



Hochwasser August 2005 – Analyse der Hanginstabilitäten

Daniel Bollinger¹, Ueli Gruner², Roland Wyss³

Schlüsselwörter: Starkniederschläge, Alpen und Voralpen, Gefahrenpotenzial, Rutschungen, Hangmuren, Folgeereignisse, Szenarien

Zusammenfassung

Während der Starkniederschläge zwischen dem 19. und 23. August 2005 kam es im nördlichen Schweizer Alpenraum und in den Voralpen zu verbreiteten Hanginstabilitäten, meist in Form von Hangmuren und spontanen flachgründigen Rutschungen, aber auch in Form von teils grossvolumigen Rutschungen. An ausgewählten mittel- und tiefgründigen Rutschungen wurden Ereignis- und Ursachenanalysen durchgeführt. Die Resultate zeigen, dass dem Potenzial zur Aktivierung bestehender, meist substabiler Rutschungen infolge von lang anhaltenden Starkniederschlägen in der Vergangenheit zu wenig Beachtung geschenkt wurde. Da grossvolumige Rutschungen selbst in abgelegenen Gebieten indirekt durch Bachprozesse (Bachrückstau, Murgänge, Geschiebeeintrag) auf darunter liegende Gebiete einwirken können, stellen sie ein erhebliches, aber auch schwierig abzuschätzendes Gefahrenpotenzial dar. Hangmuren und spontane flachgründige Rutschungen können auch an Hanglagen in Siedlungsnähe entstehen. Wegen ihres spontanen Auftretens und ihres vielfach dynamischen Ablaufs stellen sie dann ein erhebliches Gefahrenpotenzial dar. Oftmals ist deren Entstehung anthropogen beeinflusst.

Résumé

Suite aux fortes précipitations tombées entre le 19 et le 23 août 2005, de nombreuses instabilités de terrain ont eu lieu dans le secteur nord des Alpes suisses ainsi que dans les Préalpes. Principalement, il s'agissait de coulées de boue ainsi que de glissements spontanés peu profonds, mais parfois également de glissements de grande ampleur. Sur un choix de glissements moyennement profonds à profonds, une étude analysant les événements et leurs causes a été réalisée. Les résultats montrent que dans le passé, trop peu d'attention a été accordée au potentiel d'activation de glissements existants (le plus souvent substabilisés) suite à de fortes précipitations persistantes. Même des glissements volumineux de régions isolées peuvent avoir indirectement une influence sur les régions situées en-dessous par des processus liés aux cours d'eau (retenue, laves torrentielles, apport en charriage). Ceux-ci présentent donc un potentiel de danger considérable mais aussi difficile à évaluer. Les coulées de boue ainsi que les glissements spontanés superficiels peuvent également se déclencher dans les versants à proximité de lotissements. En raison de leur apparition spontanée ainsi que de leur déroulement très souvent dynamique, ces deux processus constituent un potentiel de danger considérable. Leur origine est souvent influencée par des facteurs de nature anthropique.

¹ Kanton Schwyz, Amt für Wald und Naturgefahren, Bahnhofstrasse 9, 6430 Schwyz

² Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern

³ Dr. Roland Wyss GmbH, Zürcherstrasse 105, 8500 Frauenfeld





1. Einleitung

Die «Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN» der Schweizerischen Fachgruppe für Ingenieurgeologie SFIG wurde vom Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Gefahrenprävention, zur Unterstützung bei der Auswertung und Beurteilung der während der Starkniederschläge im August 2005 entstandenen Hanginstabilitäten beigezogen.

Im Vordergrund der Auswertungen standen Rutschereignisse in den Kantonen Bern BE, Luzern LU, Nidwalden NW, Obwalden OW, Schwyz SZ, Graubünden GR und Fribourg FR, welche das BAFU im Nachgang des Ereignisses auf der Basis eines standardisierten Erfassungsformulars detailliert dokumentieren liess, um daraus repräsentative Aussagen abzuleiten. Die AGN konzentrierte sich auf die Rutschungen im engeren Sinn, von denen 23 eingehender untersucht wurden. Die Hangmuren waren Gegenstand von Untersuchungen der Eidg. Forschungsanstalt WSL. Ergänzend dazu befasste sich die AGN (Bearbeitung R. Wyss) auch mit geologisch-hydrogeologischen Aspekten der Hangmuren im Raum von St. Antönien. Der Grund dazu lag darin, dass die Hangmuren im Prättigau überwiegend im Wald losbrachen, im Gegensatz zu anderen, speziell untersuchten Gebieten (Ereignisse: Sachseln 1997, Napf 2002, Appenzell 2002, Napf 2005, Entlebuch 2005). Deshalb wurde hier eine besondere geologische Disposition vermutet.

Mit den Auswertungen sollten unter anderem folgende Fragen des BAFU beantwortet werden:

- Welche allgemeinen Aussagen können aus der Übersicht über die tiefgründigen Rutschungen abgeleitet werden?
- Welche Gemeinsamkeiten oder Unterschiede sind bei den tiefgründigen Rutschungen festzustellen?
- Welche Kombinationen von gefährlichen Parametern sind bei Gefahrenbeurteilungen besonders zu beachten?
- War der Kenntnisstand über die Rutschungen vor dem Unwetter 2005 ausreichend?
- Waren früher gemachte Prognosen und Szenarien zu den untersuchten Rutschgebieten richtig?
- Welche Erkenntnisse und Szenarien müsste man heute bei einer Gefahrenbeurteilung zusätzlich berücksichtigen?

2. Meteorologische Randbedingungen im August 2005

Die Niederschläge zwischen dem 19. und 23. August 2005 sind im Bericht Teil 1 zur Ereignisanalyse Hochwasser 2005 (Bezzola & Hegg 2007) ausführlich analysiert. Sie werden hier nicht weiter behandelt. Für Hangstabilitätsfragen entscheidend ist das Faktum, dass über mehrere Tage hinweg anhaltende und ergiebige Regenmengen auf einen bereits durch den Vorregen im August relativ stark durchnässten Untergrund fielen (Fig. 1). Dadurch wurden die Festigkeiten des Untergrundes mancherorts überschritten, was verbreitet zu Rutschungen und Hangmuren führte.

3. Räumliche und zeitliche Verteilung der Hanginstabilitäten

Das Hauptniederschlagsgeschehen konzentrierte sich auf die Vor- sowie die Nordalpen mit den Kantonen FR, BE, OW, LU, NW, SZ, UR, GL, SG und GR. Mit deutlichem Schwerpunkt zwischen dem westlichen Berner Oberland und dem Kanton SZ traten in diesen Gebieten denn auch die meisten Hanginstabilitäten auf. Während lokal erste Hanginstabilitäten bereits am 21. August 2005 eintraten, bildete der 22. August Höhepunkt des Rutschgeschehens. Mit nachlassenden Niederschlägen nahm die Ereignishäufigkeit am 23. August deutlich ab. Ganz vereinzelt traten tiefgründige Rutschungen auch nach der Regenperiode auf.





Hinsichtlich der Volumina der Hanginstabilitäten zeigt sich ein plausibler Zusammenhang zur Niederschlagsdauer und -menge, denn die grossvolumigen Ereignisse traten meist erst gegen Ende der Niederschläge ein: Bei den untersuchten grösseren Ereignissen verdichten sich die Angaben auf den Zeitraum vom Abend des 22. bis in den frühen Morgen des 23. August 2005. Kleinvolumige Ereignisse ($< 1000 \text{ m}^3$, Hangmuren und flachgründige Rutschungen) traten indes schon am 21. August auf. In Einzelfällen trat das Ereignis auch später ein bzw. wurde erst dann festgestellt (Rutschung Wäldli bei Schangnau, 25. August 2005; Rutschung Stalden bei Grindelwald, 3. September 2005).

4. Typologie der Hanginstabilitäten

Hangmuren und spontane flachgründige Rutschungen

Hangmuren und flachgründige Rutschungen sind von der bodenmechanischen Entstehung her unterschiedliche Prozesse. Bei flachgründigen Rutschungen findet ein Scherbruch statt, bei den Hangmuren spielen sich Vorgänge ab, welche einem hydraulischen Grundbruch ähnlich sind. Zwischen den beiden Phänomenen bestehen graduelle Übergänge. Bei der Ereignisanalyse sind solche Unterschiede häufig nicht genau eruierbar, weshalb nachfolgend auf eine Unterscheidung zwischen den beiden Prozessstypen verzichtet wird.

