

Verbesserung der Hangmurenbeurteilung

Autor(en): **Wyss, Roland / Gruner, Ueli / Liniger, Markus**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology**

Band (Jahr): **23 (2018)**

Heft 1

PDF erstellt am: **23.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-832392>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Verbesserung der Hangmurenbeurteilung

Roland Wyss¹, Ueli Gruner², Markus Liniger³

Stichworte: Naturgefahren, Hangmuren, Gefahrenbeurteilung, Gefahrenkarte

Zusammenfassung

Spontane Rutschungen und Hangmuren werden heute oft auf der Basis der AGN-Methodik von 2004 beurteilt. Die Vollzugshilfe «Schutz vor Massenbewegungsgefahren» (BAFU 2016) erläutert, wie mit spontanen Rutschungen und Hangmuren umgegangen wird. Im Anhang der Vollzugshilfe werden zwei Methoden zur Bestimmung der Eintretenswahrscheinlichkeiten dargelegt. Diejenige mit dem Flussdiagramm basiert auf der erwähnten AGN-Methodik und wurde im Jahr 2004 von der AGN im Auftrag des Bundes entwickelt. In einem weiteren Auftrag des BAFU war durch eine Projektgruppe der AGN die Frage der Verbesserung der Beurteilungsmethodik zu untersuchen.

Unter den prozessbeeinflussenden Faktoren von Hangmuren (Grunddisposition und spezifische Förderfaktoren) werden die geologischen und die hydrogeologischen Faktoren oft noch zu wenig gut berücksichtigt. Namentlich sind dies die Lithologien der Fest- und der Lockergesteine sowie deren hydrogeologische Disposition (Wasserführung, Durchlässigkeit und Diskontinuitäten in Fest- und Lockergesteinen und die Reaktion der Wasserführung auf lang anhaltende oder kurzzeitige Starkniederschläge). Entsprechend stand die vertiefte Feldansprache und -beurteilung im Zentrum der durchgeführten Arbeiten. Diese erforderten eine gründliche Vorbereitung unter Einbezug aller verfügbaren Geodaten (Karten, Berichte, DTM, Luftbilder, Bodendaten etc.).

In neun geologisch unterschiedlichen Testgebieten mit Hangmurenereignissen (OMM, Gurnigel-Flysch, Lias, Helvetikum, Drusberg-Decke, Stad-Mergel, Jura, USM, Nordpenninischer Flysch (Bündnerschiefer) wurden systematische Erhebungen zur

Geologie, Hydrogeologie und Lockergesteinseigenschaften (Silt-/Tongehalt, Plastizität) durchgeführt. Es ergibt sich eine klare Korrelation zwischen erkannten Hangmuren-Anrissgebieten und hydrogeologischen Förderfaktoren wie wasserführende Felsschichten im Untergrund, Stauhorizonte im Felsuntergrund, Hinweise auf wasserführende Lockergesteinsschichten bzw. -rinnen.

Die Korrelation von Hangmuren-Anrissgebieten mit den Silt-/Tongehalten ist jedoch nicht systematisch. Teilweise gibt es auch Anrissgebiete mit niedrigen Silt-/ Tongehalten, wobei dort aber andere Förderfaktoren eine Rolle spielen.

Die lokale, direkte Erkundung des geologischen-hydrogeologischen Untergrundes im Feld ist ein wichtiges Element bei der Hangmurenbeurteilung. Verwitterungsprozesse und die glaziale Überprägung liefern Angaben zu wichtigen Beurteilungsparmetern wie Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht, Vorhandensein von Durchlässigkeitsdiskontinuitäten und Lage des Felsuntergrundes. Die Abschätzung des Einflusses der Korngrösse bzw. der Plastizität des mobilisierten Materials auf die Auslaufstrecke («run-out») und die Fließgeschwindigkeit einer Hangmure ist grundsätzlich möglich. Sie bedarf aber detaillierterer Abklärungen.

Aus der Sicht der Praxis sind gebietsspezifische Erhebungen der Silt-/Tongehalte und der Plastizität auf der Stufe Gefahrenkarte nicht zwingend. Die Sondierungen mit Bohrstock erlauben aber kostengünstig eine bessere Kenntnis der Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht und damit oft eine Abstufung der Gefährdung in den Ausbruchgebieten, z.B. bei der Gefahrenbeurteilung oder für Objektschutzgutachten.

¹ Dr. Roland Wyss GmbH, Zürcherstrasse 105, 8500 Frauenfeld; wyss@rwgeo.ch

² Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern; ueli.gruner@k-h.ch

³ Geotest AG, Grisigenstrasse 6, 6048 Horw; markus.liniger@geotest.ch

Resumé

Les glissements de terrain spontanés et les coulées boueuses sont aujourd'hui souvent analysés sur la base de la méthodologie AGN de 2004. L'aide à l'exécution «Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain» (OFEV 2016) explique comment aborder et gérer ces deux processus. En annexe à cette aide à l'exécution, deux méthodes de détermination des probabilités d'occurrence sont présentées. Celle avec l'organigramme est basée sur la méthodologie AGN mentionnée et a été développée en 2004 par l'AGN sur mandat de la Confédération. Dans le cadre d'un autre mandat de l'OFEV, un groupe de projet de l'AGN a récemment examiné les possibilités d'améliorer les méthodes d'évaluation de ces processus.

Parmi les facteurs influençant le processus de coulée de boue (disposition de base et facteurs aggravants spécifiques), les facteurs géologiques et hydrogéologiques sont souvent négligés. Il s'agit en particulier des caractéristiques lithologiques des roches et des terrains meubles, de même que de leur disposition hydrogéologique (alimentation en eau, perméabilité et discontinuités dans le rocher et terrains meubles, réaction des écoulements aux précipitations intenses de longue durée ou ponctuelles).

