

Das Rüdlinger Hangrutsch – Experiment

In einer gross angelegten experimentellen Studie wurde an einem bewaldeten Hang in der Nordschweiz eine Rutschung durch Beregnung künstlich ausgelöst. Das Experiment gelang mit grossem Erfolg und brachte wertvolle Erkenntnisse über die Entstehung von Hangrutschungen.

von Sarah Springman, Peter Kienzler, Amin Askarinejad, Francesca Casini, Marco Sperl, Ernst Bleiker / IGT; Devrim Akca, Armin Grün, Professur für Photogrammetrie / IGP

Einer der grossen Vorteile der Forschungsarbeit in der Schweiz und insbesondere an der ETH Zürich ist, dass es viele verschiedene Möglichkeiten gibt, bei Grossforschungsprojekten mitzuwirken, die die Gelegenheit eröffnen, in einer multidisziplinären Umgebung an der Lösung gesellschaftlich relevanter Probleme beteiligt zu sein. In diesem Fall waren Bau-, Umwelt- und Geomatikingenieure im Mittelpunkt eines faszinierenden Projekts, bei dem Hangrutschungen untersucht wurden, mit dem Ziel eines vertieften Verständnisses der Entstehung von Hangversagen sowie der darauf folgenden Massenbewegung. Frühere Feldexperimente in Gruben (Teyssie, 2006) und in Tössegg (Thielen, 2007) waren Vorläufer-Doktoratsprojekte, die vor allem auf geotechnische Aspekte fokussiert waren. Sie brachten wertvolle Erkenntnisse für die Planung und Durchführung dieses Projektes, wie auch die Einsicht für die Unabdingbarkeit von fachlicher Unterstützung von Kollegen und Kolleginnen aus der Geologie, Hydrologie, Bodenkunde, Geophysik, Photogrammetrie, Ingenieurbiologie, sowie Instrumentierungs- und Sensortechnologie.

Das „Competence Centre for Environment and Sustainability (CCES)“ gab den Anstoss zu dem übergreifenden Projekt „Triggering of Rapid Mass Movements (TRAMM)“, in dem Arbeitsgruppen der WSL, ETH und EPFL koordiniert von Dr. Manfred Stähli ihre Forschung auf das vertiefte Verständnis der Entstehung von Hangrutschungen fokussierten. Dies beinhaltete auch die Erforschung der Entwicklung von langsamen zu schnellen Massenbewegungen sowie der Fließcharakteristiken katastrophaler Massenbewegungen. Auch die Bedeutung heterogener hydro-mechanischer Hangprozesse auf die Auslösung von Schneelawinen, Hangrutschungen und Murgängen wurde untersucht. Das Rüdlinger Experiment war ein Teilprojekt des TRAMM unter der Leitung von Prof. Sarah M. Springman. Das er-

klärte Ziel war, an einem detailliert untersuchten und mit modernsten Messgeräten instrumentierten Hang eine durch Regen bedingte Hangrutschung auszulösen. Mit hochauflösenden Kameras wurde der Hang rund um die Uhr beobachtet, um die Rutschung aufzunehmen. Eine Testparzelle auf dem Gebiet der Gemeinde Rüdlingen wurde ausgewählt (Abb. 1), nachdem ein extremer Starkregen im Mai 2002 mit 100 mm Niederschlag in 40 Minuten über 42 Hangrutschungen in der Nähe auslöste. Die ETH unterstützte die lokale Verwaltung bei der Bewältigung der Katastrophe mit mehreren Studentenprojekten, so dass die Gemeindepräsidentin, Käty Leutenegger, der Idee eines kontrollierten Rutsch-Experimentes auf dem Gebiet ihrer Gemeinde positiv gegenüberstand, als sie 2008 angefragt wurde. Entsprechend wurde auch die Erlaubnis gegeben, einige Bäume am Rand des Hanges zu fällen. Die kantonale Verwaltung in Vertretung des Beauftragten für Naturgefahren, Jürg Schulthess, und die benachbarte Gemeinde Buchberg waren gleichermassen unterstützend und interessiert an den Forschungsergebnissen, die nun, im Frühjahr 2010, der Gemeinde vorgestellt werden. Die lokale Unterstützung vor Ort war eine grundlegende Voraussetzung für die erfolgreiche praktische Umsetzung des Experiments – und für das anschliessende Aufräumen.