Die WSL hat sich diesen Prozessen im Rahmen der Ereignisanalyse Hochwasser 2005 gewidmet (Raetzo & Rickli 2007), wie schon früher bei den Unwettern von Sachseln 1997, Napf und Appenzell 2002. Im vorliegenden Bericht beschränken wir uns auf die Untersuchungsergebnisse der AGN aus dem Raum St. Antönien sowie auf Folgerungen zu den Resultaten der WSL.

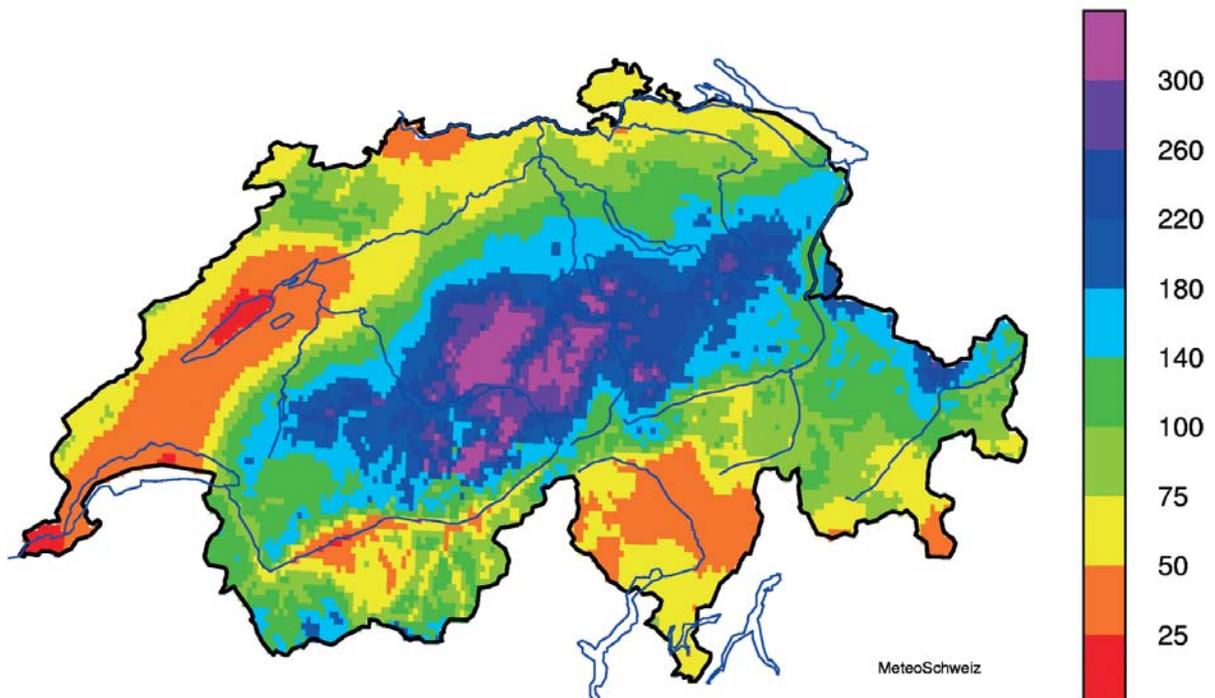


Fig. 1: Kumulierte Regenmengen (mm) zwischen dem 15. und 23. August 2005. Quelle: MeteoSchweiz.



Hangmuren St. Antönien

Von den insgesamt 50 detailliert erfassten Hangmuren liegen die meisten im Wald, dies entgegen den Beobachtungen in anderen Gebieten, wonach Hangmuren häufiger im Wiesland auftreten. Neben der Hangneigung in den Anrisszonen (meist 25-35°) ist die auf den westlichen Teil des untersuchten Perimeters konzentrierte Häufung von Hangmuren auf die geologisch-hydrogeologischen Gegebenheiten zurückzuführen: Der Untergrund besteht dort aus einer wenig Wasser durchlässigen Schichtserie innerhalb der Prättigau-Schiefer. Die Lockergesteinsbedeckung ist mit 0.5-2 m geringmächtig, was einem wichtigen Förderfaktor der Methode AGN zur Beurteilung von Hangmuren und spontanen flachgründigen Rutschungen entspricht (AGN 2004), nämlich einem markanten Durchlässigkeitskontrast in geringer Tiefe. Oberhalb des Gebietes mit den häufigen Rutschungen sind die Gesteine des Felsuntergrundes dagegen besser durchlässig. Das gesamte Gebiet wird in normalen Wetterperioden in Richtung Nordwesten entwässert, was durch entsprechende Quellaustritte angezeigt wird. Während der Starkniederschläge im August 2005 muss indes ein Überlauf des Wassers in südlicher Richtung stattgefunden haben, was die Rutschauslösung im Wald begünstigt haben dürfte. Auf eine periodisch verstärkte Wasserführung könnten auch die Lockergesteinsrutschen am Südhang des SW-Ausläufers des Chüenihorns hindeuten, die meist keine oder nur sehr geringe Wasserführung aufweisen. Die räumliche Häufung der Ereignisse dürfte hydrogeologisch kontrolliert sein, denn anthropogene Förderfaktoren, die in bewirtschafteten Gebieten oft eine wichtige Rolle spielen, entfallen hier.

Folgerungen zu den Resultaten der WSL

- Die Ereignisse Sachseln 1997, Appenzell und Napf 2002 unterscheiden sich von jenen vom August 2005 durch kürzere aber inten-

sivere Niederschläge. Es fand eine weniger tiefe Durchnässung des Lockergesteinsuntergrundes statt, was hauptsächlich zu oberflächlichen Hanginstabilitäten führte (oft war auch nur die Bodenschicht betroffen). Dies hatte tendenziell kleinere Hangmurenvolumina zur Folge, während die Niederschläge im August 2005 zu tiefgründigeren und entsprechend voluminöseren Destabilisierungen führten. Vieles deutet darauf hin, dass bei kurzen und intensiven Regenfällen primär Strömungsdrücke in den obersten Bodenschichten destabilisierend wirken, während sich bei längeren Regenfällen zusätzlich auch Porenwasserdrücke bzw. -überdrücke auswirken. Ob letztere zu einem hydraulischen Grundbruch im engeren Sinn oder zu einem Verlust der Scherfestigkeit führen, kann in der Regel nicht einfach beurteilt werden. Dies erklärt auch die breitere Streuung der Hangneigungen der Anrissbereiche von Hangmuren und flachgründigen Rutschungen beim Unwetter 2005. In beiden Fällen kann auch Suffosion und «Piping» eine Rolle spielen, wovon ein Beispiel in Schwab et al. 2006 geschildert wird. Bei den flachgründigen Hangmuren stellt sich oft auch die Frage nach dem Einfluss vorhandener Makroporen.

- Bei lang anhaltenden Niederschlägen muss vermehrt auch unterirdischen Wasserzuflüssen aus dem Felsuntergrund Rechnung getragen werden (siehe Ereignisse in Ennetbürgen NW, Liniger 2007 [Fig. 5]). Somit ist zu unterscheiden zwischen kurzen Intensivniederschlägen, welche primär zu Instabilitäten in den obersten Bodenschichten führen (Sachsels 1997), und anhaltenden Niederschlägen, welche den Untergrund tiefgründiger zu destabilisieren vermögen (August 2005).
- Wie Fig. 2 zeigt, lassen Gebiete mit kristallinem Untergrund keine Häufung von Hangmuren erkennen, obschon auch Kristallgebiete von den Niederschlägen betroffen waren. Eine mögliche Interpretation ist, dass das Kristallin zur Bildung besser durchlässiger Lockergesteine



neigt. Sofern nicht ein Förderfaktor gemäss der Methode AGN 2004 vorliegt (v. a. un tiefe Fels oberfläche als Durchlässigkeitskontrast), sind diese besser drainiert, so dass sich kaum kritische Porenwasserdrücke aufbauen konnten. Die Regenfälle waren zwar anhaltend, aber nicht intensiv genug, um vermehrt Hangmuren in Kristallingebieten auszulösen. Somit ist zu vermuten, dass die Sickerwasserzufuhr aus dem Niederschlag jeweils weitgehend schadlos abdrainiert werden konnte. Ähnliches dürfte teils auch auf die Gebiete mit Kalkformationen zutreffen, wo ebenfalls eine geringere Rutschhäufigkeit zu verzeichnen war. Diese Interpretation müsste jedoch anhand konkreter Beispiele erhärtet werden. Dabei müssten auch die Ereignisse vom Mai 1999 einbezogen werden, als die Niederschläge zwischen dem 19.-21. Mai auch in Kristallingebieten Hangmuren auslösten (z. B. Guttannen BE).