En conséquence, l'analyse de terrain détaillée et une évaluation approfondie ont été au cœur des travaux effectués dans la présente étude. Celles-ci ont nécessité une préparation poussée, en intégrant notamment toutes les géodonnées disponibles (cartes, rapports, MNT, photos aériennes, données sur les sols, etc.).

Neuf zones présentant des événements de coulée boueuse et caractérisées par des contextes géologiques variables (OMM, Flysch du Gurnigel, Lias des Préalpes, Helvétique [nappe du Drusberg, Marnes de Stad], Jura, USM, Flysch nord-pennique [Schistes lustrés]) ont été analysées. Une prospection systématique des conditions géologiques et hydrogéologiques de même que des propriétés des terrains meubles (teneur en limons et argiles, plasticité) y a été effectuée. Une corrélation claire peut être établie entre les zones de départ des coulées de boue reconnues et les facteurs hydrogéologiques comme la présence de zones perméables ou au contraire d'horizons imperméables dans le sous-sol rocheux, de même que des indices sur l'existence d'horizons perméables ou de conduits dans la couverture meuble.

La corrélation des zones de départ des coulées de boue avec la teneur en limon/argile n'est pas systématique. Dans certains cas, il existe aussi des zones de départ à faible teneur en limon/argile, mais d'autres facteurs aggravants jouent un rôle dans ces cas.

L'exploration locale et directe du sous-sol géolo-

gique-hydrogéologique sur le terrain est un élément important dans l'évaluation du danger lié aux coulées de boue. Les processus d'altération et de surimpression glaciaire fournissent des informations sur des paramètres d'analyse importants, tels que l'épaisseur de la couche mobilisable, la présence de contrastes de perméabilité ou la position du substrat rocheux.

L'estimation de l'influence de la granulométrie ou de la plasticité du matériau mobilisé sur la zone d'atteinte («run-out») et la vitesse d'écoulement d'une coulée de boue est en principe possible, mais nécessite des analyses plus détaillées.

Du point de vue de la pratique, les analyses, menées à l'échelle d'un secteur d'étude, de la teneur limon/argile et de la plasticité ne sont pas obligatoires au niveau de la carte des dangers. Les sondages à la tarière permettent toutefois, à moindres coûts, une meilleure connaissance de l'épaisseur de la couche mobilisable et donc souvent une gradation de la vulnérabilité dans les zones de départ, par exemple dans l'évaluation des dangers ou pour la planification de mesures de protection objet.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Bearbeitung von Naturgefahren ist in der Schweiz weit fortgeschritten. Insbesondere aber bei der Beurteilung von Hangmuren und spontanen Rutschungen bestehen oft Unsicherheiten, was in der Umsetzung in Gefahrenkarten und in der Raum- respektive in der Ortsplanung Folgen haben kann, da entsprechende Flächen zu gross oder zu ungenau ausgeschieden werden.

Hangmuren und spontane Rutschungen werden heute oft auf der Basis der AGN-Methodik von 2004 (AGN 2004) beurteilt. Dies ist eine pragmatische Methode, welche zu einer gut nachvollziehbaren Bestimmung der Anrissgebiete führt. Die Vollzugshilfe «Schutz vor Massenbewegungsgefahren» (BAFU 2016) erläutert, wie mit spontanen Rutschungen und Hangmuren im Sinn des eidgenössischen Waldgesetzes umgegangen wird. Im Anhang der Vollzugshilfe werden zwei Methoden zur Bestimmung der Eintre-

tenswahrscheinlichkeiten dargelegt. Diejenige mit dem Flussdiagramm basiert auf der AGN-Methodik aus dem Jahr 2004 und wurde von der AGN im Auftrag des ehemaligen Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG entwickelt. Die Methode wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU weiterentwickelt und zusätzliche Erhebungen des Lockergesteins wurden miteinbezogen.

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

- Es entstehen oft zu grosse Gefahrenflächen (vor allem blaue Gefahrenstufe), obwohl die Ereignisse zeigen, dass innerhalb der Flächen sehr wohl grosse Unterschiede auftreten.
- Die Methode macht nur Aussagen zum Ort von möglichen Ausbrüchen, nicht aber zu den Intensitäten im Transit- und im Auslaufbereich.
- Die Auslaufbereiche der Prozesse und damit der Prozessraum kann mit der AGN-Methode nicht abgegrenzt werden.

Die Verbesserung der Beurteilungsmethodik ist ein Ziel des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und der verantwortlichen Naturgefahrenfachleute.

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

Ausgangspunkt des Projektes war die Frage, welche Verbesserungen die Feldansprache für spätere Abschätzungen oder Modellrechnungen liefern kann. Dabei war die bestehende Methodik für die Aufnahme von spontanen Rutschungen und Hangmuren der Eid-

genössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) zu berücksichtigen. Weiter sollte eine am GEOLEP der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) neu entwickelte Feldmethode zur Bestimmung der Plastizität von Lockergesteinen getestet werden.

Die erweiterte Methodik der WSL zur Aufnahme von Hangmuren und spontanen Rutschungen im Gelände wird zu einem späteren Zeitpunkt durch die WSL vorgestellt, die Resultate zur Erprobung der GEOLEP-Methode finden sich in einem separaten Artikel in diesem Bulletin (Boll-Bilgot & Parriaux 2018).

In der Projektgruppe der AGN haben folgende Personen mitgewirkt: Ueli Gruner, Markus Liniger, Séverine Boll-Bilgot, Aurèle Parriaux und Roland Wyss als Leiter und Koordinator der Projektgruppe. Die Arbeiten wurden zwischen 2013 und 2016 durchgeführt.

1.2 Definitionen

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

Hangmuren

Hangmuren entstehen durch hohe Porenwasserdrücke im Lockergesteinsuntergrund. Durch Wasserzufuhr aus dem Gebirge 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 besser durchlässigen Einheiten zwischen schlechter durchlässigen Schichten (Fig. 1).

