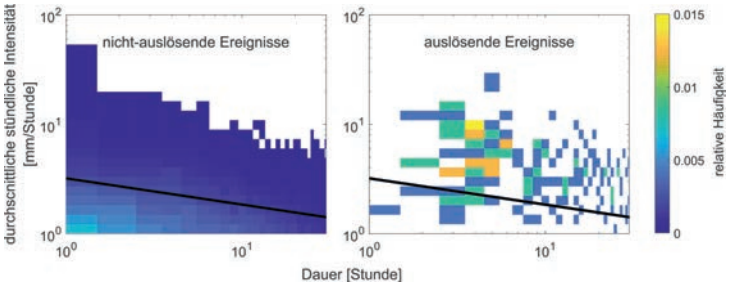


Abb. 2: Intensitäts-Dauer-Diagramme mit der Linie des Schwellenwertes, die sich durch die Maximierung der TSS (schwarze Linie) mit stündlichen Daten ergab. Links die farbliche Darstellung der relativen Häufigkeit der nicht auslösenden Ereignisse und rechts die der auslösenden Ereignisse. | Fig. 2 : Diagrammes intensité-durée avec la ligne de la valeur seuil obtenue en maximisant le TSS (ligne noire) avec des données horaires. À gauche, la représentation colorée de la fréquence relative des événements non-déclencheurs et à droite, celle des événements déclencheurs.

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 interessierenden Region 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 Ergebnisse werden erzielt, wenn man den Schwellenwert als Potenzfunktion im Intensitätsdauerraum definiert.
- Die auf der Stundenskala durchgeführte Analyse zeigt im Allgemeinen bessere Ergebnisse. 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 Auslösung 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.

Dank

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.

Literaturverzeichnis

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

Begueria, 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. (2010). 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. (2007). 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.

Leonarduzzi, E. and Molnar, P.: Data limitations and potential of hourly and daily rainfall thresholds for shallow landslides, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., https://doi.org/10.5194/nhess-2020-125, in review, 2020.

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. (2018): 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.

Kontaktadresse

Elena Leonarduzzi
Institut für Umweltingenieurwissenschaften, ETH Zürich
Stefano-Franscini-Platz 5
8093 Zürich
Tel. +41 44 633 27 30
leonarduzzi@ifu.baug.ethz.ch

und

Gebirgshydrologie und Massenbewegungen
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf

Elena Leonarduzzi

Prof. Dr. Peter Molnar
Institut für Umweltingenieurwissenschaften, ETH Zürich
Stefano-Franscini-Platz 5
8093 Zürich
Tel. +41 44 633 29 58
peter.molnar@ifu.baug.ethz.ch

Peter Molnar

Dokumentation von spontanen flachgründigen Rutschungen und Hangmuren

Christian Rickli

Zusammenfassung
Bei Starkregenereignissen werden oft zahlreiche spontane Rutschungen und Hangmuren ausgelöst. Aus der Dokumentation solcher Ereignisse ergeben sich wertvolle Erkenntnisse zu Entstehung und Ablauf von Hangprozessen. Diese sind eine wichtige Basis für die Erstellung von Gefahrengrundlagen. 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.

Keywords
Rutschung, Hangmuren, Datenbank, Dokumentation, Geologie, Vegetationswirkung

Documentation des glissements de terrain spontanés de faible profondeur et laves torrentielles

Résumé
Lors de fortes précipitations, des glissements de terrain peu profonds et des laves torrentielles se produisent souvent. La documentation de ces événements fournit des informations précieuses sur la formation et le déroulement de ces processus. Elles constituent une base importante pour la création de la documentation sur les dangers. La base de données du WSL sur les glissements de terrain contient des informations recueillies sur le terrain au sujet des glissements de terrain qui se sont produits lors d'événements météorologiques importants au cours des 20 dernières années. Une application web existe pour la base de données, sur laquelle les données peuvent être consultées et qui permet également l'exportation de données sélectionnées. Cet article présente quelques exemples d'évaluations de la géologie, de la végétation et sur le déclenchement des laves torrentielles.

Mots-clés
Glissement de terrain, laves torrentielles, base de données, documentation, géologie, effets sur la végétation.

HINWEIS:
Dieser Artikel wurde für die Kursunterlagen zum FAN-Herbstkurs 2019 mit Thema «Umgang mit flachgründigen Rutschungen und Hangmuren» verfasst und steht nun in leicht überarbeiteter Form für das Mitteilungsblatt des Vereins für Ingenieurbiologie zur Verfügung.

Documentare movimenti di versante superficiali spontanei e colate detriche

Riassunto

In caso di forti precipitazioni, spesso si innescano numerose frane spontanee e colate detritiche di versante. La documentazione di tali eventi fornisce preziose informazioni sull'origine e la dinamica dei processi su pendii. Queste sono una componente importante per la creazione di basi di pericolo. Il database delle frane del WSL contiene informazioni raccolte sul campo sulle frane che si sono verificate durante i gravi eventi atmosferici degli ultimi 20 anni. Esiste un'applicazione web per la banca dati, sulla quale è possibile visualizzare i dati e che consente anche l'esportazione dei dati selezionati. In questo articolo vengono presentati alcuni esempi di valutazioni della geologia, della vegetazione e del movimento delle frane.

Parole chiave

Frane, movimenti di versante, banca dati, documentazione, geologia, influsso della vegetazione

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. Zudem werden die WSL-Rutschungsdatenbank sowie einiger Beispiele von Datenauswertungen beschrieben.

Abb. 1: Beispiel einer Hangmure, welche durch die Starkniederschläge vom August 2005 in Flühli LU ausgelöst wurde. | Fig. 1: Exemple d'une lave torrentielle provoquée par les fortes précipitations du mois d'août 2005 à Flühli LU.

Rutschungen und Hangmuren sind 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 Gefahrengrundlagen 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 in Angriff genommen werden, spielt der Zeitpunkt der Dokumentation eine entscheidende Rolle. Je zeitnaher die Erhebungen erfolgen, desto präziser lassen sich die Prozesse beurteilen.

Abb. 2: Kreislauf integrales Risikomanagement: Ereignisdokumentation sowie die entsprechenden Lehren im Rahmen der Regeneration nach Ereignissen (BABS 2014). | Fig. 2: Cycle de la gestion intégrale des risques : documentation des événements et enseignements correspondants tirés de la régénération après les événements (FOCP 2014).

In der Schweiz sind die Kantone gemäss Wald- und Wasserbaugesetz verpflichtet, Gefahrenkataster zu führen, wobei entsprechende Aufwendungen mit bis zu 80% abgegolten werden. Der Bund stellt den kantonalen Fachstellen die dazu erforderlichen Instrumente zur Verfügung: den **Naturereigniskataster StorMe** sowie die entsprechenden Erhebungsformulare. Die Entwicklung von StorMe begann 1996 (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 Detailinformationen zum Prozess (bei Rutschungen z.B. Informationen zur Auslösung, Ablagerung und zum Prozessraum) und allenfalls weitere Beobachtungen protokolliert.
Im Unterschied zur Rutschungsdatenbank der Eidg. Forschungsanstalt WSL (vgl. 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 WSL-Rutschungsdatenbank wesentlich höher. Dies zeigt sich unter anderem auch daran, dass bei Inventaren für die Rutschungsdatenbank der WSL 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 «hillshade») 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

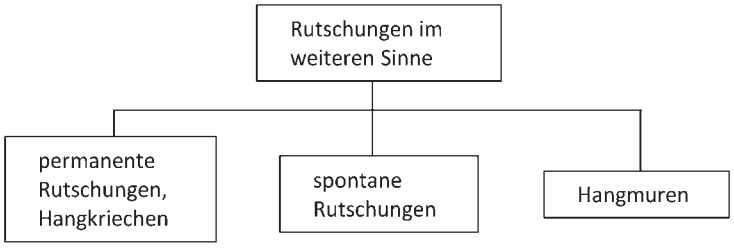


Abb. 3: Klassifikation von Rutschungen im weiteren Sinne (AGN 2004; siehe auch BAFU 2016). | Fig. 3: Classification des glissements de terrain au sens large (AGN 2004 ; cf. aussi OFEV 2016).