Spontane Rutschungen im engeren Sinn

Spontane Rutschungen in vormals stabilem Gelände ohne Anzeichen früherer Hangbewegungen ereigneten sich teilweise im Zusammenhang mit den oben erwähnten, flachgründigen Phänomenen. Andere entstanden infolge der Hochwasser in Bächen und Flüssen (Uferrutschungen). Bei den durch das BAFU erfassten Rutschungen wird jene von Laugneri (Weggis LU) als spontane Rotationsrutschung beschrieben. Als spontane mittel- bis tiefgründige Translationsrutschung ist auch jene von Cholrüti (Kerns OW) verzeichnet, wo auch in der nahen Umgebung keine offensichtlichen Anzeichen früherer Bewegungen erkennbar waren. Spontan erfolgte auch die Felsrutschung Gribtsch am Rossberg SZ (siehe unten). Obschon die spektakuläre Rutschung Feldweid (Entlebuch LU) spontan anmutete, handelte es sich vermutlich um eine Aktivierung einer alten, substabilen Rutschungsmasse mit inkorporiertem Fels (Liniger 2007 [Fig. 1, 2]).

Aktivierung von bestehenden Rutschungs- oder Sackungsmassen

Bei den meisten untersuchten Rutschungen bestanden bereits vorher Anzeichen früherer Hangbewegungen. Es handelte sich überwiegend um alte Rutschmassen, die als substabil oder als wenig aktiv klassiert waren.

Bewegungen von Felsmassen

Das Ereignis von Gribtsch am Rossberg (SZ) war eine initiale Felsrutschung. Dabei rutschte eine bis zu 20 m mächtige Feinsandstein/Nagelfluh-Platte auf einem hangparallel abtauchenden Mergelhorizont ab (Bollinger et al. 2007 [Fig. 6]). Felsmassen waren aber auch andernorts vor allem bei tiefgründigen Rutschungen betroffen. So wurde bei den Ereignissen Cholrüti (OW) und Feldweid (LU) oberste Schichten des unter der Rutschmasse liegenden Felsverbandes abgesichert und in die Bewegung inkorporiert. Ähnliches wurde sogar bei Hangmuren beobachtet (Liniger 2007 [Fig. 6, 7]).

Während die Felsrutschung Gribtsch ein typisches dip-slope-Ereignis grösseren Ausmasses war, trifft dies auf andere Ereignisstellen nur teilweise zu.

Geometrie und Tiefe der Gleitfläche, Rutschvolumina und -flächen

Bei Rutschprozessen können translative und rotative Bewegungsformen unterschieden werden. Diese Gliederung ist stark vereinfachend, denn meist finden sich Mischformen, was denn auch bei rund der Hälfte der untersuchten mittel- und tiefgründigen Rutschungen der Fall ist. Bei der anderen Hälfte trifft entweder der eine oder andere Typus zu, wobei Translationsrutschungen etwa dreimal häufiger sind als Rotationsrutschungen. Die Lockergesteine an Hängen sind oft heterogen und geschichtet, weswegen Translationsrutschungen dominieren.



Die Felsoberfläche limitiert den Tiefgang einer Rutschung, was translative Bewegungsformen begünstigt ($\frac{3}{4}$ der untersuchten Ereignisse). Rotationsbewegungen treten bevorzugt in homogenen Materialien auf. Solche Lockergesteinsbereiche sind im Alpenraum meist nur kleinräumig ausgebildet, so dass Rotationsrutschungen tendenziell kleinere Volumina aufweisen. Grössere Kubaturen können allerdings aus kaskadenartig gestaffelten Rotationsrutschungen resultieren, wie dies bei der Rutschung Feldweid (Entlebuch LU, Liniger 2007) beobachtet wurde.

Der maximale Tiefgang der untersuchten Rutschungen wird auf etwa 20 m geschätzt. Bei etwa 20% der erfassten Rutschungen dürfte die Gleitfläche in diesem Tiefenbereich liegen. Bei einem Drittel liegt der Tiefgang zwischen 10 und 20 m. Knapp die Hälfte der beurteilten Rutschungen wurden weniger tief als 10 m und somit als mittelgründig eingestuft.

Die geschätzten Rutschvolumina variieren zwischen einigen hundert m^3 bis 2 - 5 Mio. m^3 . Mit Abstand die grösste Rutschung ist jene von Rotloui in Guttannen (BE), deren Volumen auf 2 - 5 Mio. m^3 geschätzt wird. Etwa $\frac{1}{4}$ aller Rutschungen weist Volumina bis 10'000 m^3 und $\frac{1}{3}$ solche bis zirka 50'000 m^3 auf. Rund die Hälfte der Rutschungen haben ein Volumen von weniger als 100'000 m^3 , $\frac{2}{3}$ ein solches von unter 200'000 m^3 .

Die von den Rutschungen betroffenen Flächen umfassen in knapp der Hälfte der Ereignisse bis etwa 1 Hektare (ha). Mit Ausnahme der Rutschung Rotloui (35 ha) sind die Rutschflächen kleiner als 7.5 ha. Es waren vor allem Waldflächen betroffen, untergeordnet auch Weide- und Wiesland.

Sekundär- oder Folgeprozesse

Zahlreiche Hangmuren oder Rutschungen entwickelten sich nach ihrer Einmündung in ein Fliessgewässer in Murgänge oder hyperkonzentrierte Abflüsse. Das war beispiels-

weise der Fall im Usserdorfbach (Gersau SZ), wo in den frühen Morgenstunden des 23. August ein murgangähnlicher Abfluss erfolgte. Ernsthaftige Auswirkungen hatte die Rutschung am Glyssibach bei Brienz, von der ein Teil als Murgang durch das Gerinne fuhr und zusätzlich grosse Materialmengen mobilisierte (Zimmermann 2006 [Fig. 1, 2]). Murgangähnliche Umlagerungsprozesse von Material aus Rutschkörpern waren oft auch an den Hängen selbst zu beobachten. Diese Umlagerungsprozesse an Hanglagen konnten beim Abfluss ihrerseits Hangmuren triggern oder zu ausgeprägten Erosionsformen führen (zu letzteren siehe Schwab et al. 2006). Bei einzelnen grossvolumigen Rutschungen kam es auch zu Verkläuerungen oder Bachrückstau, gefolgt von einem schwallwellenartigen Abfluss (Cholrüti OW, Schmidboden NW), teils mit erheblichen Auswirkungen auf die Unterlieger (z. B. Dalenwil NW).

Rutschungen und Hangmuren waren auch von Sturzprozessen begleitet, meist in Form von Steinen und Blöcken, welche sich aus der Rutschmasse lösten und über Steilstufen oder Hänge abstürzten.

Die Vielfalt möglicher Prozesse der Massenumlagerung illustriert das Beispiel der Felsrutschung Gribisch am Rossberg (SZ). Aus einer initialen Felsrutschung von 130'000 m^3 , von der ein Teil in Form eines Felssturzes über eine Nagelfluhwand stürzte, ging ein murgangähnlicher Umlagerungsprozess hervor. Der langsam abfliessende Murgang vermochte im oberen Teil der Transitstrecke zusätzlich zirka 45'000 m^3 Material (vorwiegend grobblockiger Bergsturzschtutt) zu mobilisieren. Er zerstörte rund 10 ha Wald und führte im distalsten Ablagerungsraum zu Überschwemmungen und Übersarungen im Siedlungsgebiet von Goldau. Während des ganzen Ereignisses wurden rund 190'000 m^3 Material umgelagert (Bollinger et al. 2006 [Fig. 7]).