Das mobilisierte Material bewegt sich weitgehend aufgelöst, d.h. als wassergesättigte oder übersättigte turbulente Masse aus Lockermaterial, Boden und Bewuchs. Hangmuren können hohe Geschwindigkeiten (bis zu 15 m/s) erreichen und dadurch eine grosse Ausdehnung 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 der Rutschkörper mehr oder weniger kompakt als zusammenhängende Masse ab und überfährt das Vorland. Die Bewegungen sind eher langsam. Dabei kommt es an der Front zu Aufstauungen. Bei hohem Wassergehalt oder Zutritt von Fremdwasser ist aber auch ein hangmurenartiger, schnellerer Abgang möglich. Im englischen Sprachgebrauch wird auch zwischen «first move» (Initialprozess, spontane Rutschung) und «second move» (Ausbreitungsprozess, Hangmure) unterschieden (s. auch BAFU 2016).

2 Die Beurteilung von Hangmuren und spontanen Rutschungen

2.1 Grundsätze

Grundsätzlich basieren die Gefahrenbeurteilungen in der Schweiz auf drei Standbeinen:

- Historische Ereignisse, welche im sogenannten Naturereigniskataster zusammengefasst werden.



Fig. 1: Bergwasser- oder Hangwasserzutritte hinterlassen Löcher auf der Gleitfläche im Anrissgebiet (verwitterte Mergel) der Hangmure (Schwellbrunn; Foto: B. Stricker).

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

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

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

2.2 Wichtige prozessbeeinflussende Faktoren

Die Entstehung von Hangmuren oder spontanen Rutschungen wird im Wesentlichen durch die Grunddisposition und durch die variable Disposition begünstigt:

Bei der Grunddisposition sind die Hangneigung und die physikalischen Eigenschaften des Lockergesteins die massgebenden, pro-

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

- Lokale topografische und hydrologische Verhältnisse,
- spezielle lokale geologische und hydrogeologische Verhältnisse.

Bei der variablen Disposition bildet der Wassergehalt im Untergrund den massgebenden, prozessbeeinflussenden Faktor. Die variable Disposition kann durch weitere spezifische Förderfaktoren beeinflusst werden. Wichtigste Faktoren sind dabei die biologischen und anthropogenen Einflüsse.

Als eigentlicher Auslöser wirken letztlich Starkniederschläge. Zur Hangmure oder zur spontanen Rutschung kommt es dann, wenn die variable Disposition und die auslösenden Niederschläge zusammen den kritischen Wert für einen Grundbruch oder einen Scherbruch überschreiten.

Vereinfachend kann gesagt werden, dass die Entstehung einer Hangmure im Wesentlichen durch die Hangneigung, die geologischen Verhältnisse, durch das im Untergrund vorhandene Wasser sowie den Niederschlag bestimmt wird.

Die kritische Hangneigung

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

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

Die spezifischen Förderfaktoren

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

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

2.3 Geologische und hydrogeologische Förderfaktoren

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

In der Karte der Phänomene werden nur Spuren von Prozessen dokumentiert. Für

wirklich aussagekräftige Beurteilungen müssen geologisch relevante Informationen zwingend berücksichtigt werden.

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

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

Im Rahmen der Arbeiten wurden Tests in Pilotgebieten gemacht. Getestet wurden einfache, kostengünstige Felduntersuchungen mit der GEOLEP-Methode der EPFL Lausanne (Boll-Bilgot & Parriaux 2018). Diese Tests wurden mit Handsondierungen ausgeführt. Die Felduntersuchungen sollen zu einer Verbesserung der Aussagen über den geologischen Untergrund (Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht, Heterogenität und Aufbau der Lockergesteinsschichten, Wasserführung) beitragen und damit zu einer besseren Aussage der Disposition und der zu erwartenden Intensitäten führen.

2.4 Ziel der Untersuchungen

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Verbesserung der Methode bezüglich der Aus-

sagekraft zu Ausbruchgebieten, Ausbruchhäufigkeiten und Intensitäten (Mächtigkeit der mobilisierbaren Masse) der Prozesse «spontane Rutschung» und «Hangmure»:

- Aufzeigen des Einflusses der Geologie/ Hydrogeologie auf die Prozesse.
- Verbesserung der Methodik zur Beurteilung und Differenzierung der Ausbruchgebiete von spontanen Rutschungen und Hangmuren unter Berücksichtigung der geologischen Gegebenheiten.
- Verbesserung der Methodik zur Beurteilung der Häufigkeit der Ausbrüche unter Berücksichtigung der geologischen Förderfaktoren.
- Test einer einfachen Felduntersuchungsmethode in Testgebieten, welche kostengünstig mehr geologische Informationen zur Beurteilung liefern kann. Damit sollen neben den oben aufgeführten Punkten auch eine Verbesserung der Aussagen zur

Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht und allenfalls Aussagen zum möglichen Fliessverhalten resultieren.

3 Felduntersuchungen

3.1 Untersuchte Gebiete

Es wurden in 9 Gebieten vertiefte Untersuchungen durchgeführt (Tab. 1 und Fig. 2). Kriterien für die Auswahl eines Gebietes waren: Möglichst aktuelle Hangmurenereignisse, Verfügbarkeit von Daten und unterschiedliche geologisch-hydrogeologische Disposition.

