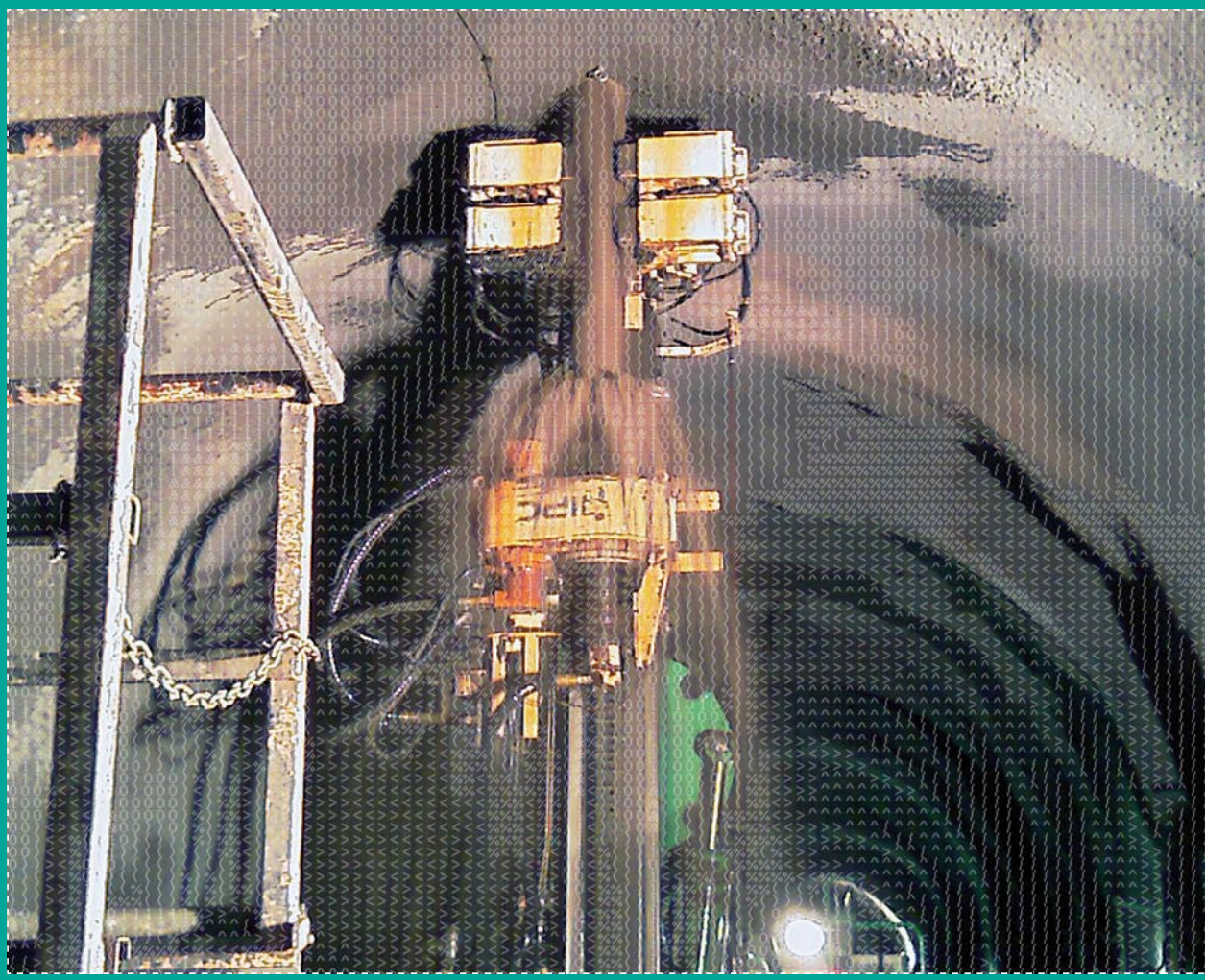
> Rutschungen: Hydrogeologie und Sanierungsmethoden durch Drainage