5. Die besonderen Ursachen der Hanginstabilitäten (Ursachenanalyse)

5.1 Trigger

Auslöser der Ereignisse waren zweifellos die anhaltenden, ergiebigen Niederschläge, deren Verlauf bereits ausführlich behandelt wurde (Bezzola & Hegg 2007). Von Bedeutung ist der Umstand, dass der August vor dem Einsetzen derselben schon recht nass war. Bis Mitte August wurden mancherorts bereits $\frac{2}{3}$ bis 100%, teils sogar bis deutlich über 100% des langjährigen Monatsmittels totalisiert. Das Wasseraufnahmevermögen des Untergrundes war dadurch reduziert.

Für die Auslösung der einzelnen Ereignisse entscheidend waren vorab die kumulierte Regenmenge, weniger aber die Intensitäten (mm/h). Die Auslösung ist primär davon abhängig, wann der Boden eine ausreichende Wassersättigung erreicht. Das Erreichen dieses kritischen Punktes kann, muss aber nicht mit den maximalen Niederschlagsintensitäten korrelieren.

Anthropogene Faktoren (überlaufende Brunnstuben, Versagen von Meteorwasserableitungen etc.) bildeten in manchen Fällen einen zusätzlichen oder sogar den hauptsächlichen Trigger. Ein Extremfall bildete das Hangmurenereignis beim Sanatorium Unterägeri, in dessen Verlauf ein gefülltes Wasserreservoir barst, woraus sich ein massiver morgangartiger Abfluss mitten durch das Siedlungsgebiet entwickelte (Fig. 4). Das dort

umgelagerte Lockergestein wird auf 30'000 m³ geschätzt. Der exakte Ereignisablauf ist in solchen Fällen oft schwierig zu rekonstruieren (Hangbewegungen als Auslöser des Versagens der Wasserleitungen oder Versagen der Wasserleitungen als Auslöser der Hangbewegungen?).

5.2 Schwellenwerte

Hangmuren und spontane flachgründige Rutschungen

Figur 2 geht aus den Untersuchungen der WSL hervor (Grundlagen: vereinfachte geotechnische Karte der Schweiz 1:200'000, Niederschlagssumme vom 20.08. (00:00 h) bis 22.08.2005 (24:00 h), d. h. 72 Stunden. Prozessdaten: Angaben der Kantone (StorMe) und WSL).

In dieser Grafik sind die Gesamtregentmengen und nicht diejenigen ab Beginn der Regenfälle bis zur Auslösung der einzelnen Hanginstabilitäten dargestellt. Obschon daraus kleine Differenzen hervorgehen, kann zusammenfassend folgendes gesagt werden:

- Ab etwa 120 mm kumuliertem Regen treten Hangmuren und spontane flachgründige Rutschungen auf, am deutlichsten in Molassegebieten.

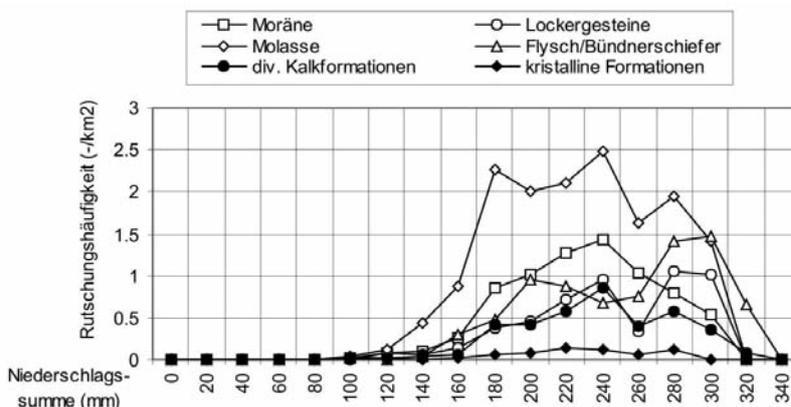


Fig. 2:

Häufigkeit von flachgründigen Hanginstabilitäten in Abhängigkeit der Geologie vs. räumliche Verteilung der Gesamtniederschlagssumme vom 20.-22.08.2005 (Hauptereignis). Quelle: Rickli, WSL, 2007.





- In anderen geologischen Regionen setzt die Ereignishäufung bei Regenmengen ab etwa 140-160 mm ein.
- Ein markanter Anstieg erfolgt ab zirka 160 mm.
- In kristallinen Formationen zeichnen sich die genannten Häufungen weniger stark ab.
- Ab 290-310 mm Regenmenge nimmt die Häufung von Ereignissen ab. Möglicherweise waren die kritischen Hangbereiche bis dann bereits entlastet.
- Die Rutschhäufigkeit nähert sich bei 340 mm nahezu Null. Das hat damit zu tun, dass in der betrachteten Zeitspanne nur sehr kleinräumige Gebiete einen Niederschlag von über 340 mm erfahren und dem entsprechend keine Ereignisse dokumentiert sind (mündl. Mitt. C. Rickli, WSL).

Mittel- und tiefgründige Rutschungen

Von besonderem Interesse sind Aussagen zu Schwellenwerten für die Auslösung grossvolumiger Rutschungen, da diese speziell wegen möglicher Interaktionen mit Fließgewässern ein grosses Gefahrenpotenzial beinhalten. Die näher untersuchten Rutschungen, von denen der Auslösezeitpunkt einigermaßen bekannt ist, sind in Tabelle 1 zusammengefasst:

Mittel- und tiefgründige Rutschungen mit Kubaturen von mehreren 1000 m³ traten ab kumulierten Regenmengen von 180-200 mm auf (max. Tagesniederschläge von 90-120 mm). Bei den grossvolumigen (> 100'000 m³) lagen die Auslösewerte deutlich über 200 mm. Betrachtet man auch die Vornässe des Augusts 2005, so kam es erst ab 350 mm kumuliertem Regen zu grösseren Rutschungen.

Lokalität	Gemeinde (Kanton)	max. Vol. [m ³]	Datum der Auslösung	Tageszeit Auslösung [24 h]	Regenmenge [mm]	
					19.8.2005 (00:00) bis Beginn Auslösung	1.8.2005 (00:00) bis Beginn Auslösung
Schwändi	Entlebuch LU	500	21.08.	23	153	311
Feldweid	Entlebuch LU	300'000	22.08.	8-12	204	353
Roren	Arth SZ	48'000	22.08.	15	213	370
Hurd	Alpnach OW	450'000	22.08.	18-21	215	353
Stöckwald	Kerns OW	350'000	22.08.	18-21	245	433
Schmidsboden	Wolfenschiessen NW	250'000	22.08.	18-22	226	423
Cholrüti	Kerns OW	100'000	22.08.	19	273	442
Seewli	Alpnach OW	80'000	22.08.	19	256	417
Gribsch-R'berg	Arth SZ	130'000	22.08.	20	217	388
Laugneri	Weggis LU	17'000	23.08.	3	229	411
Trachtbach	Brienz BE	70'000	22.08.	21	250 ^[1]	460 ^[2]
Glyssibach	Brienz BE	80'000	22.08.	23	261 ^[2]	460 ^[2]

Tab. 1: Zusammenstellung der an den Rutschstandorten aus Niederschlagsmessungen ermittelten Regenmengen zum Zeitpunkt des jeweiligen Rutschereignisses (Niederschlagsangaben: MeteoSchweiz, WSL, KAWA Bern).

[1] Wert aus Niederschlagsaufzeichnungen der IMIS-Station Gibelegg (1710 m ü. M.) ab 20.08.2005, Quelle: KAWA Bern, Abt. Naturgefahren.

[2] Mittelwert der Daten aus Niederschlagsaufzeichnungen der IMIS-Station Gibelegg (1710 m ü. M.) und Station Brienz (MeteoSchweiz) ab 20.08.2005, Quelle: KAWA Bern, Abt. Naturgefahren.