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

Gebiet	Geologie / Tektonik	Bearbeiter	Gefahrenkarte	Methodentest
Trubschachen	Mittelländische, flachliegende Molasse, OMM	Kellerhals+Haefeli AG	grösster Teil nein	flächig
Eltschingera	Préalpes, Gurnigel-Flysch	Kellerhals+Haefeli AG, S. Boll-Bilgot	nein (Gefahrenhinweiskarte Rutschungen und Hangmuren)	flächig
Alpnachstad	Helvetikum, Drusberg-Decke, Stad-Mergel	Geotest AG	ja	lokal, Detailtest
Ennetbürgen	Helvetikum, Drusberg-Decke, Stad-Mergel	Geotest AG, z.T. A. Parriaux, S. Boll-Bilgot	ja	lokal, Detailtest
Les Avants	Préalpes: Lias	A. Parriaux, S. Boll-Bilgot	ja	flächig
Travers	Jura	A. Parriaux, S. Boll-Bilgot	ja	flächig
Schwellbrunn	Subalpine Molasse, USM	Dr. Roland Wyss GmbH, S. Boll-Bilgot	nein	flächig
Altstätten	Subalpine Molasse, USM	Dr. Roland Wyss GmbH	ja	lokal, Detailtest
St. Antönien	Nordpenninischer Flysch, Bündnerschiefer	WSL, Dr. Roland Wyss GmbH	nein	lokal, Detailtest

Tab. 1: Untersuchungsgebiete. (Methodentest: siehe Erläuterungen im Text).

sungen in begrenztem lokalem Rahmen versucht, eine Erklärung zu finden, wieso im gleichen Hang an einer Stelle eine Hangmure ausbrach, daneben aber nicht. Die Interpretation der geologischen Feldaufnahmen und der Plastizitätsanalysen erfolgte unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Geodaten.

3.2 Durchgeführte Untersuchungen

Vorgängig zu den Feldarbeiten wurden für die einzelnen Gebiete die bestehenden geologischen und hydrogeologischen Karten und Berichte, Luftbilder, digitalen Terrainmodelle und weitere Unterlagen gesichtet und die Informationen bezüglich Hangmuren beurteilt.

Im Feld selber erfolgte eine detaillierte Geländebegehung mit der Erhebung der geologischen, hydrogeologischen, geomorphologischen, hydrologischen, boden- und vegetationskundlichen Daten sowie der anthropogenen Faktoren gemäss Aufnahmeformular der WSL. Dabei wurden die Lockergesteinsbede-

ckung, der Felsuntergrund und die Verwitterungszone beurteilt. Für die Untersuchung der Lockergesteinsbedeckung erwies sich die Verwendung des Bohrstocks als ausgesprochen effizientes Werkzeug. Zusätzlich konnten mit dem Bohrstock Proben für die Bestimmung des Silt-/Tongehaltes und der Plastizität im Feldlabor gewonnen werden.

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

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

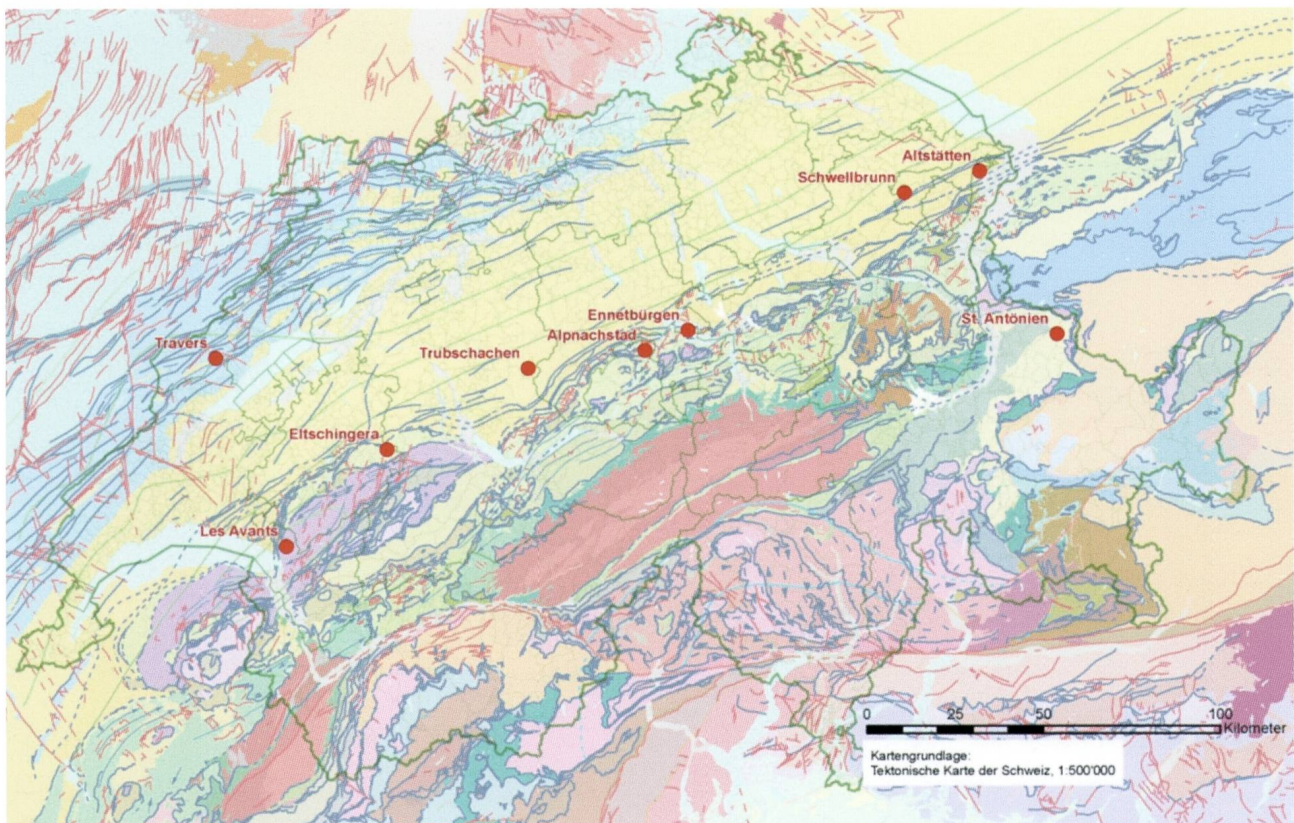


Fig. 2: Lage der untersuchten Gebiete.