Nachdem ein Hang gefunden war, der auf der Grundlage der Geologie, Topographie, Bodenbeschaffenheit (Abb. 2), Zugänglichkeit und Vegetation geeignet für das Experiment schien, war es zunächst nötig, die Schichtung des Bodens, die Durchwurzelung und die Tiefe zum anstehenden Gestein genau zu analysieren, um zu entscheiden, ob das Experiment Erfolg versprechend sein würde. Dafür wurde eine ganze Reihe von Schürffrühen ausserhalb des Testfeldes gegraben und eine Vielzahl von Bodenproben für die Laboranalyse der relevanten Pa-

¹ <http://www.cces.ethz.ch/projects/hazri/tramm>

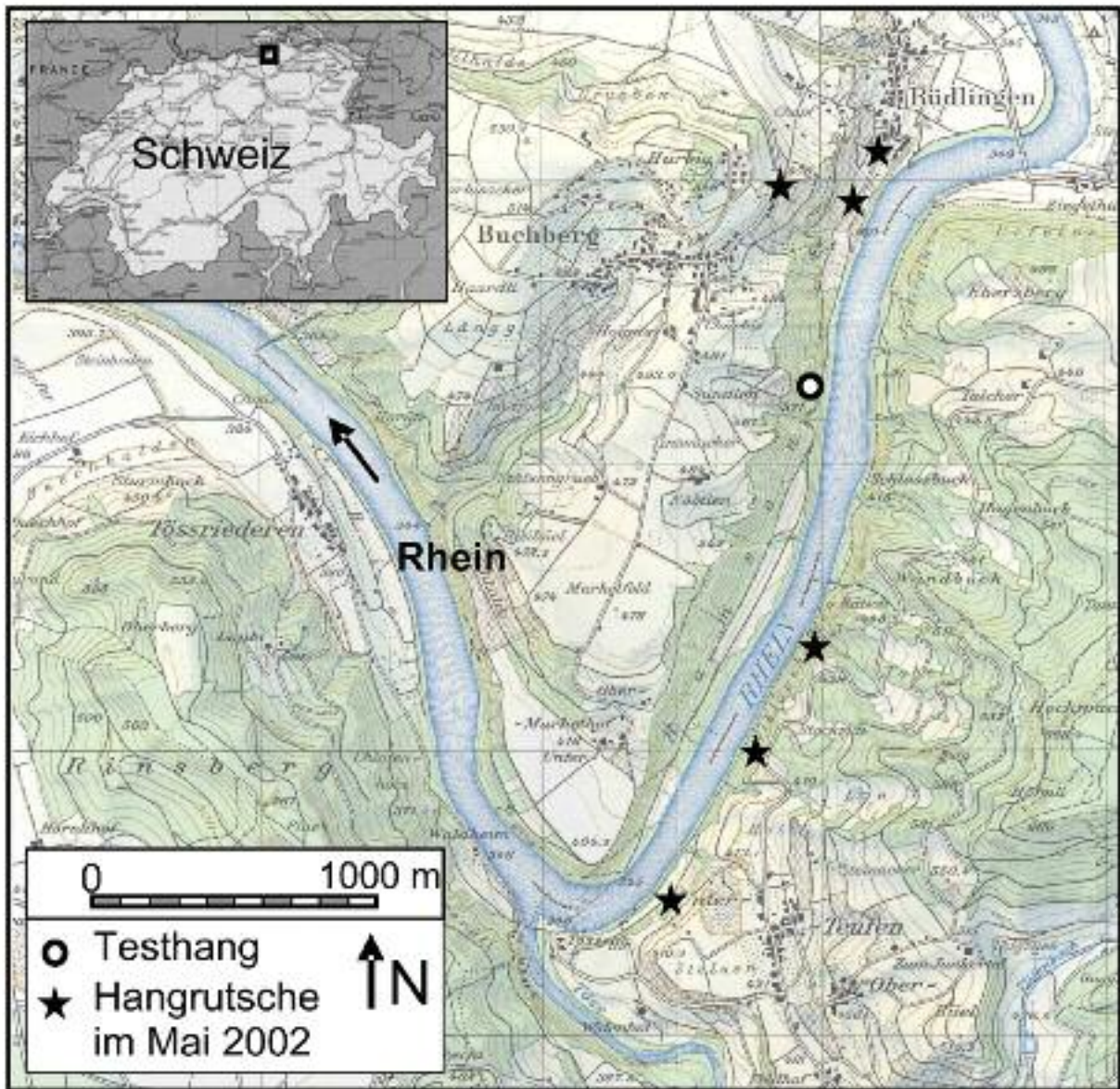


Abb. 1: Lage des Testhangs (Verändert, nach Sieber, 2003).

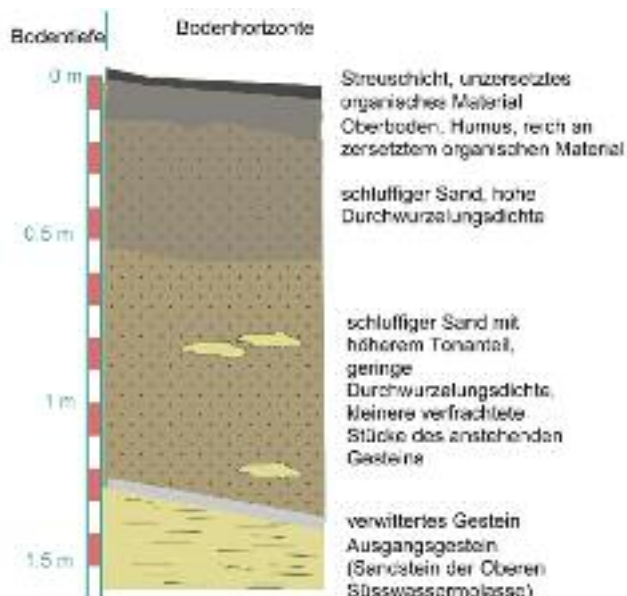


Abb. 2: Bodenprofil aus dem oberen Bereich des Testhangs.



Abb. 3: Infiltrationsmuster in einem Bodenprofil (Massstab: Von der Bodenoberfläche bis in 1.3 m Tiefe).

rometer entnommen. Mit einem seismischen Dilatometer-Verfahren wurde die Scherwellengeschwindigkeit gemessen (Andreas Schmid und René Rohr, Geomechanik-Gruppe des IGT). Infiltrationsexperimente mit einer Kleinberegnungsanlage wurden auf mehreren 1 m²-Plots durchgeführt, um die Infiltration zu beschreiben und zu quantifizieren. Dabei wurde mit der Lebensmittelfarbe „Brilliant Blue“ eingefärbtes Wasser verwendet, womit gezeigt werden konnte (Abb. 3), dass die Infiltration recht gleichmässig und homogen, mit wenig präferentiellm Fliessen erfolgte, und dass sich – zumindest lokal – aufgesetzte Hangwasserspiegel über dem anstehenden Sandstein ausbilden können (hier in ca. 1 m Tiefe, Abb. 3).

Dies bestätigte die hohe Bereitschaft des Hanges zu einem tiefgründigen Versagen über dem anstehenden Gestein. Zudem wurde ein kleiner Anteil aktiver Tonminerale im Boden festgestellt, der mit der Tiefe zunahm, was eine Abnahme der Bodenhaftung und Durchlässigkeit bedeutet. Dadurch war schnell klar, dass sich die wahrscheinliche Rutschfläche über dem Gestein in 1–2 m Tiefe befindet. Mit den geplanten Ausmassen des Testfeldes von 35 m in longitudinaler und 7 m in transversaler Richtung bedeutete das, dass im „worst case“ bis zu 500 m³ Material mobilisiert werden könnte: Eine nicht zu vernachlässigende Menge. Entsprechend wurden Sicherheitsmassnahmen getroffen, um zu verhindern, dass der Grossteil dieser Masse über die Strasse und in den Rhein fliessen würde. Dafür stellte die Firma GEOBRUGG grosszügigerweise zwei ihrer Schutznetze zur Verfügung, mit denen zudem noch die Aufprallenergie gemessen werden konnte.