Leitfaden



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

> Rutschungen: Hydrogeologie und Sanierungsmethoden durch Drainage

Leitfaden

Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU
Bern, 2010

Impressum

Herausgeber
Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autor
Aurèle Parriaux, Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (GEOLEP), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Mitautoren
Christophe Bonnard, Laboratoire de mécanique des sols (LMS), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, derzeit unabhängiger Experte
Laurent Tacher, GEOLEP, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Mit Beiträgen von
Jörg Häberle, Abteilung Naturgefahren, Kanton Bern
Bernard Loup, BAFU
Boris Matti, GEOLEP
Hugo Raetzo, BAFU
Jean-Pierre Tripet, Hydrogeologe, Bevaix
Pascal Turberg, GEOLEP

Autoren der Fallstudien im Anhang
A1: Riccardo Bernasconi, Dr. Bernasconi AG, Sargans, und Laurent Tacher, GEOLEP
A2: Hermann Rovina, Rovina und Partner AG, Varen
A3: Gabriele Bianchetti, ALPGEO Sàrl, Siders
A4: Hermann Rovina, Rovina und Partner AG, Varen
A5: Ueli Gruner, Kellerhals + Haefeli AG, Bern
A6: Gabriele Bianchetti und Germain Crestin, ALPGEO Sàrl, Siders
A7: Christophe Bonnard, LMS/EPFL, derzeit unabhängiger Experte, und Aurèle Parriaux, GEOLEP
A8: Luca Bonzanigo, geolog.ch SA, Bellinzona

Projektmanagement, Begleitung BAFU
Ronald Kozel, Abteilung Hydrologie
Bernard Loup, Hugo Raetzo, Abteilung Gefahrenprävention

Expertengruppe «Hydrogeologie und Rutschungen»
Aurèle Parriaux, Vorsitz, GEOLEP; Riccardo Bernasconi, Dr. Bernasconi AG, Sargans; Gabriele Bianchetti, ALPGEO Sàrl, Siders; Christophe Bonnard, LMS/EPFL, derzeit unabhängiger Experte; Alberto Colombi, Dr. Baumer SA, Ascona; Jörg Haeberle, Abteilung Naturgefahren, Kanton Bern; Ronald Kozel, BAFU, Bern; François Matthey und Philippe Hohl, SESA, Lausanne; Hugo Raetzo, BAFU, Bern; Hermann Rovina, Rovina und Partner AG, Varen; Laurent Tacher, GEOLEP; Jean-Pierre Tripet, Hydrogeologe, Bevaix; Pascal Turberg, GEOLEP; Roland Wyss, Dr. Roland Wyss GmbH, Frauenfeld

Zitierung
Parriaux A., Bonnard C., Tacher L. 2010: Rutschungen: Hydrogeologie und Sanierungsmethoden durch Drainage. Leitfaden. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1023: 128 S.

Übersetzung
Emanuel Balsiger, Rothenfluh

Fachliches Lektorat
Dr. Roland Wyss GmbH, Frauenfeld

Sprachliches Lektorat
Jacqueline Dougoud, Zürich

Gestaltung
Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelbild
Entwässerungsstollen unter der Rutschung La Frasse (VD): Wasseraustritt bei der Bohrung eines Drainagerohrs an der Stollendecke
Foto: Grégory Grosjean, BEG, Aproz

Bezug der gedruckten Fassung und PDF-Download
BBL, Vertrieb Bundespublikationen, CH-3003 Bern
Tel. +41 (0)31 325 50 50, Fax +41 (0)31 325 50 58
verkauf.zivil@bbl.admin.ch
Bestellnummer: 810.300.120d
Preis: CHF 28.– (inkl. MWSt)
www.umwelt-schweiz.ch/uw-1023-d

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar (Original).