- Interpretation: Beurteilung der Proben bezüglich Silt-/Tongehalt versus Plastizitätsindex und Hangneigung
- Vergleich der Ergebnisse mit den geologisch/hydrogeologischen und geomorphologischen Randbedingungen
- Zusammenfassung: Fazit für das jeweilige Testgebiet (siehe auch Tabelle 2)

3.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Die Befunde in den einzelnen Gebieten lassen sich wie folgt zusammenfassen (Tab. 2):

In den Gebieten mit flächiger Fragestellung sind die statistischen Aussagen besser, da auch eine höhere Probenzahl vorhanden ist.

In den Gebieten mit lokaler Perspektive konnte die Sensitivität der Methode getestet werden. In diesen Gebieten stand die Fragestellung im Vordergrund, welche Verbesserung die Methode in der Hangmuren-Ausbruchbeurteilung bringt. Das Gebiet Alpnachstad ist wegen seiner Homogenität nicht relevant, wurde aber vor allem wegen bereits existierenden Berech-

nungen für die Einwirkungen (Gebäudestatik, erste RAMMS-Modellierungen; Egli 2009, 2011; Loup et al. 2012) gewählt, um in einem späteren Arbeitsschritt die Murgangmodellierungen unabhängig prüfen zu können.

3.4 Gebiete mit flächiger Fragestellung

Trubschachen (OMM/OSM mit Hanglehm/Hangschutt) weist eine grosse Anzahl Ereignisse auf. Die Hangneigungen sind mittel bis steil (25–40°), die gemessenen Plastizitätswerte sind meist hoch (22–27%). Mit 48–96% (in 80% der Proben >70%) waren die Silt-/Tonanteile ebenfalls hoch. Die meisten Anrisse bzw. Hangmuren waren bei Hangneigungen grösser als 25° zu verzeichnen, ein kleinerer Teil aber auch schon bei Hangneigungen zwischen 18 und 25°. Generell waren Anrisse bei hohen Silt-/Tongehalten zu verzeichnen. An einigen Stellen wurden allerdings geringe Plastizitätswerte (<20%) und zudem niedrige Silt-/Tonanteile ermittelt, dies selbst bei Hangneigungen von über 25°. Dank den Bohrstockaufnahmen konnte gezeigt werden, dass es sich dabei um Moränenmaterial mit einem erhöhten Sandanteil handelt.

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

(*) Probe 2 Ennetbürgen: Eindeutig hydrogeologischer Einfluss.

Tab. 2: Zusammenstellung der wichtigsten Parameter der verschiedenen Untersuchungsgebiete.

In **Eltschingera** (Préalpes, Flysch) dominieren mittlere Hangneigungen ($20\text{--}30^\circ$), die gemessenen Plastizitätswerte sind hoch (30%). Die meisten Hangmuren traten bei geringer Mächtigkeit der Deckschicht auf.

Les Avants (Préalpes, Lias) zeichnet sich durch mittlere Hangneigungen ($25\text{--}30^\circ$) und geringe Plastizitätswerte (7%) aus, die gut mit den Silt-/Tongehalten korrelieren.

Die Ereignisse in **Travers** (Jura, Molasse) treten bei sehr geringen Hangneigungen auf ($10\text{--}15^\circ$). Die Plastizitätswerte liegen im mittleren Bereich (15%). Vom Typ her dürfte es sich eher um spontane Rutschungen im Sinne von AGN 2004, also um Teilreaktivie-

rungen oder murgangartige Verflüssigungen von grossräumigen permanenten Rutschungen und nicht um eigentliche Hangmuren handeln.

In Schwellbrunn (Subalpine Molasse mit Hangschutt) dominieren mittlere bis grosse Hangneigungen ($24\text{--}28^\circ$) und mittlere Plastizitätswerte (13%).

3.5 Gebiete mit lokaler Fragestellung

Alpnachstad (Helvetikum, Stad-Mergel mit Moränenbedeckung) weist mittlere Hangneigungen von $25\text{--}30^\circ$ auf. Die gemessenen Plastizitäten sind ebenfalls im mittleren Bereich (22%). Alle Abgänge erfolgten auf Fels. Hang-

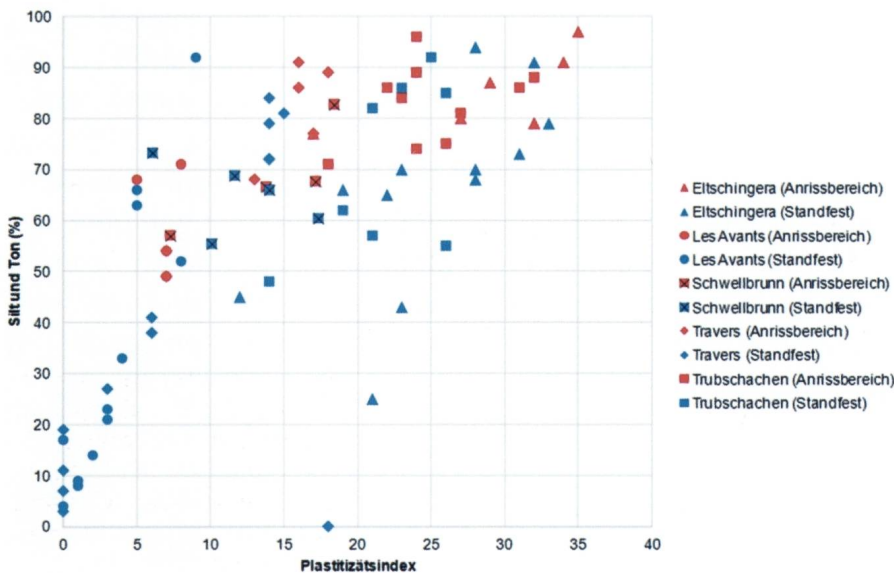


Fig. 3: Gebiete mit flächiger Fragestellung: Diagramm Plastizitätsindex versus Silt- und Tongehalt. Rot: Probe aus Anrissbereich, Blau: Probe aus dem standfesten Untergrund.