Wie ein Hang plötzlich durch Regen bedingt versagen kann, kann verglichen werden mit dem Zusammenstürzen einer Sandburg bei Regen oder Überflutung. Die Kapillarkraft an den Oberflächen von Wasser, Luft und festem Boden in einem teilweise gesättigten Boden erzeugt Saugspannungen, die dabei helfen, die einzelnen Bodenpartikel zusammenzuhalten. Wenn sich der Boden während der Infiltration von Regenwasser sättigt, reduzieren sich diese Saugspannungen und damit auch die Scherfestigkeit des Bodens. Wenn sich hingegen ein Boden durch einen ansteigenden Grundwasserspiegel aufsättigt, bewirkt der ansteigende hydrostatische Porenwasserdruck eine Abnahme der Scherfestigkeit.

Während des Beregnungsexperiments wurden für die Erfassung der Oberflächendeformationen vier Kameras verwendet. Die IDS-Kameras wurden in robuste Gehäuse montiert, um sie gegen Umwelteinflüsse zu schützen. Jeweils zwei waren mit 8.0 mm und 12.0 mm C-Mount Objektiven ausgestattet. Sie wurden von einem professionellen Baumpfleger in ca. 25 m Höhe auf zwei grossen Bäumen installiert. Etwa 250 weisse Tischtennisbälle (mit einem Durchmesser von 40 mm) wurden auf Holzstäbe geklebt und in einem 1 m mal 1 m-Raster im Boden verankert (Abb. 4). 21 zufällig verteilte Kontrollpunkte wurden an umgebenden Bäumen festgelegt. Die Positionen der Tischtennisbälle konnten mit einer selbstentwickelten Software mit einer Genauigkeit von ±16.5 mm in horizontaler und mit ±3.4 mm in vertikaler Richtung bestimmt werden. Während des zweiten Beregnungsexperiments wurde die Beregnungsfläche ca. 5 m hangaufwärts vergrössert. Für eine verbesserte Sichtbarkeit wurden auf dieser Fläche die Tischtennisbälle durch

weisse Tennisbälle ersetzt. Die Positionierungsgenauigkeit betrug ±11.0 mm (horizontal) und ±4.3 mm (vertikal). Unmittelbar vor dem ersten Beregnungsexperiment im Oktober 2008 führte Cornelia Brönnimann (EPFL) im unteren Hangteil einen hydraulischen Slug-Test durch. Dabei konnte im Piezometerrohr kein Wasserspiegel aufrechterhalten werden, was auf eine sehr hohe hydraulische Durchlässigkeit des Untergrundes schliessen lässt. Dadurch konnte eine der Hypothesen bezüglich der möglichen Hangrutsch-Auslösemechanismen ausgeschlossen werden: Die einer Rutschung, bedingt durch steigenden Grundwasserspiegel. Geophysikalische Untersuchungen der Arbeitsgruppe um Klaus Holliger von der Uni Lausanne, Barbara Suski mit Francesca Gambazzi, zeigten einen Schichtwechsel in der anstehenden Molasse und bestätigten damit das Vorhandensein von möglichen Klüften in der kompakten, grobkörnigen Süsswassermolasse im Vergleich zur weniger dicht gelagerten, feinkörnigeren Meeresmolasse.