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, 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. 2019). Dabei werden unterschiedliche Ziele verfolgt (Guzzetti et al. 2012): 1) Erhebung des Ausmasses der Ereignisse, 2) Beschreibung der Verteilung der Prozesstypen und deren Ausprägungen, 3) Grundlage oder Vorstufe zu einer Gefahrenhinweiskarte und 4) Untersuchungen zur Landschaftsentwicklung. Je nach Zielsetzung liegt der Fokus eher auf der Wissenschaft (z.B. Analyse Einflussfaktoren Auslauf) oder der Praxis (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 Auslöseereignis (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 entstanden in der Vergangenheit vor allem Ereignisinventare. Dabei wurde nach Unwettern jeweils in einer besonders stark betroffenen Region ein Untersuchungsperimeter ausgeschieden (Abbildung 4) und dann innerhalb der Perimetergrenzen alle Rutschungen mit einem Volumen von mehr als 30 m^3 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.

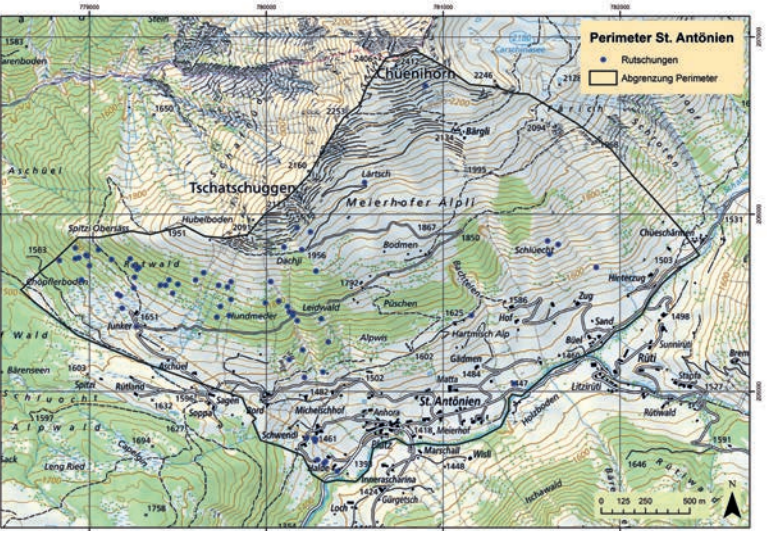


Abb. 4: Beispiel eines Untersuchungsgebietes: Inventar der Rutschungen in St. Antönien GR (Unwetter 2005). | Fig. 4: Exemple d'une zone d'étude : inventaire des glissements de terrain à St. Antönien GR (intempéries 2005).

5. WSL-Rutschungsdatenbank

Die Eidg. Forschungsanstalt WSL beurteilte seit 1997 nach Schadenereignissen jeweils zahlreiche flachgründige Rutschungen und Hangmuren (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/),

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

*Tabelle 1: Aktueller Datenumfang der WSL-Rutschungsdatenbank; Unwetterereignisse mit vielen Rutschungen und Erhebung durch die WSL. * Erhebung im Rahmen von Diplomarbeiten mit Betreuung durch WSL; ** Erhebungen durch ausgewählte Ingenieurbüros.. | Tableau 1 : Volume de données actuelles de la base de données du WSL sur les glissements de terrain; intempéries avec de nombreux glissements de terrain et enquête du WSL. * Enquête dans le cadre de travaux de diplôme encadrés par le WSL; ** Enquête en 2014 par une sélection de bureaux d'ingénieurs.*

auf welcher die Informationen eingesehen werden können und die den Export ausgewählter Daten erlaubt. Neben der Bearbeitung wissenschaftlicher Fragstellungen leistet die Datenbank wertvolle Dienste bei der Erstellung von Gefahrengrundlagen 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 (geologische/tektonische Lage, Morphologie, Hydrologie, Vegetation/Nutzung)
- Charakterisierung Rutschung (Prozess und Auslauf, Boden, Geologie, Schutzbauten)
- Schäden (Menschen und Tiere, Infrastruktur, Sachwerte)
- Meteorologie (auslösender Niederschlag, Witterung)
- Förder- und Auslösefaktoren
- Metadaten (Erhebung, bestehende Gefahrengrundlagen)

Die Datenbank enthält 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). 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).

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 Lage[1] und die Hauptlithologie[2] erfasst. Dies erfolgte nicht im Feld, sondern nachträglich mittels Verschneiden der digitalten Geologischen Karte der Schweiz 1:500'000 bzw. des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 mit den Postitionsdaten der Rutschung. Am meisten Rutschungen ereigneten sich gemäss Abbildung 3 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
- Gefaltetete Molasse: hauptsächlich Inventar Appenzell 2002
- Subalpine Molasse: hauptsächlich Inventare Entlebuch 2005 und Eriz 2012
- Bündner Schiefer: hauptsächlich Inventar St. Antönien 2005

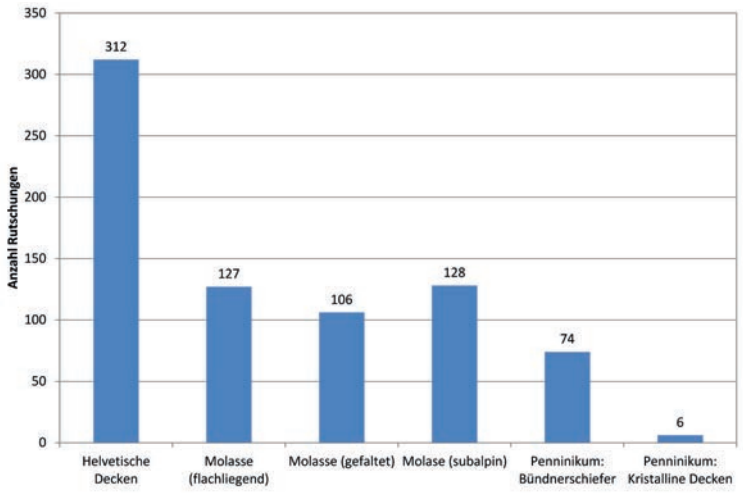


Abb. 5: Tektonische Lage der Rutschungen und Anzahl pro Einheit. | Fig. 5: Localisation tectonique des glissements de terrain et nombre par unité.

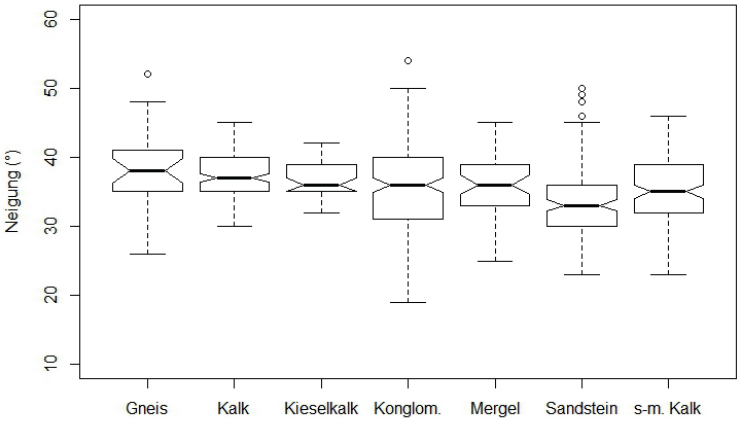


Abb. 6: Neigungsbereiche von Rutschungen in verschiedenen Hauptlithologien (Konglom.= Konglomerate, s-m. Kalk = schiefriger bis mergeliger Kalk). | Fig. 6: Domaines d'inclinaison des glissements de terrain dans différentes lithologies principales (Konglom = conglomérats, s-m. Kalk = pierre calcaire à caractère schisteux à marneux).