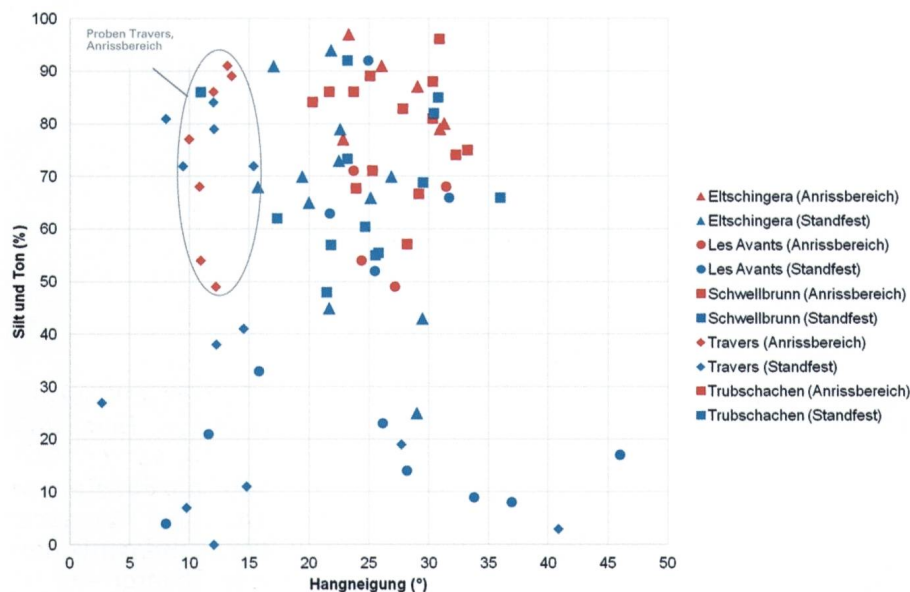


Fig. 4: Gebiete mit flächiger Fragestellung: Diagramm Hangneigung versus Silt- und Tongehalt der Proben. Rot: Probe aus Anrissbereich, Blau: Probe aus dem standfesten Untergrund.

muren prallten hier 2005 an Häuser. Mit ersten RAMMS-Modellierungen und mit den Schäden über die Gebäudestatik existieren hier bereits unabhängige Abschätzungen der Murgangenergien (Egli 2009, 2011; Loup et al. 2012).

In **Ennetbürgen** (Helvetikum, Stad-Mergel mit Moränenbedeckung) fanden die Hangmurenabgänge vorwiegend bei mittleren (24–30°) und Lockermaterialmächtigkeit ≥ 0.5 m, in einem Fall mit hydrogeologischem Förderfaktor auch bei grossen Hangneigungen und sehr geringer Überdeckung (0.2 m) statt. Die gemessenen Plastizitätswerte sind relativ niedrig (7%). Die Bewegungen erfolgten auf Fels oder innerhalb der Moräne. Die

Probe 2 fällt aus dem Rahmen. Hier war ein starker Kluftwasseraustritt aus dem Felsuntergrund zu beobachten.

In **Altstätten** (Subalpine Molasse mit Moräne) erfolgten Ereignisse bei grossen Hangneigungen und mittleren Plastizitäten.

In **St. Antönien** (Bündnerschiefer) dominieren bei mittleren Hangneigungen geringe Plastizitäten.

3.6 Zusammenfassung der Resultate

Bezüglich Hangneigungen und Plastizitäten weisen die untersuchten Gebiete heterogene Charakteristika auf. Die Rutschungen in Tra-

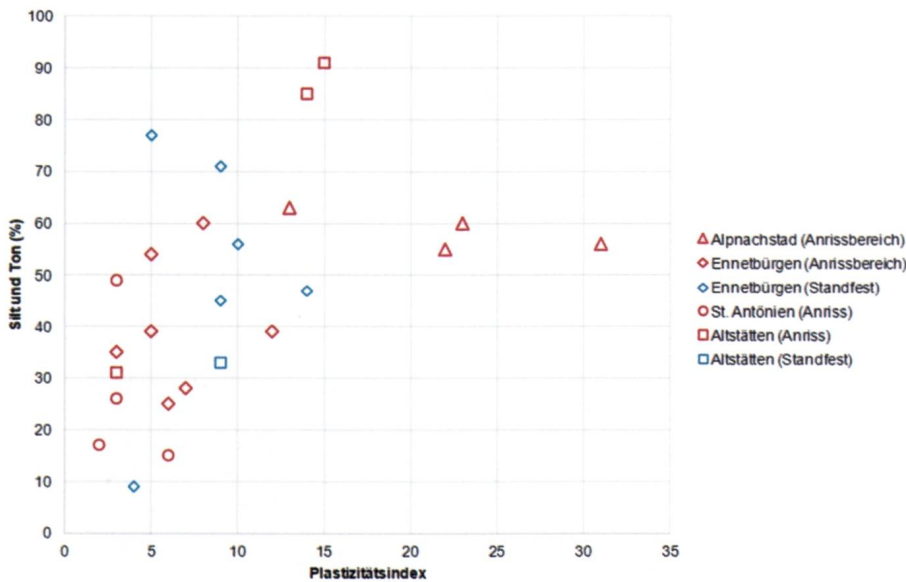


Fig. 5: Gebiete mit lokaler Fragestellung: Diagramm Plastizitätsindex versus Silt- und Tongehalt. Rot: Probe aus Anrissbereich, Blau: Probe aus dem standfesten Untergrund.