Ein Sicherheitskonzept wurde erstellt, um zu verhindern, dass jemand von der Rutschung erfasst werden könnte. Es war davon auszugehen, dass die Rutschung innerhalb von Sekunden vorüber sein würde, so dass kein Entkommen aus dem bewegten Schutt möglich wäre. Das Konzept wurde auf der Grundlage der gemessenen Sättigung und Saugspannung in verschiedenen Tiefen erstellt. Die beobachteten Parameter wurden mit Stabilitätsberechnungen gekoppelt und ergaben so ein Entscheidungsdiagramm mit verschiedenen Phasen (rot, orange, grün, Abb. 6) Zusammen mit weiteren Beobachtungen und Messungen wurde ein klares System vorgegeben, mit dem beurteilt werden konnte, welche Handlungen erlaubt waren und mit dem die Kommunikation zwischen den Mitarbeitern und zur lokalen Bevölkerung vereinfacht wurde. Phase „rot“ bedeutete beispielsweise, dass der Hang jederzeit abrutschen könnte. Die Gefahrenzone durfte unterhalb des Schutznetzes nicht betreten werden und niemand durfte näher als 20 m an den Hang herangehen.

Im Oktober 2008 wurde ein erstes Experiment durchgeführt, nachdem die Beregnungsanlage erfolgreich installiert und an die Wasserversorgung angeschlossen war (Abb. 7). Nach einer Probephase wurden insgesamt 1700 mm Niederschlag (Mittel der Beregnungsfläche) innerhalb von 3.5 Tagen verregnet – eine Rutschung ereignete sich jedoch nicht. Es konnte aber der Sättigungszustand des Bodens ebenso erfolgreich beobachtet werden wie einige kleinere Deformationen im oberen rechten Bereich des Testhangs: Akustik-Sensoren, die von Gernot Michlmayr aus der Forschungsgruppe von Dani Ors (D-BAUG – STEP) am Testhang installiert worden waren, wiesen auf eine signifikante Scherbewegung während einer Phase mit erhöhter Beregnungsintensität (40 mm/h) hin. Diese Beobachtung wurde von den Messungen der Oberflächendeformationen (Photogrammetrie), wie auch von den Deformationsmessungen im Boden bestätigt.

Das Forschungsteam kam zu dem Schluss, dass eine Rutschung hauptsächlich aus zwei Gründen ausgeblieben war: Zum Einen wurde gerade im unteren Teil des Hanges, wo das anstehende Gestein sehr durchlässig war, der grösste Anteil des Wassers verregnet, so dass sich kein Hangwasserspiegel ausbilden konnte. Zum anderen stellte Massimiliano Schwarz (WSL) eine hohe



Abb. 4: Lage der Messinstrumente, der Berechnungsanlage und der Photogrammetrie-Kameras.



Abb. 5: Deformations – Messgerät.

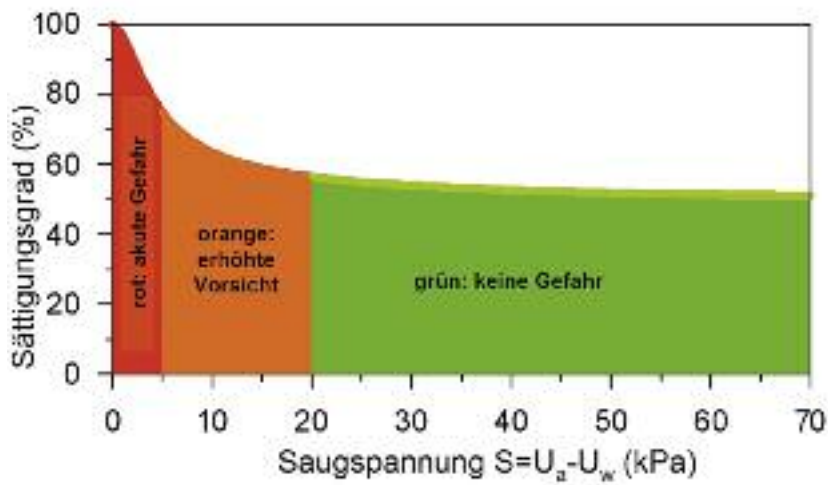


Abb. 6: Entscheidungsdiagramm für die Umsetzung des Sicherheitskonzeptes.