[1] *Tektonik: geologischer Aufbau/Struktur*

[2] *Lithologie: Gesteinsart*

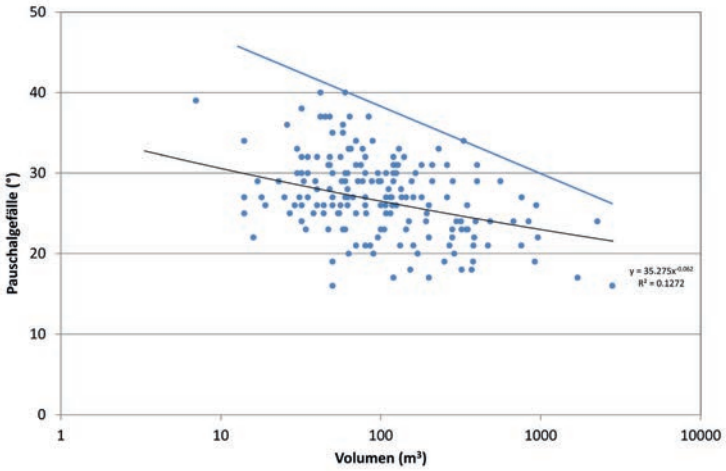


Abb. 7: Zusammenhang zwischen Pauschalgefälle und Volumen der Hangmuren (n=185). x-Achse mit logarithmischem Massstab; blaue Linie: maximale Pauschalgefälle, schwarze Linie: Regressgerade. | Fig. 7: Relation entre la pente globale et le volume des coulées de boue (n=185). Axe des x avec échelle logarithmique ; ligne bleue : pente globale maximale, ligne noire: ligne de régression

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). Abbildung 5 zeigt, 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 m^3 etwa bei 40° und bei Volumen um 1000 m^3 etwa bei 30°. Zu bemerken ist, dass nur bei etwa einem Viertel der 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.

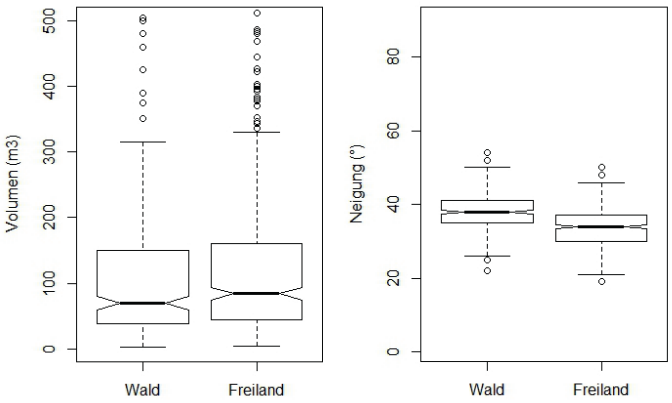


Abb. 8: Unterschiede zwischen Rutschungen im Wald und im Freiland. Links: Volumen (Wald: n=279, Freiland: n=340); rechts: Neigungen (Wald: n=305, Freiland: n=357). | Fig. 8: Différences entre les glissements de terrain en forêt et en terrain libre. A gauche : volumes (forêt: n=279, terrain libre: n=340) ; à droite : inclinaisons (forêt: n=305, terrain libre: n=357).

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 6). 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.

Dank

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

Literatur

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., Krummenacher, B. (1995). Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene, Empfehlungen Ausgabe 1995. 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., McArdell, B. (2019). Schützt der Wald vor Rutschungen? Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank, Schweiz. Zeitschr. Fortsw. 170(6): 310-317.

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, 27 S.

Kontaktadresse

Christian Rickli
Gebirgshydrologie und Massenbewegungen
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
044 739 2403
christian.rickli@wsl.ch

Christian Rickli

Praxisanwendung der 3D-Hangmurensimulation zur Bestimmung der Einwirkungen

Albrecht von Boetticher

Zusammenfassung
Der Zusammenhang zwischen einer Hangmurenauslösung und deren Gefahreneinwirkung in Form von Fliessgeschwindigkeit, Fliesshöhe und Dichte wird bisher durch Erfahrungswerte sichergestellt. Verlässt man deren Gültigkeitsbereich wie etwa bei seltenen Extremereignissen, bei Anprallszenarien im Steilhang, beim Einschlag von an der Oberfläche mitgetragenen Baumstämmen oder bei Prozessverkettungen mit weiteren Hangmuren, kann man inzwischen robuste Resultate mit Hilfe einer frei verfügbaren numerischen 3D-Simulationssoftware für Hangmuren und Murgänge erzielen. Wichtiger als numerisches Fachwissen ist dabei eine fachliche Beurteilung der Auslösezone und der Materialzusammensetzung der Hangmure samt Wassergehalt.

Keywords:
Hangmuren, Anprall, Fliessverhalten, Oberflächenfliessgeschwindigkeit, 3D-Simulation, Prozessmodellierung

Application pratique de la simulation 3D de lave torrentielle pour déterminer l'impact

Résumé
Le lien entre le déclenchement d'une lave torrentielle et ses effets de risque sous la forme de la vitesse, de la hauteur et de la densité de l'écoulement a été jusqu'à présent assuré par des valeurs empiriques. Si l'on sort de leur domaine de validité, comme dans le cas d'événements extrêmes rares, de scénarios d'impact sur des pentes raides, de l'impact de troncs d'arbres portés à la surface ou de chaînes de processus avec d'autres glissements de terrain, des résultats robustes peuvent désormais être obtenus à l'aide de logiciels de simulation numérique 3D librement disponibles pour les glissements de terrain et les laves torrentielles. Plus importante que l'expertise numérique est l'évaluation par des experts de la zone de déclenchement et de la composition matérielle de la lave torrentielle, y compris la teneur en eau.

Mots-clés
Laves torrentielles, impact, comportement de l'écoulement, vitesse d'écoulement en surface, simulation 3D, modélisation des processus.

Applicazione pratica della simulazione 3D di colate detriche per determinarne l'impatto

Riassunto

Il rapporto tra le cause che producono una frana e i suoi effetti sul pericolo sotto forma di velocità del flusso, altezza del flusso e densità è stato finora gestito tramite valori empirici. Se si lascia la loro area di validità, come nel caso di rari eventi estremi, scenari di distacco su pendii ripidi, l'influenza di tronchi d'albero trasportati in superficie o l'effetto valanga su altre frane, è ora possibile ottenere risultati robusti con l'aiuto di software di simulazione numerica 3D liberamente disponibili per la simulazione di frane e colate detritiche. Più importante della perizia numerica è una valutazione esperta della zona di distacco e della composizione del materiale della colata detritica, compreso il contenuto d'acqua.