Es besteht ein erwarteter Zusammenhang zwischen der Niederschlagsmenge und dem Rutschvolumen. Kleinvolumige Hangbewegungen bedürfen geringerer Niederschlagsmengen als grossvolumige. Bei 12 in dieser Hinsicht untersuchten Rutschereignissen besteht dieser Zusammenhang bis zu Rutschkubaturen von etwa 100'000 m³ (Fig. 3). Berücksichtigt man auch grossdimensionale Rutschungen von wesentlich über 100'000 m³, so ist dieser Trend nicht mehr erkennbar. Bei ganz grossen Rutschungen müssen demnach auch andere Trigger zum Tragen kommen. Vermutet werden Bergwasserzuflüsse aus dem unterliegenden Felsuntergrund oder Einflüsse aus Bächen, welche das Rutschgebiet durchfliessen. Die in Fig. 3 dargestellten Trendlinien basieren auf einer kleinen Datenmenge. Es bedarf weiterer Ereignisanalysen, um diese Zusammenhänge besser zu erfassen.

5.3 Variable Disposition

Für die variable Disposition massgebend waren sicher die Grosswetterlage und die im August voll entwickelte Vegetation. Beide Faktoren beeinflussen die saisonale Zustandsgrösse eines Systems. Ein gleiches Niederschlagsereignis ausserhalb der Vegetationsperiode hätte möglicherweise noch

grössere Auswirkungen gehabt, vorab die Hangmuren und flachgründigen Rutschungen betreffend. Die milde Witterung mit einer Schneefallgrenze von über 3000 m ü. M. war in erster Linie entscheidend für den Hochwasserabfluss, trug aber in hoch gelegenen Regionen (wo auch die Wirkung der Vegetation nachlässt) dazu bei, dass auf grossen Flächen Wasser mehr oder weniger direkt in den Locker- und Festgesteinsuntergrund gelangte und dort zum Aufbau grosser Bergwasserdrücke beitrug. Das dürfte beim grossdimensionalen Ereignis Rotloui in Guttannen (BE) ein wichtiger Faktor gewesen sein. Dass sich im Felsuntergrund grosse Bergwasserdrücke entwickelten, dokumentiert nicht zuletzt auch die ungewöhnliche Häufung seichter Mikrobeben in der Zentralschweiz (Deichmann et al. 2006, Husen et al. 2007), speziell im Raum Muotathal (SZ) und Alpnach (OW), wo die Beben verspürt werden konnten.

5.4 Grunddisposition

Geologie, Lithologie

Die Geologie bestimmt die Grunddisposition erheblich. Sie manifestiert sich im Wesentlichen in der Gesteinsbeschaffenheit. Die Verteilung der flachgründigen Prozesse

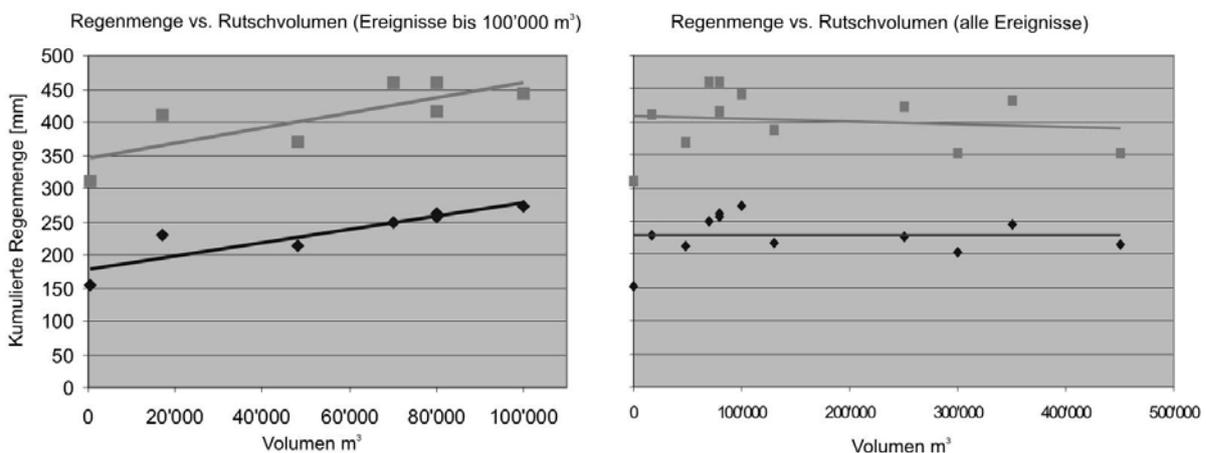


Fig. 3: Regenmengen vs. Rutschvolumen. Links: Rutschungen mit Volumina bis 100'000 m³, rechts: alle Ereignisse. Kumulierte Niederschläge ab 19.8.2005 bis Ereignisauslösung (schwarz), ab 1.8.2005 bis Ereignisauslösung (grau).





(Hangmuren, flachgründige spontane Rutschungen) zeigt die grösste Häufung in Molasse-, die geringste in Kristallingebieten (Fig. 2). Die mittel- und tiefgründigen Hangprozesse betreffend zeichnet sich eine Häufung in Gebieten mit geotechnisch eher ungünstigen Untergrundverhältnissen ab (v. a. Molasse [9 Ereignisse]; helvetische Decken dort, wo tonig-mergelige Formationen vorliegen [Kreide-Tertiär-Formationen 7, Dogger-Formationen 3]; Flysch [3]; Alkristallin des Aar-Massivs [1]).

Es sind hauptsächlich Formationen mit tonig-mergeligen, schlecht durchlässigen Schichtgliedern betroffen, weil dort a) vermehrt Gesteine (einschliesslich deren Verwitterungsprodukte) mit relativ schlechten Festigkeitseigenschaften (→ potenzielle Gleitflächen) und b) Stauhazone (→ Aufbau von Porenwasserdrücken, hoher Hangwasserspiegel) ausgebildet sind.

Gleitflächen

Die basalen Gleithorizonte befanden sich bei $\frac{3}{4}$ der untersuchten Rutschungen auf der in der Regel verwitterten Felsoberfläche. Während die Felsoberflächen von Schlierenflysch, Stadschiefer, Palfris-Formation und Molassemergel als prädestinierte Abscherhorizonte gelten, so ist das bei anderen festgestellten Felsuntergründen (Schrattenkalk, Nagelfluh, Molassesandstein) weniger der Fall. Bei letzteren sind die Ursachen für das Abgleiten der darüber liegenden Lockergesteine weniger durch die geotechnischen Kennwerte, sondern mehr durch andere Faktoren (z. B. Hydrogeologie) bestimmt.

Klassifikation der Lockergesteine

Trotz der zu erwartenden grossen Variabilität wurden die abgeglittenen Lockergesteine nach USCS klassiert (bezogen auf die Kornfraktionen $\varnothing < 60$ mm). Etwa 30% wurden als bindige, feinmaterialreiche und zirka 45% als nicht bis wenig bindige Gesteine eingestuft. Bei rund 25% handelt es sich um

Lockergesteine, bei denen die Kohäsion vorwiegend eine Scheinbare gewesen sein dürfte. Silte und Tone mit einem Grobkornanteil (Sand und Kies) unter 50% wurden nur etwa in $\frac{1}{5}$ der Fälle angetroffen.

Anzeichen früherer Ereignisse

Die meisten grossvolumigen Hangbewegungen traten dort ein, wo die Hangstabilität schon vorher ungenügend oder in einem labilen Gleichgewicht war. In mehr als $\frac{3}{4}$ aller untersuchten Rutschungen fanden sich morphologische Anzeichen früherer Hangbewegungen. Meist dürfte es sich um schwache Hangbewegungen bzw. um substabile Rutschungen gehandelt haben. Jedenfalls waren die Bewegungen nicht so gross, dass sie bereits in der Vergangenheit Massnahmen erforderten, beispielsweise in Form von Entwässerungen. Von den näher untersuchten Rutschungen existierten einzig bei der Rutschung Blappbach (Trubschachen BE) bereits künstliche Entwässerungen.