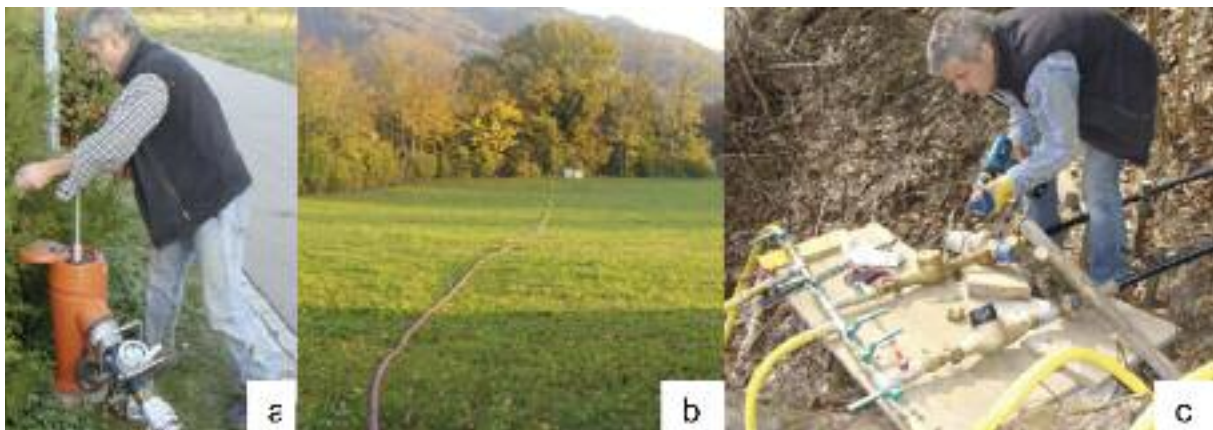


Abb. 7: a) Wasserversorgung aus einem Hydrant, b) Wasserschlauch zum Testhang, c) Wasseruhr und Hauptverbindungen zu den einzelnen Sprinklern.

stabilisierende Wirkung der Wurzeln fest – insbesondere im linken unteren Bereich des Testhangs. Aufgrund dieser Überlegungen wurden folgende Massnahmen für ein zweites Experiment getroffen: Nachdem noch einmal detailliert die unterschiedlichen hydraulischen Durchlässigkeiten des oberen und des (durchlässigeren) unteren Hangbereichs getestet wurden, wurde die Beregnungsanlage dahingehend verändert, dass die hauptsächliche Beregnung in den oberen Hangbereich und noch darüber hinaus verlagert wurde (Abb. 8), wo ein geringerer stabilisierender Einfluss der Vegetation erwartet wurde und wo sich eher ein Hangwasserspiegel über dem (undurchlässigeren) Gestein ausbilden würde. Zusätzlich wurden entlang den Rändern des Testhangs die Wurzeln bis in eine Tiefe von ca. 30 cm abgeschnitten. Einige zusätzliche hydrologische Messvorrichtungen wurden installiert und eine neuerliche Beregnung über eine Dauer von zwei Wochen im März 2009 geplant, um eine Sättigung des Bodens und das Auslösen einer Rutschung zu erreichen.

Vor dem Start dieses zweiten Experimentes wurde angenommen, dass eine Hangrutschung gegen Ende der ersten Woche ausgelöst würde, die im oberen rechten Teilbereich des Testhangs beginnen und dann nach rechts unten fliessen würde, mit einer Rutschoberfläche in einer Tiefe von ca. 1.5 m, 100–300 m³ Schutt verursachend.