Parole chiave

Frane, distacco, movimento, velocità superficiale, simulazione 3D, modellizzazione

Einleitung

Seit den Hochwasserereignissen von 2005 hat sich der Blick auf die Naturgefahr Hangmuren verändert. Die umfassende Erfassung von Hangmurenereignissen und die Bereitstellung der Daten für Forschung und Praxis, wie z. B. durch die Hangmurendatenbank der WSL, hat zu einer breit aufgestellten Weiterentwicklung der Gefahrenbeurteilung geführt. Zu den innovativen Bereichen zählt auch die bisherige Entwicklung im Objektschutz, beispielsweise mit Schutznetzen. Um die Wirkung von Objektschutzmassnahmen zu beurteilen, muss die Einwirkung der Hangmure bestimmt werden. Eine erste Abstufung erfolgt auf der Grundlage von Intensitäten. Um Objektschutzmassnahmen festlegen zu können, muss jedoch schlussendlich die Einwirkung in bezüglich Fliessgeschwindigkeiten, Fliesshöhen und Dichte definiert werden, damit die Anpralldrücke und Einwirkungsbereiche bestimmt werden können. Es zeigt sich, dass die heutigen Kriterien der Hangmurenintensität (vgl. BAFU 2016) umstritten sind, da die zu Grunde gelegten Grössen aus Anrisshöhe und Ablagerungsmächtigkeit nicht ohne Weiteres im Zusammenhang mit der Einwirkung in Form von Anpralldrücken und Fliesshöhen stehen. Die Praxis erstellt diesen fehlenden Zusammenhang durch erfahrene Spezialisten, die wiederum auf eine gute Ereignisdokumentation zurückgreifen. Grössenordnungen für die Frontfliessgeschwindigkeit und Fliesstiefe haben sich in der Praxis etabliert und sind anhand von Schadensbildern und zurückgerechneten Anpralldrücken und Geschwindigkeiten an Gebäuden überprüft worden. Diese Methodik gelangt jedoch in einigen Bereichen an ihre Grenzen:

1. Beurteilung im Hang: Die gängigen Geschwindigkeitsabschätzungen basieren zu grossen Teilen auf Hangmuren im Auslaufbereich. Die Geschwindigkeiten und Abflusstiefen im Transitbereich im Hang sind hingegen weniger gut bekannt. Experimentelle Untersuchungen im grossen Massstab liegen in der Schweiz nur für Hangmuren bei ca. 30° Hangneigung vor.
2. Die Kornzusammensetzung hat einen grossen Einfluss auf das Fliessverhalten. Man unterscheidet bei der Abschätzung der Einwirkung zwischen granularen und viskosen Hangmuren. Bei vorliegender Materialprobe ist es jedoch inzwischen möglich, eine differenziertere Unterscheidung vorzunehmen.
3. Die Ereignisdatenbank enthält kaum Aussagen über die zu erwartenden Extremereignisse mit Jährlichkeiten von 300 Jahren und mehr. Der Objektschutznachweis erfordert aber entsprechende Nachweise bei Sonderrisikoobjekten.
4. Von der Hangmure transportierte Baumstämme und Blöcke können für den Anprall massgebend werden Diese bewegen sich jedoch im Allgemeinen nicht mit der Frontfliessgeschwindigkeit, sondern können beispielsweise mit der Oberflächenfliessgeschwindigkeit viel höhere Anprallgeschwindigkeiten erreichen, die kaum abzuschätzen sind.

Bei entsprechend hohem Schadenspotential lohnt es sich, den Punkten 1 bis 4 mit Numerischen Simulationen zu begegnen. Inzwischen steht es Ingenieurbüros offen, mit relativ kleinem Aufwand Hangmuren zu modellieren. Die Schlüsselfunktion liegt dabei in der Berücksichtigung der physikalischen Fliessprozesse: Die Suspension von Feinanteilen wird in Zonen grosser Geschwindigkeitsunterschiede dünnflüssiger (Shearthinning-Effekt), wodurch eine bereits schnell fliessende Hangmure in einem steilen Hangbereich zusätzlich deutlich mehr beschleunigen kann als eine langsam fliessende gleicher Zusammensetzung. Die Kieskomponenten dissipieren wiederum mehr Bewegungsenergie bei steigenden Drücken (Reibung zwischen Körnern), was z. B. beim Bremsvorgang im Auslauf und beim Anprall an Schutzbauten das Fliessverhalten stark beeinflusst. Beide Effekte können in dreidimensionalen Mehrphasensimulationen besser abgebildet werden als in tiefengemittelten Modellen. Letztere haben bisher die Modellierung von Massenbewegungen aufgrund begrenzter Rechenleistungen dominiert. Inzwischen sind jedoch dreidimensionale Mehrphasensimulationen von Hangmurenprozessen ohne Weiteres für Ingenieurbüros anwendbar, wie das folgende Beispiel aufzeigen soll. Für verwendbare Resultate ist dabei nicht mehr die Erfahrung für aufwendige Modellkalibrierungen massgebend, sondern wie bisher das Fachwissen zur

Beurteilung der Hangmurendisposition, Materialzusammensetzung und Ereignisgrösse. Nachfolgend beschreiben wir die entsprechende Anwendung für eine Hangmurengefährdung bei Diemtigen (BE) mit dem an der WSL & ETH entwickelten Hangmuren- und Murgangcode *debrisInter-Mixing*, der frei erhältlich ist (von Boetticher 2019).

Dokumentiertes Hangmurenereignis

Der betreffende Hang grenzt westlich an das Siedlungsgebiet Diemtigen zwischen Oberi Eggweid und Vorders Bergli / Hubel. Die steileren Bereiche mit über 31° Hangneigung sind gemäss Waldinformation im Geoportal des Kantons Bern mit etwa 80% Deckungsgrad bewaldet und gehören zum Objektschutzwald des Bundes. Etwa 1/3 der Bäume sind Nadelhölzer und die Entwicklungsstufen sind Baumholz II (41 – 50 cm Brusthöhendurchmesser) und Baumholz III (>50 cm Brusthöhendurchmesser), vgl. Abbildung 1.

als auch auf gleicher Höhe benachbart befinden sich Sickerleitungsfassungen. Das Gelände weist eine ungünstige Form auf, indem es von flacheren zu steileren Bereichen übergeht (Abbildung 3), was oberhalb des Ausbruches heute noch markanter ist, als auch durch die Muldenform (Abbildung 4).

Szenario eines 300-jährlichen Ereignisses mit Folgeauslösung

Die Extremwertanalyse von MeteoSchweiz für die Messstelle Erlenbach im Simmental ergibt für eine Jährlichkeit von 300 einen Tagesniederschlag von etwa 120 mm mit Konfidenzintervall 90 mm – 200 mm, was im Mittel ca. 20% über den Ereignissen von 2005 liegt (Erlenbach 95 mm Tagesniederschlag gemäss Messdatensatz, Thun 94.7 mm gemäss Arbeitsbericht MeteoSchweiz 2006). Als einfacher Ansatz wird angenommen, dass 20% mehr Wasser ent-