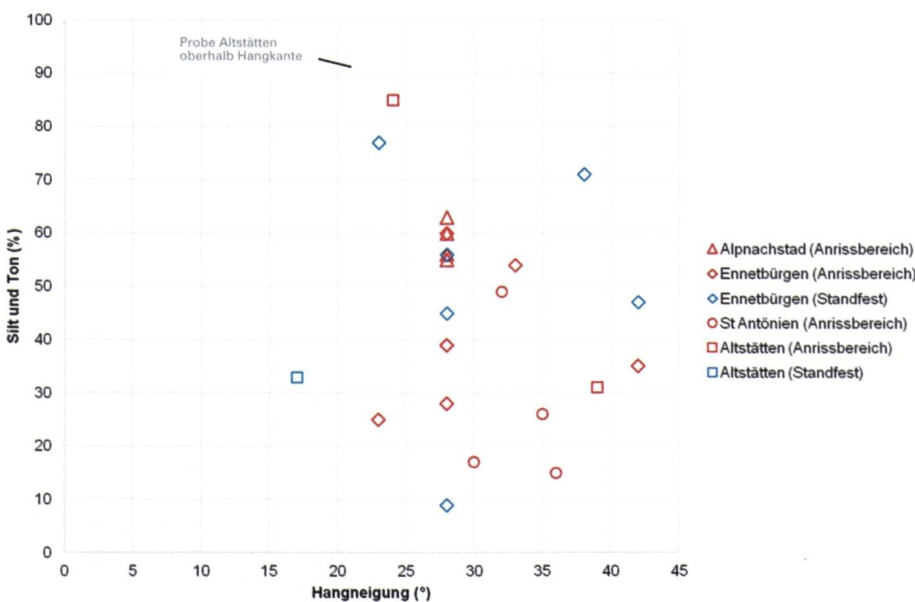


Fig. 6: Gebiete mit lokaler Fragestellung: Diagramm Hangneigung versus Silt- und Tongehalt der Proben. Rot: Probe aus Anrissbereich, Blau: Probe aus dem standfesten Untergrund.

vers fallen bezüglich Hangneigungen aus dem Rahmen. Die geologischen und hydrogeologischen Bedingungen sind hier aber auch deutlich anders als bei den anderen Testgebieten. Allen untersuchten Gebieten gemeinsam sind hydrogeologische Förderfaktoren wie:

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

Über alle Gebiete zusammen betrachtet ergibt sich erwartungsgemäss eine Korrelation zwischen dem Plastizitätsindex und dem Silt-/Tongehalt der gemessenen Proben (Fig. 3 und Fig. 5). Anrissbereiche gibt es, für jedes Gebiet gesondert betrachtet, vorwiegend bei Standorten mit hohen Plastizitäten und entsprechend hohen Silt-/Tongehalten. Die Grenzwerte variieren jedoch mit den geologischen Verhältnissen, wie nicht anders zu erwarten war. Die Hangneigung und die spezifischen Förderfaktoren spielen jeweils eine entscheidende Rolle. Das Gesamtsystem ist nicht nur durch zwei Parameter bestimmbar.

Zwischen der Hangneigung und den Silt-/Tongehalten ist sowohl in Gebieten mit flächiger als auch in Gebieten mit lokaler Fragestellung keine Korrelation zu erkennen (Fig. 4 und Fig. 6). Ohne Einbezug der Daten von Travers (spontane Rutschung bei sehr geringer Hangneigung, Fig. 4) gibt es, mit einer Ausnahme, jedoch keine Anrissbereiche in Gebieten mit Hangneigungen kleiner als 20° und Silt-/Tongehalten kleiner als 50%. Die Ausnahme (Altstätten) befindet sich oberhalb einer Hangkante (Fig. 6).

Generell kann festgehalten werden, dass vergleichsweise höhere Plastizitäten auch eine erhöhte Tendenz zu Hangmuren zur Folge haben. Eine allgemeine Korrelation zwi-

schen Plastizität und Anriss von Hangmuren ist jedoch nicht ersichtlich. Jedes geologisch «einheitliche» Gebiet hat seine eigenen Charakteristiken und muss individuell beurteilt werden. Wir sind jedoch der Auffassung, dass für geologisch einheitliche Gebiete eine Korrelation zwischen Plastizität und Hangmurenrisiko grundsätzlich möglich ist. Dies ist jedoch mit einer grösseren Datenmenge noch zu erhärten.

Am Beispiel Trubschachen mit einem recht homogenen Aufbau des Untergrundes konnte gezeigt werden, dass eine differenzierte Beurteilung im Feld auch eine differenzierte Gefahrenbeurteilung ermöglicht: Bei vielen Talflanken mit einer Hangneigung über dem kritischen Wert von 25° waren die Plastizitäts- und Silt-/Tongehalte jeweils hoch (\rightarrow Hanglehm), was eine blaue Gefahrenstufe (HM5) ergeben würde. Dort hingegen, wo – ebenfalls bei Talflanken von $>25^\circ$ – die Plastizitäts- und Silt-/Tongehalte relativ niedrig waren (sandige Moräne), wäre die Ausscheidung eines gelben Gefahrenbereichs möglich.

4 Beurteilung der Hangmurengefährdung

4.1 Disposition und Ausbruchgebiet

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 der vorliegenden sind hilfreich für die bessere

Erkennung und Berücksichtigung von Grunddisposition und Förderfaktoren.