Hydrogeologie

Bei der Grunddisposition spielen nicht nur die Lithologien eine Rolle, sondern auch die Durchtrennung des Gebirgskörpers und die Bergwasserverhältnisse. Die anhaltenden Niederschläge und teils auch die Vornässe bewirkten offensichtlich eine ausgeprägte Wassersättigung des Gebirges. Dadurch stieg der Bergwasserspiegel verbreitet auf ausserordentliche Höhen an. Dies zeigte sich einerseits in ungewöhnlich starken Schüttungen von Quellen, andererseits in Wasseraustritten an Stellen, wo zuvor nicht oder kaum Wasser heraustrat. Identische Beobachtungen wurden auch bei den Hanginstabilitäten im Zusammenhang mit der aussergewöhnlichen Nässe (äusserst schneereicher Winter, Schneeschmelze begleitet von längeren, ergiebigen Regenfällen) gemacht (Bollinger et al. 2000). Beobachtungen bei den Ereignissen 2005 liessen erkennen, dass mit dem Ansteigen





der Wasseraustritte auch die Auslösung von Hangmuren sukzessive auf höherer Kote erfolgte, beispielsweise am Lunggrat (Langnau i. E. BE). Mit höherem Druckniveau ist in der Regel auch das Potenzial für höhere Porenwasserdrücke gegeben.

Bei zahlreichen Rutschungen muss von verstärktem Übertritt von Bergwasser in die Lockergesteine ausgegangen werden. Bei der Rutschung Cholrüti OW zum Beispiel wurden Zuflüsse aus einer sonst nicht Wasser führenden Störung festgestellt. Die Existenz einer Störungszone dürfte auch beim Schuttstrom in Weggis im Jahre 1795 (ca. 700'000 m³), dem ein Teil des damaligen Dorfes zum Opfer fiel, eine wichtige Rolle gespielt haben (Louis et al. 2008).

Beim Ereignis Roren-Gantli (Arth SZ) wird vermutet, dass der Geländekammer längs wasserwegsamem Klüften im Nagelfuhfels unterirdisch Wasser aus Hangbereichen ausserhalb des orografischen Einzugsgebietes zuströmte. Dieses Phänomen ist auch bei anderen grossen Rutschungen als destabilisierender Faktor bekannt (z. B. Campo Vallemaggia, Rutschungen im Gurnigelgebiet).

5.5 Anthropogene Faktoren

Anthropogene Faktoren haben vor allem bei der Entstehung von Hangmuren oft einen bedeutenden Einfluss. Die diesbezüglichen Untersuchungen werden durch die WSL durchgeführt. Die AGN hat dieser Problematik



Fig. 4: Hangmure, aus der sich ein murgangartiger Abfluss durch das Siedlungsgebiet von Unterägeri ZG entwickelte. Der Abfluss und die Mobilisation weiteren Materials wurden durch das Bersten eines Wasserreservoirs stark erhöht (Foto: Kantonsforstamt Zug).



mit dem «anthropogenen Förderfaktor» Rechnung getragen (AGN 2004). Auch bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen liegen Anzeichen für eine teilweise anthropogene Beeinflussung vor (z. B. alte, nicht mehr unterhaltene Drainagen, die ihre Wirkung verlieren oder verloren haben; defekte Leitungen; Überläufe von Quellwasserfassungen, Brunnstuben oder Laufbrunnen).

Bei den näher untersuchten Rutschungen existierten nur in einem Fall künstliche Entwässerungen (Rutschung Blappbach, Trubschachen).

Wasserleitungen (z. B. Strassenentwässerung in den Rutschhang) wurden in etwa $\frac{1}{3}$ der untersuchten Fälle festgestellt. Inwieweit diese zur Rutschauslösung beitragen, ist schwierig zu beurteilen. Wasserleitungen führen lokal zu einem konzentrierten Wasserabfluss, was zur Erosion der Deckschicht und verstärkter Wasserinfiltration führt. Während bei Hangmuren und flachgründigen Rutschungen oft ein kausaler Zusammenhang mit anthropogenen Faktoren hergestellt werden kann, ist deren Einfluss auf grossvolumige Hangbewegungen (z. B. Rutschung Hurd, Alpnach OW: 300'000 - 450'000 m³) in der Regel kaum zu erfassen.

6. Die Hanginstabilitäten 2005 im historischen Vergleich

Rückblickend drängen sich Vergleiche mit den Verhältnissen im Mai 1999 und im Frühsommer 1910 auf (siehe Bollinger et al. 2000). Im Kanton Schwyz lässt auch der September 1934 Parallelen erkennen. Unbestritten ist, dass das Jahr des Bergsturzes von Goldau vom 2. September 1806 ebenfalls ein ähnliches Wettergeschehen zeigte. Eine ähnlich kritische Wetterentwicklung lässt sich auch für den Frühsommer 1795 rekonstruieren (Schuttstrom 1795 in Weggis, Louis et al. 2008). Ohne weiter in die Chroniken einzugehen lässt sich erkennen, dass solche Verhältnisse retrospektiv 2-3 mal pro Jahrhundert stattgefunden haben dürften. Ob klimati-

sche Veränderungen zukünftig häufiger solche Voraussetzungen schaffen, muss zur Zeit unbeantwortet bleiben.

7. Folgerungen

Die Folgerungen und Thesen können bezogen auf die in der Einleitung formulierten Fragen des BAFU wie folgt zusammengefasst werden:

Welche allgemeinen Aussagen können aus der Übersicht über die tiefgründigen Rutschungen abgeleitet werden?

- Tiefgründige, grossvolumige Hangbewegungen treten erst gegen oder gar nach dem Ende der Hauptniederschlagsphase auf. Aufgrund ihrer grossen Masse reagieren bestehende substabile Rutschgebiete relativ träge. Bis zur spürbaren Aktivierung können grosse Rutschmassen verstärkte Bewegungen durch interne plastische Deformationsarbeit nahezu unmerklich absorbieren. Bei Gebieten ohne frühere Rutschanzeichen dauert es länger, bis die vorhandenen Festigkeiten überschritten sind und Instabilitäten entstehen.
- Ein extremer kurzer Gewitterregen verursacht auch bei Rekordniederschlägen in der Regel keine tiefgründigen Rutschungen, sofern der Untergrund nicht vorher schon stark durchnässt war. Die Niederschlagsdauer (einschliesslich Vornässe) ist entscheidend für grossvolumige Hangbewegungen. So sind Sachseln 1997, Napf/Emmental 2002 mit zahlreichen Hangmuren und eher flachgründigen Rutschungen nicht direkt vergleichbar mit den Ereignissen im Mai 1999 und August 2005.
- Die grossvolumigen Rutschungen zeigen, dass bei starker Durchnässung und Durchtrennung des Gebirges auch Felskompartimente in Bewegung geraten können. Wenn der Fels inkorporiert ist, besteht das Potenzial für Felsstürze oder gar Bergstürze. Der Bergsturz von Goldau vom 2. September 1806 ist als solches Beispiel zu



betrachten. Er begann als Translationsrutschung («first move»), wie auch generell viele grossvolumigen Rutschungen translativ erfolgen.

Welche Gemeinsamkeiten oder Unterschiede sind bei den tiefgründigen Rutschungen festzustellen?

- Die augenfälligsten Gemeinsamkeiten tiefgründiger Rutschungen sind im Wesentlichen bereits oben aufgeführt.
- Unterschiede bestehen in der geotechnischen Beschaffenheit der Rutschkörper (Typus Lockergestein, Fels oder Fels/Lockergestein), der Gleithorizonte (innerhalb Lockergestein, an der Felsoberfläche, im Fels) und des geologisch-hydrogeologischen Rahmens. Weiter gibt es Unterschiede bezüglich der Wechselwirkung mit Gewässern. Diese Unterschiede sind oft beträchtlich, worauf auch die Aussage zu begründen ist, dass jede tiefgründige, grossvolumige Rutschung einzigartig und letztlich einzeln zu betrachten ist.
- Im Zusammenhang mit der Durchnässung wesentlich sind die Drainagewege bzw. der zeitliche Verlauf zum Abbau von Wasserdrücken, welche von Fall zu Fall unterschiedlich sind. Substabile oder langsame Rutschungen oder Sackungen könnten diesbezüglich besonders ungünstig sein, da die Drainage des Rutschkörpers gehemmt ist bzw. keine wirksamen Drainagewege entwickelt sind. Eine aktive Rutschung kann sich rascher entwässern, da eher wirksame Fließwege vorhanden sind (Bsp. Cuolm da Vi, Sedrun; Amann et al. 2007). Die Tatsache, dass nur in einer der untersuchten Rutschungen Drainagen vorhanden waren, deutet darauf hin, dass als «unproblematisch» (sonst hätte man eventuell Drainagen errichtet) betrachtete, substabile oder langsame Rutschungen effektiv kritischer sind als aktive und somit «schlafende Hunde» darstellen können.
- Ereignen sich auf einer grossvolumigen Rutschung vorgängig Hangmuren, kann eine Entlastung der sich aufbauenden

Hangwasserdrücke stattfinden (Bsp. Blachti, Adelboden BE, im Frühsommer 1999).