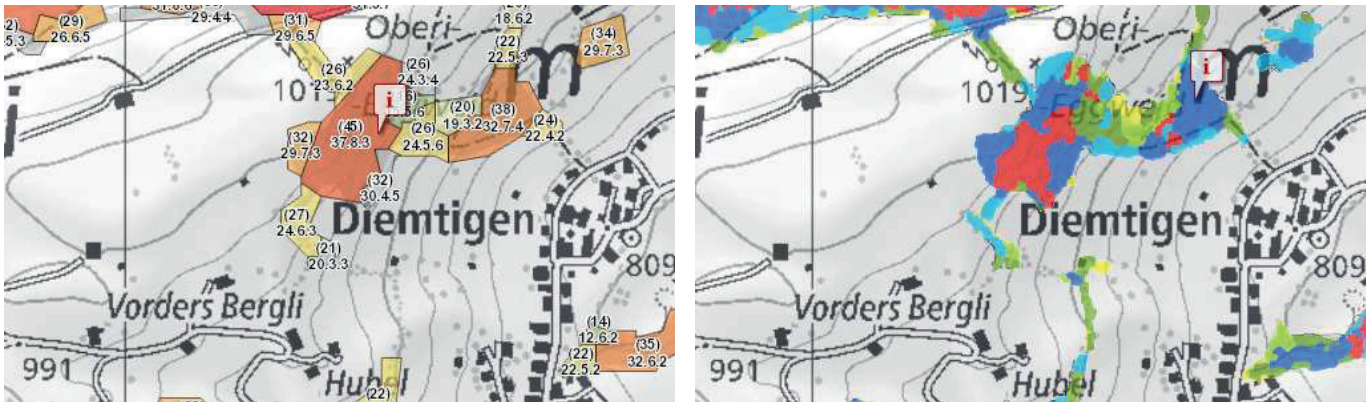


Abb. 1: Schutzwald mit 79% Deckungsgrad bestehend aus 33% Nadelholz (orange Flächen, links) gemäss Objektinformation der Waldinformation im Geoportal Kanton Bern mit Baumbestand von über 50 cm Brusthöhendurchmesser (rote Fläche, rechts). | Fig. 1: Forêt protectrice avec un degré de couverture de 79% composée de 33% de conifères (surfaces orange, à gauche) selon l'information forestière du géoportail du canton de Berne avec une population d'arbres de plus de 50 cm de diamètre à hauteur de poitrine (surface rouge, à droite).

Die für die Hangmurenauslösung betrachteten weniger steilen Bereiche der Trogmatte bestehen aus Wiesen (keine Kuhtritte) auf Moränenmaterial mit Parabraunerden. Als Ausgangsszenario wurde ein erneuter Anriss im Bereich eines früheren Ereignisses gewählt. Im Anrissbereich entnommene Proben bis in 1 m Tiefe deuten auf hohe Tonanteile sowohl im Bt-Horizont als auch im darüber liegenden E-Horizont hin, mit 15% Sand und 20% Kies. Die 2005 hier entstandene Hangmure (Ereignis 2005-R0189 im Naturereigniskataster StorMe, siehe Abbildung 2) hatte eine Anrissmächtigkeit von 3 m, weshalb im Vergleich zur Bodenprobe mit höheren Kiesanteilen aus tieferen Schichten gerechnet werden muss. Die Hangmure entstand am Nachmittag des 22. August, nachdem innert 72 Stunden etwa 220 mm Niederschlag gefallen waren. Die Auslösezone liegt in einem Bereich mit Oberflächenabfluss gemäss Gefährdungskarte Oberflächenabfluss. Sowohl unterhalb

sprechend das Stauwasser im Boden steigern. Bei gleichmässigem Terrain kann grob vereinfacht für einen fiktiven (zur Ausbruchmitte hin linear verlaufenden) Stauhorizont die Stauwasserzunahme um 20% zu einer analogen vergrösserten Ausdehnung des instabilen Bodenbereiches in jede Richtung führen. Aufgrund des breiten Konfidenzintervalls für die Niederschlagsmenge eines 300-Jährlichen Ereignisses wird als Sicherheit ein gegenüber 2005 rund dreifach erhöhtes Auslösevolumen angesetzt. Als massgebendes Ereignis wird eine spontane Rutschung von 1000 m^3 oberhalb des Anrisses von 2005-R-0189 angenommen (zwischen 950 und 960 m ü. M.). Aufgrund der alten Rutschung fehlt hier der stabilisierende Böschungsfuss, der Wasseraustritt und die ungünstige Geländeform sind jedoch weiterhin vorhanden. Die Anrissmächtigkeit wird wie im Ereignis von 2005 mit 3 m angenommen.

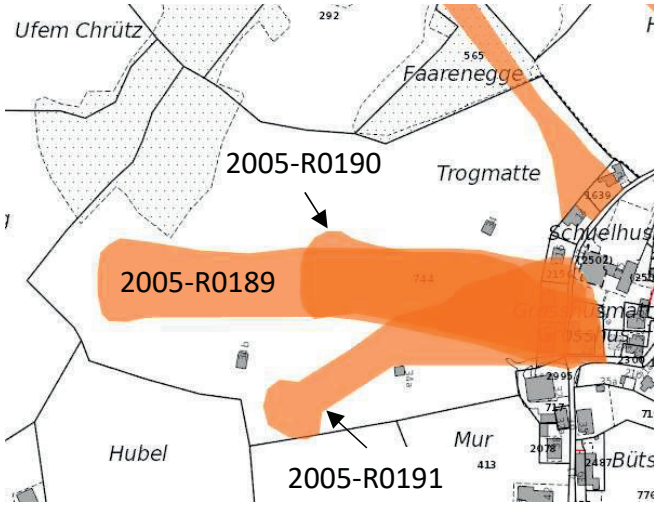


Abb. 2: Historische Ereignisse im Untersuchungsgebiet. Für das 300-jährliche Szenario werden Auslösungen aus den Anrissbereichen von 2005-R0189 und 2005-R0191 (Folgeauslösung) kombiniert. | Fig. 2: Événements historiques dans la zone d'étude. Pour le scénario à 300 ans, les déclenchements des zones de rupture de 2005-R0189 et 2005-R0191 (déclenchement séquentiel) sont combinés.

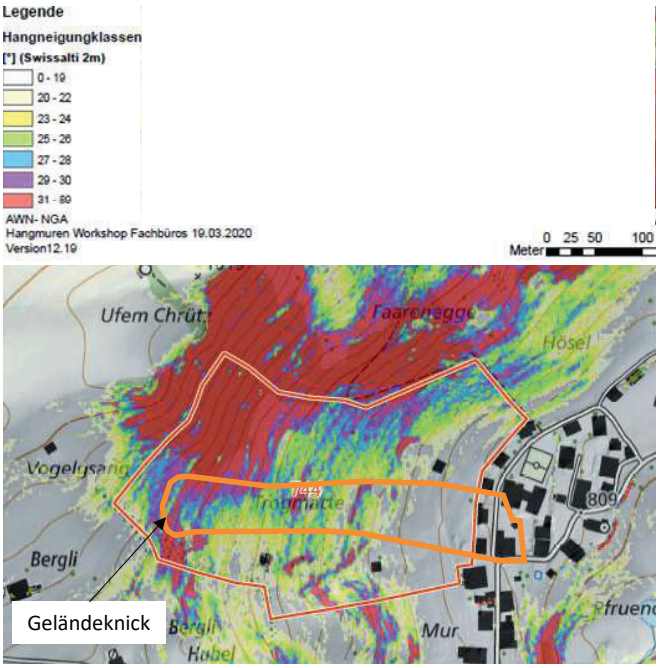


Abb. 3: Kritische Hangneigung mit ungünstiger Topografie im Auslösebereich von 2005-R0189 (orange Linie: Umriss gemäss Ereigniskataster). | Fig. 3: Inclinaison critique de la pente avec une topographie défavorable dans la zone de déclenchement de 2005-R0189 (ligne orange : contour selon le cadastre des événements).

Als ungünstige Prozesskette wird zudem angenommen, dass dieses 300-jährliche Bemessungsereignis auf der Höhe der Auslösezonen von 2005-R-0190 und 2005-R-0191 die Bodenstabilität nachteilig beeinflusst und es in diesem Bereich zu entsprechenden weiteren Auslösungen kommen kann. Die Simulation ergab, dass das Bemessungsereignis auf die Auslösezone von 2005-R-0191 trifft, weshalb das Ereignis 2005-R-0191 als Folgeauslösung modelliert wurde. Die zusätzliche modellierte Auslösung im Anrissbereich von 2005-R-0191 wurde bei abklingender Überdeckung rund 10 s nach dem Eintreffen des Bemessungsereignisses aktiviert, um der mobilisierenden Wirkung der Sohlschubspannung der ersten Hangmure Rechnung zu tragen und zugleich einen gewissen Zeitbedarf für die Veränderung der lokalen variablen Disposition zuzulassen.