© BAFU 2010

> Inhalt

Abstracts **5**
Vorwort **7**
Zusammenfassung **8**
Einleitung **10**

1 Hydrogeologie von Rutschungen **14**
1.1 Hoher hydraulischer Gradient 15
1.2 In ihrer Geometrie und in ihren Eigenschaften komplexe Milieus 16
1.3 Oft sehr unterschiedliche Durchlässigkeit 17
1.4 Schwankungen der Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Bewegung 17
1.5 Auftreten von schwebendem Grundwasser 18
1.6 Starker Einfluss der ungesättigten Zone 19
1.7 Stark verlaufsabhängige Reaktionen 19

2 Hydrogeologische Parameter und Instrumentierung **20**
2.1 Messung der Zuflüsse 21
2.1.1 Niederschläge – Niederschlagsmessung 21
2.1.2 Niederschläge – Ermittlung der effektiven Versickerung 22
2.1.3 Versickerung von Bächen 24
2.1.4 Unterirdischer Grundwasserzufluss 24
2.2 Messung des Grundwasserflusses 24
2.2.1 In-situ-Messung des Potenzials und des Drucks 24
2.2.2 Messung der In-situ-Wasserflüsse mit Tracern 28
2.3 Messung der Abflüsse 29

3 Hydrogeologisches Verhalten: vom konzeptuellen Modell zur numerischen Modellierung **31**
3.1 Dimensionalität der Modelle 31
3.2 Fliessregime 32
3.3 Fliessverhältnisse 33
3.4 Massstab der Modelle 34
3.5 Charakteristiken der numerischen Modellierungsprogramme 36

4 Überblick über die Beziehungen zwischen Hydrogeologie und Bewegung **39**
4.1 Schnelle Reaktion 39
4.2 Komplexe Reaktion 40
4.3 Von hydrologischen Schwankungen unbeeinflusstes Verhalten 41

5 Sanierung von Rutschungen durch Fassen und Ableiten des Wassers **43**
5.1 Sanierungsgrundsätze und -konzepte 43
5.2 Eingriffe beim Oberflächenwasser 46
5.2.1 Offene Sammelgräben für das Oberflächenwasser 47
5.2.2 Korrekturen von Fliessgewässern 48
5.3 Drainagegräben 51
5.4 Tiefendrainage 53
5.4.1 Subhorizontale Drainagebohrungen 53
5.4.2 Schirm aus vertikalen Filterbrunnen 55
5.4.3 Stollen mit strahlenförmig angelegten Drainagebohrungen 58
5.5 Wirkung des Waldes auf Rutschungen 61
5.5.1 Wirkungsprozesse 62
5.5.2 Stellenwert der Waldwirkung und Synthese 64
5.6 Zusammenfassung der Sanierungstechniken 66

6 Planung von Sanierungsprojekten **67**
6.1 Ablauf eines Sanierungsprojekts 67
6.2 Beurteilung der Prozesse 68
6.3 Risikoanalyse und Schutzziele 68
6.4 Untersuchung und vergleichende Prüfung der Varianten 69
6.5 Bereinigung des Bauprojekts, öffentliche Auflage 70
6.6 Bauarbeiten 71
6.7 Monitoring nach Ausführung, Wirksamkeits-kontrolle, Unterhalt 71
6.8 Schlussfolgerungen Planung 72

Literatur **73**

Anhang **75**

A1 Rutschung Triesenberg (FL): Monitoring der hydrogeologischen Parameter, Instrumentierung und Modellierung 76

A2 Felsrutschung Medji, St. Niklaus (VS): Monitoring der hydrogeologischen Parameter, Instrumentierung und Modellierung 82

A3 Rutschung Les Peillettes (VS): Beispiel einer lokalen Stabilisierung durch Drainage und Ableitung des Oberflächen- und Grundwassers 89

A4 Spontanrutschung und Hangmure Binu, Hohtenn (VS): Beispiel einer Stabilisierung durch Quellfassungen mit Drainage in geringer Tiefe 95