Welche Kombinationen von gefährlichen Parametern sind bei Gefahrenbeurteilungen besonders zu beachten?

- Liegt die Felsoberfläche in einer Tiefe kleiner als etwa 10-20 m, so kann die Lockergesteinsschicht bei starker Durchnässung des Untergrundes in ihrer gesamten Mächtigkeit abrutschen. Dies ist vergleichbar mit dem Förderkriterium «Durchlässigkeitskontrast bei Hangmuren» (Methode AGN 2004), kommt aber erst bei ausserordentlicher Durchnässung zum Tragen. Dip-slope-Hänge (z. B. Ereignis Gribbsch-Rossberg SZ) oder ein Felsuntergrund mit Gletscherschliff können dies zusätzlich begünstigen.
- Der Auslösung von Hanginstabilitäten förderlich sind Bergwasserzuflüsse aus Trennflächen. Dies war offenbar bei der Rutschung Cholrütli OW, wo aus einer sonst nicht Wasser führenden tektonischen Störung Wasser zuströmte, oder bei den Hangmuren in St. Antönien der Fall. In Molassegebieten ist die Wasserzirkulation längs den verbreitet wasserwegsamem Klüften und Brüchen in der Nagelfluh oder in Sandsteinen diesbezüglich ebenfalls wichtig. Hier kommt hinzu, dass sich wegen der Einschaltung von Stauhorizonten (Mergel, Feinsandsteine) bedeutende Kluftwasserdrücke aufbauen können. So könnte ein steilstehender, wasserführender Bruch die Auslösung der grossen Hangmure im Eimerloch (Unterägeri ZG) begünstigt haben, wenngleich die anthropogene Beeinflussung (Strassenentwässerung) letztlich als Trigger betrachtet werden muss.
- Auch aus Karstspeichern können unterirdische Zuflüsse zu Hangbewegungen Anlass geben (z. B. Ereignisse am Bürgenstock, Liniger 2007).
- Die grossen Massenbewegungen beinhalten indirekt ein erhebliches Gefahrenpotenzial, indem durch den Aufstau von



Hochwasser führenden Bächen Schwallwellen oder Murgänge entstehen können (Cholrüti OW, Schmidboden NW). Je nach Gerinne genügen einige 1'000 bis wenige 10'000 m³, um zerstörerische Murgänge zu generieren (Trachtbach, Glyssibach; siehe Zimmermann 2006). Im Gegensatz zu «normalen» fluvialen Hochwässern besteht hier oft keine Vorwarn- und Reaktionszeit, weshalb das Risikopotenzial erheblich ist. Personen und Tiere sind an Leib und Leben gefährdet.

- Der anthropogene Einfluss kann ein erhebliches Gefahrenpotenzial beinhalten, wie die relativ voluminösen Hangmurenereignisse in Unterägeri exemplarisch zeigen. Die Ereignisse beim Sanatorium (Versagen Wasserreservoir) und beim Eimerloch (Strassenentwässerung) entstanden in einem Wald unmittelbar oberhalb dem Siedlungsgebiet und ergossen sich mitten durch Wohngebiete hindurch (Fig. 4). Bei solchen Konstellationen besteht ein besonders grosses Risikopotenzial. Die Methode AGN (2004) bietet die Möglichkeit, anthropogene Förderfaktoren (Querabschläge bei Strassen, Strassenentwässerungen, Überläufe von Brunnstuben, Quellfassungen und Laufbrunnen, defekte Drainagen qualitativ zu berücksichtigen.

War der Kenntnisstand über die Rutschungen vor dem Unwetter 2005 ausreichend?

- Nein. Der Kenntnisstand war in den meisten Fällen unzureichend. Einerseits liegt das darin begründet, dass tiefgründige, grossvolumige Rutschungen oft von den Siedlungsgebieten entfernt liegen, also in Gebieten, in denen in manchen Fällen lediglich Gefahrenhinweiskarten erstellt werden. Eine detailliertere Beurteilung, wie dies nur schon die Gefahrenbeurteilung gemäss Methode AGN erfordern würde, entfällt dann meistens. Andererseits dürften substabile Rutschungen hinsichtlich ihres Potenzials zu Aktivierungen bei ausserordentlichen Niederschlagsereignissen tendenziell unterschätzt werden.

Tiefgründige Rutschungen müssen in dieser Hinsicht umfassender beurteilt und überwacht werden, insbesondere in Einzugsgebieten von Bächen, welche direkt in ein Siedlungsgebiet münden.

Waren früher gemachte Prognosen und Szenarien zu den untersuchten Rutschgebieten richtig?

- Die bisherige Gefahrenbeurteilung bei Rutschungen erfolgte mehrheitlich auf der Basis der Empfehlungen des Bundes zur Berücksichtigung von Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten (BRP, BWW, BUWAL 1997). Bei permanenten Rutschungen kann das Potenzial einer Aktivierung dort lediglich aus der Formulierung für die starke Intensität abgeleitet werden (Verschiebungen > 1 m pro Ereignis → rote Gefahrenstufe). Es wird angenommen, dass dieses Potenzial wohl nur in wenigen Fällen erkannt worden ist. Die Methode AGN bietet diesbezüglich eine differenziertere Betrachtung, so dass eine zutreffendere Beurteilung erwartet werden kann. Dies betrifft nicht nur das Potenzial zu Aktivierungen, sondern auch jenes für räumlich konzentrierte Differenzialbewegungen. Ereignisse wie beim Augustunwetter 2005 waren in manchen Fällen aufgrund des damaligen Kenntnisstandes nicht vorhersehbar.

Welche Erkenntnisse und Szenarien müsste man heute bei einer Gefahrenbeurteilung zusätzlich berücksichtigen?

- In Kombination mit Fließprozessen können die Auswirkungen von örtlichen Hanginstabilitäten weitreichender sein, als dies zuvor erwartet worden war. Eindringlich zeigt dies das Beispiel der Felsrutschung Gribisch am Rossberg SZ, wo ein solcher Ereignisablauf vorher kaum als denkbar gegolten hätte.
- Bei lang anhaltenden Niederschlägen oder solchen mit nasser Vorgeschichte können Hangmuren grösserer Volumina entstehen, weil der Untergrund dabei stärker und tiefgründiger durchnässt wird. Eine



- Hangmure mit ausserordentlich grossem Volumen und hohem Gefahrenpotenzial bildete jene im Ritzwald/Trachtbach, Brienz, mit rund 60'000 m³ bewegter Masse. Zudem können bei ausserordentlicher Nässe Nebeneffekte wie «piping» auftreten.
- Bei der Gefahrenbeurteilung von Hanginstabilitäten sollten vermehrt Szenarien in Betracht gezogen werden, bei denen grössere Volumina mobilisiert werden, sei es durch spontane Abgänge oder durch Aktivierung substabiler Rutschungen. Speziell sind auch Wechselwirkungen mit Fließgewässern zu beachten (Rückstau, Schwallwellen, Umlagerung von Geschiebe und Holz über grössere Strecken).
 - Besonders bei Rutschungen in Einzugsgebieten von Gerinnen, in deren Unterlauf grössere Schadenpotenziale liegen, sind vermehrt Überwachungskonzepte in Betracht zu ziehen. Es gibt heute relativ kostengünstige Methoden, die eine flächige und genaue Überwachung ermöglichen (z. B. Laserscan, Radarinterferometrie).