Abb. 4: Überwachsene Ausbruchstelle von 2005-R0189 (rote Linie: Anrisskanten). | Fig.4: Zone de rupture recouverte de 2005-R0189 (ligne rouge : tracé de la rupture).

Methode: 3D Simulation

Die Auslösung wurde mit dem an der ETH und WSL entwickelten frei zugänglichen, dreidimensionalen Hangmuren- und Murgangcode *debrisInterMixing* modelliert, der zudem zukünftig auch als ecorisQ-Tool bereitgestellt wird (www.ecorisq.org/ecorisq-tools). Als Modellgrundlage benötigt man ein digitales Höhenmodell (hier SwissAlti3D von Swisstopo) und Angaben zur Materialzusammensetzung. Der freie Modellparameter zur Gitterkalibrierung wurde in diesem Beispiel anhand eines Hangmurenversuchs in Veltheim (AR) kalibriert (von Boetticher 2012), bei welchem unterhalb der Auslösung in etwa die gleiche Hangneigung wie unterhalb des Anrisses von 2005-R-0189 vorlag. Der Modellparameter wurde so gewählt, dass eine Simulation mit einer eher granularen Mischung eines Hangmurenversuchs aus Veltheim auf ca. 30 m Fliessweg unterhalb der Auslösezone von 2005-R-0189 wie in Veltheim eine Frontgeschwindigkeit von ca. 10 m/s entwickelt (Abbildung 5). Anschliessend wurde die Simulation mit der Materialzusammensetzung des Bemessungsereignisses wiederholt (Abbildung 6), basierend auf den im Anrissbereich entnommenen Bodenproben.

Die Gitterauflösung wurde für dieses Beispiel mit 30 cm Zellkantenlänge horizontal und 25 cm Zellhöhe vertikal sehr grob gehalten. Für ein finales Bemessungsereignis sollten kleinere Zellabmessungen verwendet werden, vor allem im Auslöse- und Einwirkungsbereich.

Resultate

Die modellierte Hangmure fliesst mit grosser Geschwindigkeit als relativ konzentrierte Masse über den steilen Hang ab und erreicht nach 15 Sekunden die Auslösezone von 2005-R-0191 (Abbildung 7). Anschliessend folgt die Simulation dem historischen Fliessweg von 2005-R-0191 und verteilt sich über eine grössere Fläche. Nach 26 Sekunden wurde in der Simulation ein Bereich beim Anriss von 2005-R-0191 mit Hangmurenmaterial zusätzlich verfüllt, um so eine Folgeauslösung zu imitieren (Abbildung 8). Während die erste modellierte Hangmure in einer leichten Senke vor dem Ortsbeginn grösstenteils abgebremst wird, entwickelt die Folgeauslösung grosse Geschwindigkeiten (Abbildung 9) und verteilt sich entsprechend dem historischen Ereignis von 2005-R0191 (Abbildung 10). Schliesslich erreicht das Szenario die Siedlung mit Fliesshöhen von weniger als 0.5 m und 3–4 m/s Frontfliessgeschwindigkeit (Abbildung 11).

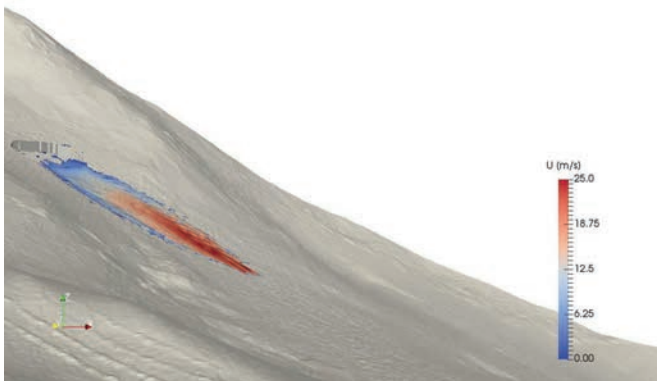


Abb. 5: Beschleunigungsstrecke mit einer Materialmischung entsprechend der Versuche in Veltheim zur Kalibrierung anhand der Frontfliessgeschwindigkeit (Farblegende entsprechend Oberflächenfliessgeschwindigkeit U [m/s]). | Fig.5: Tronçon d'accélération avec un mélange de matériaux selon les tests effectués à Veltheim pour un calibrage basé sur la vitesse d'écoulement frontale (légende de couleur correspondant à la vitesse d'écoulement en surface U [m/s]).

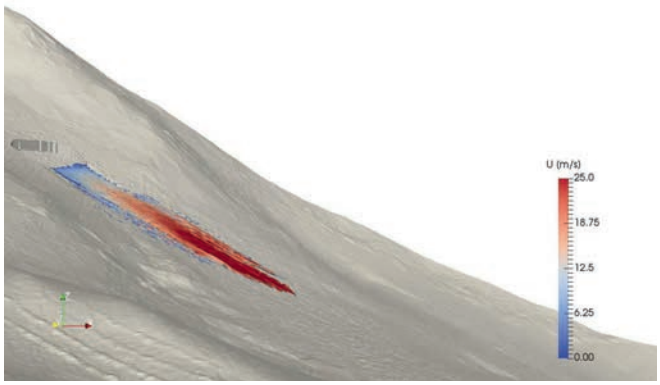


Abb. 6: Beschleunigungsstrecke mit der Zusammensetzung entsprechend der lokalen Materialproben. | Fig. 6: Tronçon d'accélération avec la composition selon les échantillons de matériaux locaux.

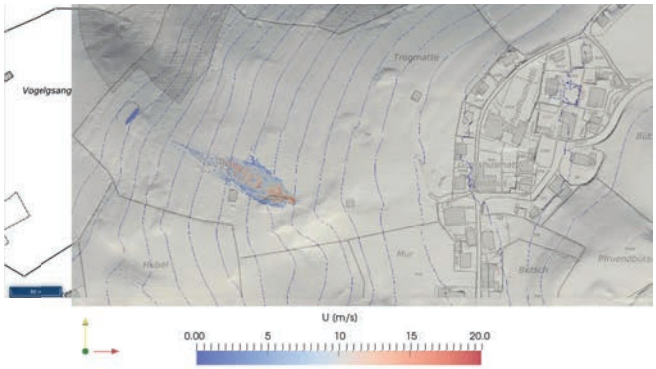


Abb. 7: Situation mit Höhenlinien (10 m Aequidistanz) und der in der Auslösezone von 2005-R-0191 eintreffenden Bemessungshangmure 15 Sekunden nach der Auslösung. | Fig.7: Situation avec les courbes de niveau (équidistance de 10 m) et la coulée de dimensionnement