A5 Rutschung Walkere, St. Stephan (BE): Beispiel einer Stabilisierung durch Drainagegräben 101

A6 Rutschung Montagnon (VS): Beispiel einer Stabilisierung durch gravitative Entwässerung mit tiefen Drainagebohrungen 107

A7 Rutschung Arveyes (VD): Beispiel einer Stabilisierung durch Filterbrunnen mit Pumpen 113

A8 Rutschung Campo Vallemaggia (TI): Beispiel einer Stabilisierung mittels Entwässerungsstollen 119

Verzeichnisse **126**

> Abstracts

Hydrogeological conditions play an important role in landslides as slope instability is often triggered by groundwater. A hydrogeological understanding of the landslide behaviour enables the stabilisation of slopes through drainage actions. This guide presents the methods for the monitoring of hydrogeological parameters and modelling of groundwater flow. It summarises the relationship between hydrogeology and landslide movements, and describes the various possible drainage systems. The demonstration is supported by analyses of some representative case studies. The guide is primarily aimed at professional geologists.

Keywords:
hydrogeology, landslide, remediation measures, stabilisation, drainage, modelling

Bei Rutschungen spielen die hydrogeologischen Verhältnisse eine wichtige Rolle, da das Grundwasser häufig Auslöser für die Instabilität ist. Werden die Zusammenhänge zwischen Hydrogeologie und einer Rutschung verstanden, so wird es möglich, mit gezielten Drainagemassnahmen einen Hang zu sanieren. Der vorliegende Leitfaden zeigt auf, mit welchen Methoden die hydrogeologischen Parameter erfasst und die Grundwasserströmung modelliert werden können. Er fasst die Beziehungen zwischen Hydrogeologie und Massenbewegungen zusammen und beschreibt die verschiedenen möglichen Drainagemassnahmen. Der Text wird ergänzt durch die Analyse einiger repräsentativer Fälle. Der Leitfaden richtet sich in erster Linie an Praxisgeologen.

Stichwörter:
Hydrogeologie, Rutschung, Sanierungsmassnahmen, Stabilisierung, Drainage, Modellierung

Les conditions hydrogéologiques jouent un rôle majeur dans l'activité des glissements de terrain, l'eau souterraine agissant souvent comme déclencheur de l'instabilité. Moyennant la compréhension du fonctionnement hydrogéologique d'un glissement, il est possible de procéder à son assainissement par des mesures de drainage. Le présent guide expose les méthodes d'acquisition des paramètres hydrogéologiques et de modélisation des écoulements d'eau souterraine, synthétise les relations entre hydrogéologie et mouvement du terrain, et décrit les différentes mesures de drainage possibles. L'exposé est étayé par l'analyse de quelques cas représentatifs. Le guide s'adresse prioritairement aux géologues praticiens.

Mots-clés:
hydrogéologie, glissement de terrain, mesures d'assainissement, stabilisation, drainage, modélisation

Le condizioni idrogeologiche svolgono un ruolo importante nei processi franosi in quanto le acque sotterranee sono sovente il fattore scatenante dell'instabilità. Se si capisce il funzionamento di una frana dal punto di vista idrogeologico è possibile procedere al risanamento del pendio mediante misure di drenaggio. La presente guida espone i metodi di rilevamento dei parametri idrogeologici e di modellizzazione dei flussi delle acque sotterranee, sintetizza le relazioni fra idrogeologia e movimento e descrive le misure di drenaggio possibili. La pubblicazione è completata da un'analisi di casi rappresentativi. La guida è destinata in primo luogo ai geologi operanti sul terreno.