Mit der neu ausgerichteten Beregnungsanlage wurde die Beregnung zunächst auf eine mittlere Intensität von 15 mm/h eingestellt, worauf im oberen Bereich des Testhangs eine schnelle Reaktion der Bodensättigung und der Saugspannungen erfolgte. Ein Hangwasserspiegel entwickelte sich, der während ungefähr 5 h weiter anstieg, bis ca. 1.5 m Tiefe erreichte und dann für die nächsten 10 h konstant auf diesem Niveau blieb. 15 h nachdem die Beregnung begonnen hatte, um 3:00 Uhr begann der recht obere Teilbereich des Hanges nach unten zu kriechen. Die Bewegung beschleunigte sich bis 3:23 Uhr, als sich ein Spalt parallel zum oberen Ende der beregneten Fläche öffnete und die Rutschung sich nach unten ausbreitete (Abb. 9). Dabei pflanzte sich die rechte Seite der Rutschung entlang der abgeschnittenen Wurzeln fort, während die linke Seite die Wurzeln quer abriess bzw. abstreifte (Abb. 10). Es dauerte nicht mehr als 36 Sekunden um 130 m³ Boden und Wurzeln zu bewegen, die zunächst nach unten links rutschten, dann von einem Baumstumpf nach rechts abgelenkt wurden, sich weiter beschleunigten und innerhalb von 12 weiteren Sekunden in das Schutznetz stürzten. Die unterhalb gelegene Forststrasse (Abb. 11) blieb unberührt. Wasser sickerte während einiger Minuten nach dem Ereignis aus der Abbruchkante und das Forschungsteam feierte „seinen Rutsch“, dessen Grösse und Form gut mit den Erwartungen und Vorhersagen übereinstimmte. Es zeigte sich jedoch auch, wie schwierig die Abschätzung des genauen Zeitpunktes einer Rutschung ist.

Die lokale Bevölkerung war auch erstaunt über die Tatsache, wie effektiv der zerklüftete Gesteinsuntergrund den Boden drainieren kann – wie bei einer Badewanne, wenn der Stöpsel herausgezogen ist! Das Experiment zeigte eindrücklich eine der Herausforderungen bei der Lokalisierung von potentiellen

Hanginstabilitäten. Wenn flachgründige Böden auf halbdurchlässigem Gestein vorhanden sind, können sich lokale Hangwasserspiegel entwickeln oder sogar ausfliessen und Rutschungen auslösen. Wertvolle Hinweise auf solche episodischen Quellen kann die Vegetation geben bzw. im Winter auch die Entstehung von Eis (Abb. 12). Das Experiment unterstrich auch den grossen positiven Effekt der Vegetation auf die Hangstabilität, wobei v.a. Baumwurzeln tiefgründige Verankerungen darstellen können, was durch das Experiment eindrücklich gezeigt und quantifiziert werden konnte.

Literatur

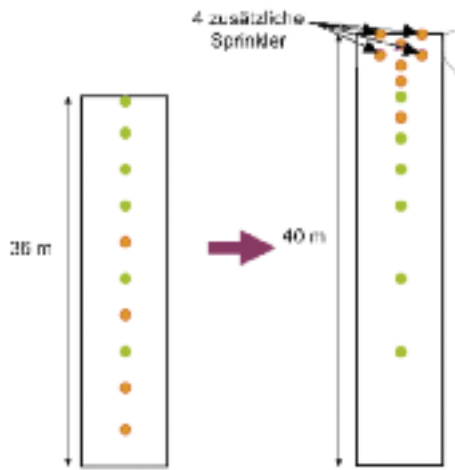
- Askarinejad, A. (2009). A method to locate the slip surface and measuring subsurface deformations in slopes. 4th International Young Geotechnical Engineers' Conference, Alexandria, Egypt: 171-174.
- Casini, F., Jommi, C., Springman, S.M. (2010). A laboratory investigation on an undisturbed silty sand from a slope prone to landsliding. *Granular Matter*, in print, DOI: 10.1007/s10035-010-0182-y.
- Colombo L. (2009). Large shear box for analysing strength mobilisation in unsaturated conditions. Master Thesis, Politecnico di Milano.
- Minder, P. (2008). Shear resistance of silty sand from the Rüdlingen monitoring and triggering test site. Semester thesis, ETH Zurich.
- Springman, S.M., Kienzler, P., Casini, F., Askarinejad, A. (2009). Landslide triggering experiment in a steep forested slope in Switzerland. *Proc. of the 17th Intern. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Engin.*, Egypt, 5-9 Oct. IOS Press.
- Teysseire, P. (2006). Geotechnische Eigenschaften von Moränen. PhD dissertation ETH Zurich.
- Thielen, A. (2007). Einfluss der Bodensättigung auf die Stabilität von Hängen. PhD dissertation ETH Zurich.