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

4.2 Transit- und Ablagerungsbereich

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

Die Schwierigkeit in der Praxis besteht darin, die Eingabeparameter für die Modellrechnung zu fixieren. Hier sehen wir die grosse Chance der Methode GEOLEP. Die Methode ermöglicht mit relativ bescheidenem Aufwand die Bestimmung des Plastizitätsindex und des Kornanteils der Silt- und Tonfraktion. Die Korngrösse bzw. die Plastizität des mobilisierten Materials haben eine Auswirkung auf die Auslaufstrecke («run-out») einer Hangmure. Diesbezüglich wurden jedoch bisher keine systematischen Untersuchungen durchgeführt. Diese beiden Parameter lassen sich mit der Methode GEOLEP mit geringem Aufwand bestimmen (ca. 5 bis 7 Proben pro Tag, Probenahme und Auswertung) und daraus die Kohäsion ableiten. Letztere ist einer der wichtigen und bisher nur schwer bestimmbaren Faktoren für die Hangmurenmodellierung. Es muss jedoch noch aufgezeigt werden, ob und in welchem Ausmass diese Methode zu besseren Eingabeparametern für die Modellierungen führt. Grundsätzlich ermöglicht die Anwendung der Methode GEOLEP eine Objektivierung von Teilen der Feldbeobachtungen.

4.3 Beurteilung der Ausbruchshäufigkeit

Mit der untersuchten Methode (Bohrstock, GEOLEP) kann keine signifikante Verbesserung der Beurteilung der Hangmuren-Häufigkeit erreicht werden. Diese ist primär abhängig von der Eintretenswahrscheinlichkeit von Starkniederschlägen, der Hangneigung und dem Einfluss von Förderfaktoren.

5 Fazit für die Praxis

Verschiedene Faktoren begünstigen die Entstehung von Hangmuren. Der Einfluss dieser Förderfaktoren ist fallweise zu prüfen. Grosses Gewicht haben die Präsenz aktiver oder alter Massenbewegungen, die Plastizität, die Korngrössenverteilung, die Landnutzung und die potenziellen Wassereinflüsse (Sättigung des Lockergesteins, Druck, Strömungs-

kraft). Für die Gefahrenbeurteilung stellt sich deshalb die Frage, auf welcher Stufe zusätzliche Untersuchungen zur Quantifizierung der Faktoren notwendig sind.

Vertiefte, gebietsspezifische Erhebungen und Auswertungen bezüglich der Plastizität und der Korngrössenverteilung sind aus der Sicht des AGN-Projektteams auf der Stufe Gefahrenkarte nicht zwingend beziehungsweise nur fallspezifisch angebracht. Wir empfehlen jedoch den Einsatz der Methode in Abhängigkeit der Bearbeitungstiefe und des Risikos. Bei grossem Schadenpotenzial ist die Methode GEOLEP nach unserer Auffassung von Nutzen. Im Rahmen von Einzonungsbegehren bisher unverbauter Gebiete und bei der Erstellung von Objektschutzgutachten (Dimensionierung von Schutzmassnahmen) verbessert die Probenahme mit Bohrstock und die Plastizitätsanalyse (zusammen mit einer Korngrössenbestimmung) die Beurteilung der Hangmurendisposition deutlich. Der Einsatz des Geräts verbessert zudem die Charakterisierung der Lockergesteinsbedeckung und die Abschätzung deren Mächtigkeit.

Die Methode ist mit 1 bis 2 Tagen Aufwand erlernbar und einfach durchführbar. Die ganze Ausrüstung kostet ca. CHF 1000.–. Der Aufwand für 5 bis 7 Proben (Probenahme und Labor) beträgt ca. 1 Tag.

Die Verbesserung der Berechnung von Hangmurenausbreitung und Hangmurenenergien ist noch vertieft zu untersuchen. Wir sehen hier aber ein Anwendungsgebiet für die Methode GEOLEP. Sollten sich die oben gemachten Aussagen bezüglich Modellinputs bestätigen, so könnte die Methode indirekt ein wichtiges Instrument für die Dimensionierung von Objektschutzmassnahmen werden.

6 Offene Fragen

Die Datendichte bezüglich Plastizitätsmessungen und Korngrössenanalysen in einzelnen Gebieten ist noch ungenügend bzw. zu wenig systematisch. In sanierten Gebieten, insbesondere im Anrissbereich, besteht die Gefahr, dass mit Messungen nicht der gewachsene Untergrund erfasst wurde. Es stellt sich die Frage, wie mit dieser Unsicherheit umgegangen werden soll.

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

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

Die Berücksichtigung der Plastizitätswerte für die Bestimmung der Kohäsion und die Berücksichtigung der Kohäsion für Modellierungen, zum Beispiel mit RAMMS, war nicht Inhalt der durchgeführten Untersuchungen. Dieser Aspekt erscheint dem Projektteam aber als eine interessante Perspektive. Erste Berechnungen aus anderen Studien sind vielversprechend. Die Beispiele Alpnachstad und Ennetbürgen würden sich hierzu eignen, da hier nach Ereignissen Gebäudeschäden dokumentiert sind und im Beispiel Alpnachstad auch schon die Energie der Hangmuren über die Gebäudestatik nachgerechnet wurde (Egli 2009, 2011; Loup et al. 2012).

Verwendete Unterlagen

- AGN 2004: Gefahreinstufung Rutschungen i. w. S. – Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren – Entwurf. Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren, Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie SFIG-GSGI; im Auftrag des (ehem.) Bundesamtes für Wasser und Geologie.
- 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, S. 73-89.
- Egli Engineering 2009: Die Einwirkung von Hangmuren auf Gebäude - Sammlung, Sichtung und Auswahl der Fallbeispiele. Internal report, unpublished, Bundesamt für Umwelt.
- Egli Engineering 2011: Die Einwirkung von Hangmuren auf Gebäude - Analyse, Dokumentation und Interpretation von Schadenfällen. Internal report, unpublished, Bundesamt für Umwelt.
- Loup, B., Egli, T., Stucki, M., Bartelt, P., McArdeell, B. & Baumann, R. 2012: Impacts pressures of hillslope debris flow. Back calculation and simulation (RAMMS). 12th Congress INTERPRAEVENT 2012, Conference Proceedings, p. 225–236.