Parole chiave:
idrogeologia, frana, misure di risanamento, stabilizzazione, drenaggio, modellizzazione

> Vorwort

Gemäss Bundesgesetz über den Wald vom 4. Oktober 1991 müssen die Kantone Anrissgebiete von Lawinen sowie Steinschlag- und Rutschgebiete sichern und dabei möglichst naturnahe Methoden anwenden. Es gilt in erster Linie, mögliche Schäden zu verhindern bzw. zu begrenzen. Die Raumplanung und die Bodennutzung haben dabei die Naturgefahren zu berücksichtigen; kantonale Gefahrenkarten dienen als Hauptgrundlage für die Umsetzung solcher Massnahmen. Wo bereits eine schutzwürdige Bodennutzung besteht oder wo sich eine besondere Zweckbestimmung als unvermeidlich erweist, müssen technische Schutzmassnahmen ergriffen werden. Der Bedarf und das Ausmass der Eingriffe werden aufgrund einer Risikoanalyse festgelegt. Schliesslich können Risiken, die nach Ausführung der Raumplanungs- und Schutzmassnahmen weiterhin bestehen, auch durch organisatorische Massnahmen reduziert werden.

Die in den letzten Jahrzehnten gesammelten Erfahrungen, die umfangreichen Forschungsarbeiten sowie die Fortschritte im Bereich der Modellierung haben gezeigt, dass dem Grundwasser als auslösendes Element der Hanginstabilitäten eine Schlüsselrolle zukommt. Die vorliegende Publikation füllt eine Lücke, indem sie in didaktischer Weise die Möglichkeiten aufzeigt, mit welchen Massnahmen Grundwasserfliesswege verändert und damit Gefahren verringert werden können. Sie hat zum Ziel, anhand von geeigneten Methoden und konkreten Beispielen die Möglichkeiten des Einsatzes der wichtigsten Sanierungsmassnahmen in Rutschungen durch Fassen und Drainage von Wasser zu verdeutlichen.

Der Leitfaden wurde durch das *Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement* der *Ecole polytechnique fédérale de Lausanne* (GEOLEP-EPFL), mit externen Beiträgen und im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) erstellt. Eine Arbeitsgruppe mit Fachleuten des BAFU, der EPFL, der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie, der Schweizerischen Fachgruppe für Ingenieurgeologie, der Kantone und privater Beratungsbüros begleitete das Projekt.

Der Leitfaden richtet sich in erster Linie an Expertinnen und Experten sowie an Beauftragte des Bundes, der Kantone, der Gemeinden und anderer öffentlicher oder privater Körperschaften, die für Sanierungsmassnahmen verantwortlich sind. Er soll auch politischen Instanzen als Entscheidungsgrundlage bei Sanierungsprojekten oder raumplanerischen Fragestellungen dienen.

Andreas Götz
Vizedirektor
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

> Zusammenfassung

Bedeutung von Rutschungen

Zahlreiche Regionen der Schweiz sind von aktiven oder latenten Hanginstabilitäten betroffen. Der vorliegende Leitfaden beschäftigt sich mit Rutschungen, einem Phänomen, das sowohl in Locker- als auch in Festgesteinen auftritt. Es handelt sich meistens um kontinuierliche und langsame Bewegungen, die vor allem für Sachwerte (Gebäude und Infrastrukturen) eine Gefahr darstellen. Vorübergehende Beschleunigungsphasen oder plötzliche Veränderungen des Gleichgewichts können gelegentlich auch zu akuten Krisensituationen führen.

Entscheidende Rolle des Wassers

Die Erfahrungen, welche bei der Zustandsbeurteilung von Rutschungen gemacht werden konnten, haben die entscheidende Rolle des Wassers als Auslöser für Rutschungen aufgezeigt. Der Einfluss des Wassers ist vielfältig und manifestiert sich insbesondere durch Einsickerung von der Oberfläche, unterirdische Fliessvorgänge und Erosion am Hangfuss. Die Möglichkeit, insbesondere mithilfe von Drainagemethoden die Wirkung des Wassers zu beeinflussen, ist also ein zentrales Element bei der Sanierung von Rutschungen.