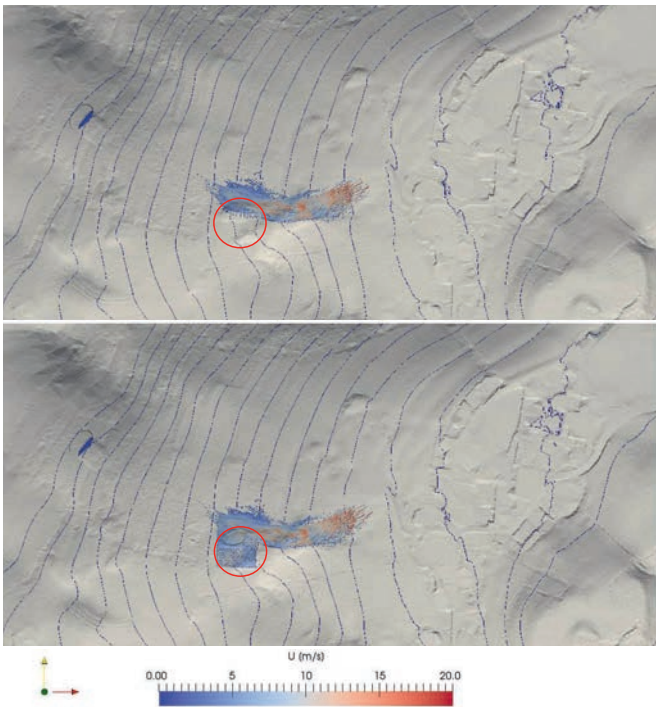


Abb. 8: Im Zeitpunkt der Folgeauslösung (oben) 26 Sekunden nach der Auslösung wird durch Verfüllen des alten Anrissbereichs von 2005-R-0191 (roter Kreis) mit Hangmurenmaterial (unten) eine Folgeauslösung imitiert. | Fig. 8: Au moment du déclenchement séquentiel (en haut), 26 secondes après le déclenchement, un déclenchement séquentiel est imité en remplissant la zone de l'ancienne rupture 2005-R-0191 (cercle rouge) avec des matériaux de laves torrentielles (en bas).

Diskussion

Im Gegensatz zum Ereigniskataster (Abbildung 2) verläuft der Fliessweg der simulierten Hangmure südlicher. Eine Überprüfung mit Fotos vom Ereignis zeigt, dass tatsächlich das Ereignis 2005-R0189 südlich an der Hangmure 2005-R0190 vorbei dem simulierten Fliessweg gefolgt ist (Abbildung 12). Die Folgeauslösung verhält sich im Fliess-

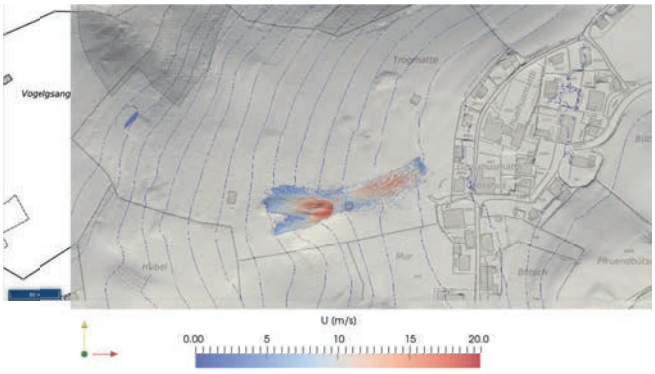


Abb. 9: Entstehung einer neuen Front aus der Folgeauslösung (30 s nach der Erstauslösung), während sich die erste Hangmure im flachen Bereich vor dem Ortsbeginn verteilt. | Fig. 9: Émergence d'un nouveau front à partir du déclenchement séquentiel (30 secondes après le déclenchement initial), tandis que la première coulée de boue est distribuée dans la zone plate avant le début de la localité.

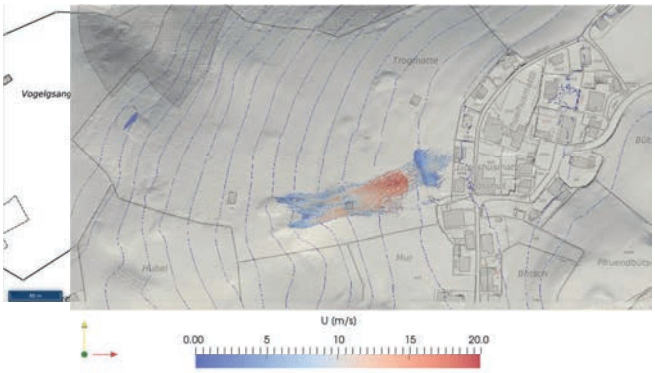


Abb. 10: Die erste Hangmure wird grösstenteils in einer leichten Senke bei 830 m ü. M. am Ortsbeginn abgebremst. Das Material der Folgeauslösung verteilt sich vermehrt über die Breite, analog zum Ereignis 2005-R0191 (35 s nach der Erstauslösung). | Fig. 10: La première coulée est fortement ralentie dans une légère cuvette à 830 m s.m. au début de la localité. Les matériaux du déclenchement séquentiel sont de plus en plus répartis sur la largeur, de manière analogue à l'événement 2005-R0191 (35 secondes après le déclenchement initial).

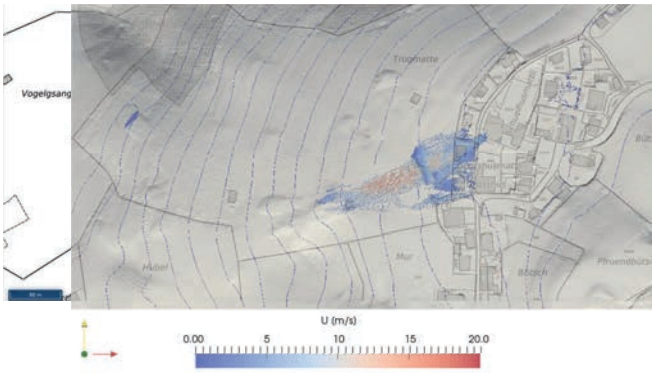


Abb. 11: Eindringen ins Siedlungsgebiet mit 3-4 m/s Frontfliessgeschwindigkeit und weniger als 0.5 m Fliesshöhe. | Fig. 11: Pénétration dans la zone d'habitations

weg ebenfalls passend zur historischen Dokumentation (Abbildung 2 und 10). Die modellierten Fliesswege scheinen somit plausibel. Die Fliessgeschwindigkeiten erreichen im Transitbereich mit 13 m/s deutlich grössere Werte als bei vielen Fachleuten erfahrungsgemäss angenommen werden würde, entwickeln im Siedlungsraum mit 3-4 m/s Frontfliessgeschwindigkeit und geringer Fliesshöhe jedoch wieder eine Intensität, die zur Praxiseinschätzung passt. Das vorgestellte Szenario veranschaulicht eine konservative Abschätzung eines 300-jährlichen Hangmurenereignisses und liefert zu jedem Zeitpunkt nebst der Frontfliessgeschwindigkeit und Fliesstiefe auch die entsprechenden Oberflächenfliessgeschwindigkeiten. Nebst der damit definierbaren Einwirkung auf Bauten aus Anpralldruck und Einwirkungshöhe kann der Anprall von beispielsweise auf der Fliessoberfläche getragenen Baumstämmen mit der richtigen Dynamik berücksichtigt werden.

Grosse Anforderungen werden jedoch nach wie vor an die Beurteilung des Auslösebereiches gestellt. In vielen Hängen ist die oberflächennahe Schicht derart inhomogen, dass die Materialzusammensetzung eines angenommenen Anrissbereiches deutlich von einem benachbarten Ausbruch abweichen kann. Vor allem der Tonanteil hat zusammen mit dem angenommenen Wassergehalt einen grossen Einfluss auf das Fliessverhalten. Die daraus entstehende Ungewissheit ist jedoch sowohl für Beurteilungen mit Modellierung als auch ohne Modellierung die gleiche, und sollte bei entsprechendem Schadenpotential kein Argument sein, auf eine 3D-Simulation der Fliesswege und Einwirkungen zu verzichten. Zwar können bisher kaum Prognosen darüber

Abb. 12: Sicht auf den Ereignishang mit deutlichen Spuren der Ereignisse 2005-R0189 und 2005-R0190 (Bild aus Ereigniskataster, Erhebung durch Jakob Werren). | Fig.12: Vue sur la pente des événements avec les traces évidentes des événements 2005-R0189 et 2005-R0190 (image du cadastre des événements, enquête de Jakob Werren).

gemacht werden, wann sich wo Hangmuren ereignen. Für die Beurteilung eines Schutzobjektes ist aber der Bereich der massgebenden Gefährdung im Hang über die Fliesswegmodellierung klar begrenzt und definiert den Bereich für die Entnahme von Bodenproben.