8. Empfehlungen

- 1] Grossvolumige Rutschungen entstehen vielfach ausserhalb der Siedlungsräume. In Wechselwirkung mit Gerinneprozessen können sie jedoch Auswirkungen bis in die besiedelten Gebiete entfalten. Im Rahmen der Erstellung von Gefahrenkarten ist bei der Beurteilung von Bachprozessen deshalb vermehrt der Disposition der Einzugsgebiete zu grossvolumigen Hanginstabilitäten (v. a. Rutschungen, untergeordnet Felsstürze) Rechnung zu tragen. Dies erfordert die Fähigkeit, geologisch und hydrogeologisch plausible Modelle zu entwickeln. Die Checkliste von Gruner & Wyss (2009) liefert Anhaltspunkte, welche Faktoren besonders zu beachten sind. Da die kritischen Stellen unter Umständen nicht exakt lokalisierbar sind, ist vermehrt auf der Basis von Ereignisbaumanalysen zu operieren. Es sind
- zudem auch Szenarien zu prüfen, welche auf den ersten Blick «wenig wahrscheinlich» erscheinen.
- 2] Augenmerk ist auf die substabilen Rutschungen zu werfen, denn sie werden möglicherweise bezüglich ihres Gefahrenpotenzials unterschätzt. Wegen ungenügender Drainagewege können sich in ihnen bei ausserordentlicher Nässe Hangwasserdrücke aufbauen, welche zu Aktivierungen führen können. Solche Rutschungen sind besser zu erfassen (Kartografie, geologisch-hydrogeologisches Modell), besonders in Einzugsgebieten von Fließgewässern.
- 3] Dip-slope-Hänge sind besser auf ihre Disposition zur Bildung von Translationsrutschungen hin zu prüfen, namentlich wenn am Hangfuss Schadenpotenziale vorhanden sind oder Gerinne zu Umlagerungsprozessen bis in Siedlungsgebiete führen können.
- 4] Es sind Kriterien zu entwickeln, unter welchen Bedingungen eine substabile Rutschung als «schlafender Hund» zu taxieren ist. Ein Monitoring solcher Gebiete könnte hilfreich sein (Einsatzmöglichkeiten von Radarinterferometrie oder Laserscan prüfen). Auch in einem dip-slope-Hang kann ein verborgenes Gefahrenpotenzial schlummern.
- 5] Es ist zu prüfen, inwieweit die Landesgeologie (geologische Landesaufnahme, geologische Dokumentationsstelle) und Swisstopo bei den Punkten 2-4 Hilfestellung leisten könnte, beispielsweise durch Beschaffung und Zur-Verfügung-Stellung von präzisen Terrainmodellen (z. B. DTM-AV → «hillshades»), Orthofotos, Satellitendaten und gegebenenfalls die gezielte Aufbereitung solcher Daten.
- 6] Dem Einfluss anthropogener Faktoren muss verstärkt Rechnung getragen werden. Siedlungsgebiete in Hanglagen oder im Hangfussbereich stellen ein diesbezüglich nicht zu unterschätzendes Risiko dar. Das zeigte sich bereits bei den Hangmuren 1997 (Langnau i. E., Sachseln). In die-





ser Hinsicht müssen speziell Anlagen von Wasserversorgungen in Hanglagen überprüft werden (integraler Bestandteil des Qualitätsmanagements von Wasserversorgungen).

- 7] Das nach dem Augustunwetter 2005 vom damaligen BWG und der WSL herausgegebene Erfassungsformular für Rutschungen ist umfassend und grundsätzlich anwendbar. Es enthält zahlreiche Parameter. Viele davon sind wichtig, andere nicht. Bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen trifft letzteres beispielsweise für die Bodenbeschaffenheit und die Makroporen zu. Bei diversen Punkten ist zu definieren, was darunter genau zu erfassen ist, denn es besteht die Vermutung, dass einzelne Parameter je nach Autor verschieden verstanden bzw. erhoben werden. Generell müssten das geologische und hydrogeologische Modell konkreter dargestellt werden. Ebenfalls sind differenziertere Angaben zum Waldzustand und zu anthropogenen Einflüssen nötig.
- 8] Die Hangmuren betreffend lieferten die Auswertungen der WSL in Bezzola & Hegg (2008) zum Hochwasser 2005 klare Schwellenwerte, ab denen mit dem Einsetzen von flachgründigen Hangprozessen zu rechnen ist. Auch wenn diese Werte noch mit Unsicherheiten behaftet sind, sollten die Verantwortlichen auf Stufe der Kantone damit arbeiten. Sie können eine wichtige Grundlage für allfällige Entscheide zu vorsorglichen Evakuationen oder Sperrungen bilden. Der genaue Umgang mit diesen Werten (Warn- oder Alarmwerte; Gefahrenstufen analog Lawinenwarnung WSL-SLF) muss noch festgelegt werden. Frühere und weitere Ereignisse sind konsequent hinsichtlich solcher Schwellenwerte auszuwerten und es ist eine entsprechende Datenbank zu führen.

Verdankung

Dem Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Gefahrenprävention, wird für das Einverständnis gedankt, den Analysebericht der «Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN» zu den Rutschungen während der Starkniederschläge im August 2005 in der hier vorliegenden, etwas gekürzten Form publizieren zu dürfen.



**Bibliografie**

- AGN 2004: Gefahreneinstufung Rutschungen i.w.S. – Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren (download http://www.sfig-gsgi.ch/Arbeitsgruppen/arbeitsgruppen_set.htm).
- Amann, F., Donatsch, G., Bonanomi, Y. & Moser, M. 2007: Kinematik und Bewegungsmechanismus der tiefgründigen Instabilität Cuolm Da Vi (Graubünden, Schweiz): Bull. angew. Geol. 11/2, 117-131.
- Bezzola, G.R. & Hegg, C. (Hrsg.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 429 S.
- Bezzola, G. R. & Hegg, C. (Hrsg.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707, 215 S.
- Bollinger, D., Hegg, Ch., Keusen, H.R. & Lateltin, O. 2000: Ursachenanalyse der Hanginstabilitäten 1999. Bull. angew. Geol. 5/1, 5-38.
- Bollinger, D., Thuro, K. & Rick, B. 2007: Die Bergstürze am Rossberg und die Massenbewegungen in Folge des Unwetters vom August 2005 – ein Exkursionsführer. Bull. angew. Geol. 11/2, 45-56.
- BRP, BWB, BUWAL 1997: Empfehlungen des Bundes zur Berücksichtigung von Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Reihe Naturgefahren, Bern, 1977, 32 S.
- Deichmann, N., Baer, M., Braunmiller, J., Husen, S., Fäh, D., Giardini, D., Kästli, P., Kradolfer, U. & Wiemer, S. 2006: Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2005. *Eclogae geol. Helv.* 99/3. 443-453.
- Gruner, U. & Wyss, R. 2009: Anleitung zur Analyse von Rutschungen. Bull. angew. Geol. 14/1+2, 153-157.
- Husen, S, Bachmann, C. & Giardini, D. 2007: Locally triggererd seismicity in the central Swiss Alps following the large rainfall event of August 2005. *Geophys. J. Int.*, 1-9.
- Liniger, M. 2006: Die Herausforderung der Gefahrenprognose bei Massenbewegungen: Rutsch- und Sturzprognose. Bull. angew. Geol. 11/2, 75-88.
- Louis, K., Bänninger, P., Luterbacher, J. & Zwyer, T. 2008: Der Schuttstrom vom 15./16. Juli 1795 in Weggis. Rekonstruktion des Ereignisses und Beurteilung des vorhandenen Gefahrenpotentials. – Bull. Angew. Geol. 13/1, 55-81.
- Raetzo, H. & Rickli, C. 2007: Rutschungen. In: Bezzola G. R & Hegg, C. (Ersg.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707: 215 S.
- Schwab, S., Tobler, D. & Graf, K. 2006: Bildung von Erosionsgräben in einer Moränenterrasse im Diemtigtal während der Unwetter vom August 2005. Bull. angew. Geol. 11/1, 35-48.
- Zimmermann, M. 2006: Prognose von Murganggefahren: Wie sicher ist sie? Bull. angew. Geol. 11/2, 65-73.