Verständnis der Hydrogeologie einer Rutschung

Sanierungsmassnahmen durch Drainage können nicht ohne gründliche Vorabklärungen ergriffen werden, denn die Gefahr zu scheitern ist zu gross; sie müssen deshalb auf einem möglichst umfassenden Verständnis der hydrogeologischen Verhältnisse und Einflüsse beruhen. Die ersten Kapitel des Leitfadens präsentieren daher eine vollständige Methodik der hydrogeologischen Untersuchung von Rutschungen (Kapitel 1), mit den zwei entscheidenden Phasen – der Untersuchung des Hangs (Kapitel 2) und der Modellierung (Kapitel 3).

Hydrogeologische Parameter und Instrumentierung

Der hydrogeologischen Untersuchung geht die Erstellung eines Konzepts voraus, in welchem realistische Annahmen über die hydrogeologischen Verhältnisse in den Grundwasserleitern eines Rutschhanges getroffen werden (konzeptuelles Modell). Dieses Modell berücksichtigt die lithologischen und geometrischen Eigenschaften der geologischen Einheiten, die Grundwasserfliessverhältnisse sowie die hydrologischen Verhältnisse und die Reaktion des Systems. Das konzeptuelle Modell bestimmt auch die Art der Datenerfassung sowie die Instrumentierung, die zum Einsatz gebracht wird (Kapitel 2). Drei Elemente des hydrogeologischen Systems müssen analysiert und gemessen werden: der Wasserzufluss (Versickerung von der Oberfläche, Speisung von den Rändern oder vom Untergrund her), der Wasserfluss (Messung der Strömungsverhältnisse im Untergrund) und der Austritt des Wassers (hydraulisches und geochemisches Regime des Abflusses).

Hydrogeologische Modellierung

Die hydrogeologische Modellierung (Kapitel 3) ermöglicht, allenfalls kombiniert mit geomechanischen Modellen, eine Validierung oder Verfeinerung des konzeptuellen Modells. Auf diesem Weg lassen sich auch die Mechanismen innerhalb einer Rutschung analysieren, sei es im aktuellen Zustand oder in Bezug auf die zukünftige Entwicklung (z. B. das mögliche Verhalten im Zusammenhang mit dem Klimawandel). Diese Modelle werden anschliessend verwendet, um Stabilisierungsmassnahmen zu

entwickeln und um deren Wirksamkeit zu testen. In allen Fällen, in denen das menschliche oder materielle Schadenpotenzial gross ist, stellen Modelle ein immer häufiger angewendetes Hilfsmittel dar, welches als Entscheidungshilfe bei der Bewältigung von Krisen und der Umsetzung von Präventionsmassnahmen zum Einsatz kommt.

Die zweidimensionale Modellierung (2-D) eines in der Natur dreidimensionalen Systems (3-D) stellt eine Vereinfachung dar, welche in Bezug auf schnelle Vorbereitung und Durchführung der Berechnungen durchaus Vorteile bietet. Oft beruht sie jedoch auf Hypothesen, mit welchen keine repräsentativen Ergebnisse erzielt werden können. Deshalb sollte, um der Komplexität und Veränderbarkeit des hydrogeologischen Systems Rechnung zu tragen, nach Möglichkeit in 3-D modelliert werden.

Beziehungen zwischen Hydrogeologie und Bewegung

Aufgrund der Vielfalt der geologischen Verhältnisse stehen die Bewegungen einer Rutschung in unterschiedlichster Weise mit dem Grundwasser in Zusammenhang: Die Reaktion auf Niederschlagsereignisse kann einfach und direkt erfolgen; die Reaktion kann aber auch durch komplexe Prozesse im Untergrund gesteuert werden, welche sich auf den Grundwasserfluss im Hang auswirken; es ist schliesslich auch möglich, dass Hangbewegungen unbeeinflusst von Niederschlägen ablaufen. Das Verständnis dieser Zusammenhänge ist im Hinblick auf die Entwicklung einer geeigneten Sanierungsmassnahme grundlegend (Kapitel 4).