Folgerungen

Die Steigerung der Rechenleistungen handelsüblicher PC's erlaubte in jüngster Vergangenheit, die physikalischen Fliessprozesse von Hangmuren soweit zu berücksichtigen, dass bei einem vertretbaren Aufwand gute Resultate ohne langwierige Kalibrierprozesse gewonnen werden können,. Voraussetzung ist jedoch nebst einem digitalen Höhenmodell eine gut abgestützte Erhebung der Materialzusammensetzung aus Bodenproben und eine umfassende fachliche Beurteilung der Auslösezone, Ereignisgrösse und deren Jährlichkeit. Der Fliessprozess und die Einwirkungen auf Bauten bezüglich Fliesshöhe, Frontfliessgeschwindigkeit und Oberflächenfliessgeschwindigkeit sind hingegen aus der Modellierung für jeden Bereich erhältlich. Bei entsprechendem Schadenpotential und wenig Erfahrungswerten für die angedachten Szenarien lohnt sich eine entsprechende numerische Beurteilung des Fliess- und Anprallverhaltens.

Verdankung

Speziellen Dank möchte ich den Organisatoren des Feld-Workshops «Gefahrenbeurteilung Hangmuren» des Amtes für Wald des Kantons Bern (Abteilung Naturgefahren) aussprechen, der dieses Frühjahr in Diemtigen BE hätte stattfinden sollen. Obwohl dieser Corona-bedingt bisher nicht durchgeführt werden konnte, lieferte er die Grundlage für die vorgestellte Modellierung.

Literaturverzeichnis

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

MeteoSchweiz (2006). Starkniederschlagsereignis August 2005, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 211, 63 pp.

von Boetticher, A. (2012). Flexible Hangmurenbarrieren: Eine numerische Modellierung des Tragwerks, der Hangmure und der Fluid-Struktur-Interaktion. Diss. TU München, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Statik TU München, Volume 19 (2013-01) ISBN 978-3-8440-1616-1

von Boetticher, A. (2019). Three-dimensional debris flow simulation tool debrisInterMixing. EnviDat. doi:10.16904/envidat.143

Kontaktadresse

Albrecht von Boetticher, dipl. Bauing ETHZ, Dr. Ing.
Staubli, Kurath & Partner AG
Bachmattstrasse 53
8048 Zürich
Telefon +41 43 336 40 50
E-Mail albrecht.vonboetticher@wasserbau.ch

Albrecht von Boetticher

Impressum

Mitteilungsblatt für die Mitglieder des Vereins für Ingenieurbiologie

Heft Nr. 3/2020, 30. Jahrgang
Erscheint viermal jährlich
ISSN 1422-008

Herausgeber / Editeur:
Verein für Ingenieurbiologie
c/o HSR Hochschule für Technik Rapperswil
ILF-Institut für Landschaft und Freiraum
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil
Tel.: +41 55 222 48 97
E-Mail: sekretariat@ingenieurbiologie.ch

Internet-Adresse / Adresse internet:
http://www.ingenieurbiologie.ch

Druck / Impression:
Vögeli AG, Langnau i. E.

Verantwortlicher Redaktor/ Rédacteur responsable:
Christian Rickli
Gebirgshydrologie und Massenbewegungen
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
Tel.: +41 44 739 24 03
E-Mail: christian.rickli@wsl.ch

Redaktionsausschuss / Comité de rédaction:
Roland Scheibli
Tel.: +41 43 259 27 64
E-Mail: roland.scheibli@bd.zh.ch

Röbi Bänziger
Tel.: +41 44 850 11 81
E-Mail: Robert.Baenziger@bk-ing.ch

Monika La Poutré
Tel.: +43 650 8615215
E-Mail: m.stampfer@gmx.at

Lektorat / Lectorat:
Martin Huber
Tel.: + 41 32 671 22 87
E-Mail: martin.huber@bsb-partner.ch

Übersetzungen / Traductions:
Rolf T. Studer
E-Mail: rolf.studer@mail.com

Sekretariat / Secrétariat:
Verein für Ingenieurbiologie
c/o HSR Hochschule für Technik Rapperswil
ILF-Institut für Landschaft und Freiraum
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil
Tel.: +41 55 222 48 97
E-Mail: sekretariat@ingenieurbiologie.ch

Weitere Exemplare dieses Heftes können zum Stückpreis von Fr. 20.– beim Sekretariat bezogen werden.

Wildblumen?
Lassen Sie sich Ihre Fragen be**Antworten.** 044 879 17 19

OHS Otto Hauenstein Samen

Inserate
Annonces

Inseratentarif für Mitteilungsblatt / Tarif d'insertion dans le bulletin
Der vorliegende Tarif ist gültig für eine Ausgabennummer.
Le present tarif comprend l'insertion pour une parution.

1 Seite	Fr. 1125.–	2/3 Seite	Fr. 825.–	1/2 Seite	Fr. 600.–
1/3 Seite	Fr. 450.–	1/4 Seite	Fr. 375.–	1/8 Seite	Fr. 225.–

Separate Werbebeilage beim Versand: 1 A4-Seite Fr. 1000.–
jede weitere A4-Seite Fr. 300.–

Inseratenannahme: Verein für Ingenieurbiologie c/o HSR Hochschule für Technik Rappperswil ILF, Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil, Tel. +41 55 222 48 97, sekretariat@ingenieurbiologie.ch

Link auf der Internetseite des Vereins / Liens sur la page de l'Association:
Fr. 750.– pro Jahr/par an
Oder gratis bei Inseraten im Mitteilungsblatt im Wert von mindestens Fr. 750.– pro Jahr.
Ou gratuit pour des annonces dans le bulletin d'une valeur d'au moins Fr. 750.– par an.

INGENIEURBIOLOGIE
GÉNIE BIOLOGIQUE
INGEGNERIA NATURALISTICA
INSCHENIERA BIOLOGICA

Verein für Ingenieurbiologie
c/o HSR Hochschule für Technik Rapperswil
ILF-Institut für Landschaft und Freiraum
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rappenwil
Tel.: +41 55 222 48 97
sekretariat@ingenieurbiologie.ch

E F I B

Europäische Föderation für Ingenieurbiologie
Federazione Europea l'Ingegn Naturallstica
Europ. Federation for Soil Bioengineering
Fedetaclon Europea de Ingenierta def Palufe

Giovanni de Cesare
EPFL ENAC IIC PL-LCH
GC A3 495 (Bâtiment GC)
Station 18, CH-1015 Lausanne
Tel. +41 21 69 32517
Mail: giovanni.decesare@epfl.ch

Nächste Ausgaben
Prochaines éditions

Redaktionsschluss	Thema	Redaktion
13. September 2020	Monitoring und Wirkungskontrolle	Röbi Bänziger
15. Januar 2021	Exkursionsführer (Hochlagenbegrünung)	Christian Rickli
15. April 2021	Innovative Arbeitsmittel und neue Tools	Roland Scheibli
23. Juli 2021	Biodiversität und Pflanzenverwendung	Monika Stampfer

Fachbeiträge sind gemäss den redaktionellen Richtlinien zu verfassen und bis zum Redaktionsschluss dem/der zuständigen Redaktor/in einzureichen.