Danksagung

Beiträge zu diesem Forschungsprojekt wurden vom CCES im Rahmen des TRAMM – Projektes und vom ETH Forschungsfonds dankend erhalten. Geobrug AG, Kanton Schaffhausen und Terr-Bohr AG sind als Sponsoren gleichfalls zu danken.

Wir sind der Gemeinde Rüdlingen sehr dankbar, insbesondere Frau Käty Leutenegger (Gemeinde-präsidentin), Herr Martin Kern (Flurreferent), der Feuerwehr, den Bauern, den Förstern, und der Bevölkerung von Rüdlingen und Buchberg.

Fatih Akdeniz, Mengia Amberg, Harald Bollinger, Rico Borellini, Cornelia Brönnimann, Louis Bugnion, Lorenzo Colombo, Matthias Denk, Sara Durot, Alfred Ehrbar, John Eichenberger, Francesca Gambazzi, Ralf Herzog, Martin Huber, Hilmar Ingensand, Markus Iten, Elena Kapogianni, Thomy Keller, Kubilay Kelesoglu, Lyesse Laloui, Jan Laue, Peter Lehmann, Anita Meyer, Gernot Michlmayr, Ferney Morales, Mathieu Nuth, Dani Or, Heinz Richner, Christian Rickli, René Rohr, Andreas Schmid, Massimiliano Schwarz, Manfred Stähli, Karl Steiner, Barbara Suski, Laurent Tacher, Axel Volkwein, Albrecht von Bötticher, Corinna Wendeler, Felix Wietlisbach und Adrian Zweidler trugen zum erfolgreichen Gelingen des Projektes bei.



▲ Abb. 8: Positionen der einzelnen Sprinkler: Oktober 2008 (links); März 2009 (rechts).

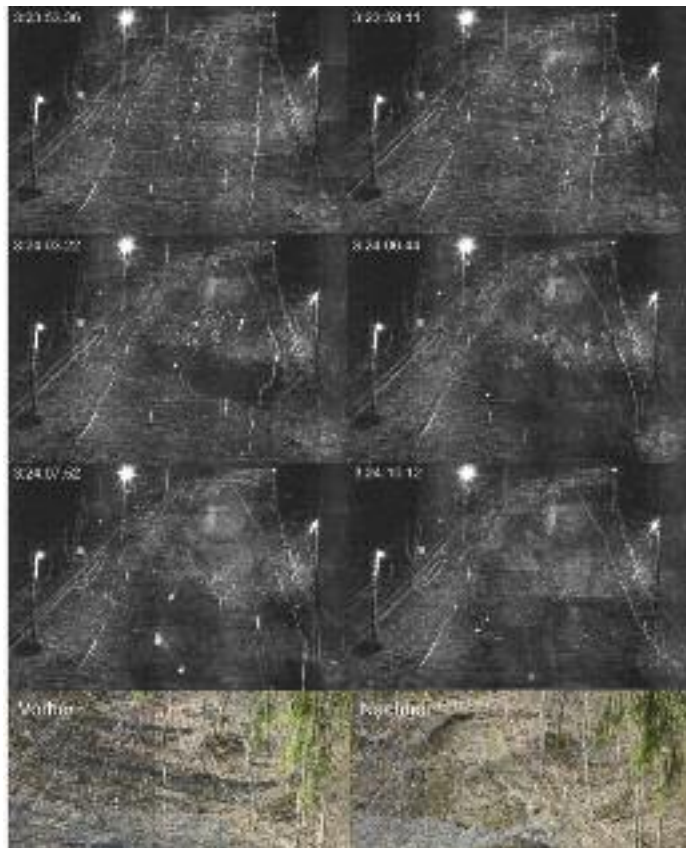


Abb. 9: Abfolge der Bewegungen im oberen Teil des Testhangs! ▶
 1 Vgl. Video auf:
http://www.cces.ethz.ch/projects/hazri/tramm/film_landslide_ruedlingen.wmv



Abb. 10: a) Abgestreifte und b) abgebrochene Wurzeln an der Seite der Rutschfläche.



Abb. 11: GEOBRUGG - Schutznetz gefüllt mit Schutt.



Abb. 12: Gefrorener Quellhorizont.