Sanierungsmassnahmen durch Drainage

Es gibt verschiedene Methoden und Techniken, mit welchen zur Stabilisierung einer Rutschung auf die hydrologischen und hydrogeologischen Verhältnisse eingewirkt werden kann. Sie lassen sich nach dem Bereich kategorisieren, in dem sie ihre Wirkung entfalten: an der Oberfläche (z. B. Sammelgräben für das Oberflächenwasser), in geringer Tiefe (z. B. Drainagegräben) und schliesslich in grösserer Tiefe (z. B. Stollen mit strahlenförmig angelegten Drainagen). Kapitel 5 führt die wichtigsten Hilfsmittel, die dem Geologen zur Verfügung stehen, auf. Es beschreibt für jede Methode das Funktionsprinzip, die Bedingungen für den Einsatz und den Betrieb, die zu erwartende Wirkung, die Dauerhaftigkeit und die Anforderungen an den Unterhalt. Der Wald beeinflusst den Wasserkreislauf und kann bei Sanierungen ebenfalls eine wichtige Rolle spielen.

Planung von Sanierungsprojekten

Ein Sanierungsprojekt wird im Rahmen eines Prozesses realisiert, welcher eine optimale Lösung generieren soll. Bei den verschiedenen erforderlichen Schritten stehen vor allem die Festlegung des zu erreichenden Ziels und die dafür notwendigen Massnahmen bei möglichst geringem Mitteleinsatz im Vordergrund. Dabei ist eine maximale Wirksamkeit bei minimalen Auswirkungen auf die Umwelt anzustreben. Kapitel 6 beschreibt die verschiedenen Schritte des Verfahrens unter Berücksichtigung der bestehenden Vorschriften und des Rahmens, der durch die Neugestaltung des Finanzausgleichs und der Aufgabenteilung zwischen Bund und Kantonen (NFA) gegeben ist.

Fallstudien (Anhang)

Das Vorgehen von der hydrogeologischen Untersuchung bis zur Ausführung von Drainagemassnahmen wird anhand von acht Fallstudien illustriert. Dabei wird die Umsetzung von Massnahmen unter verschiedenen Rahmenbedingungen aufgezeigt.

> Einleitung

Bevor auf die Bedeutung des Verhaltens von Grundwasser in der Dynamik von instabilen Hängen und die Ziele dieses Leitfadens eingegangen wird, seien einige grundsätzliche Erläuterungen im Zusammenhang mit Rutschungen vorangestellt. Eine detaillierte Darlegung des Prozesses «Rutschung» ist nicht Gegenstand dieser Publikation; diesbezüglich sei auf die Empfehlungen und Vollzugshilfen des Bundes (BRP et al. 1997, BAFU 2010, mit Glossar) verwiesen.

Bedeutung von Massenbewegungen

In der Schweiz gibt es zahlreiche aktive oder latente Rutschgebiete, deren Gesamtausdehnung auf über 6 % der Landesfläche geschätzt wird (Noverraz und Bonnard 1990; Bonnard 2006a). Instabile Hänge stellen eine weit verbreitete Gefahr dar; dies, obschon sie sich in vielen Fällen als regelmässige und langsame Bewegungen mit gelegentlichen Phasen der Beschleunigung manifestieren und nicht durch plötzliche, zu Krisensituationen führende Schübe.

Rutschungen sind eine der bedeutendsten Arten von Massenbewegungen im weitesten Sinne (englisch *landslides*); weitere Phänomene bilden etwa Steinschlag, Felsstürze, Hangmuren, Einstürze bzw. Hakenwurf (z. B. Cruden 1991, Cruden & Varnes 1996).

Merkmale von Rutschungen

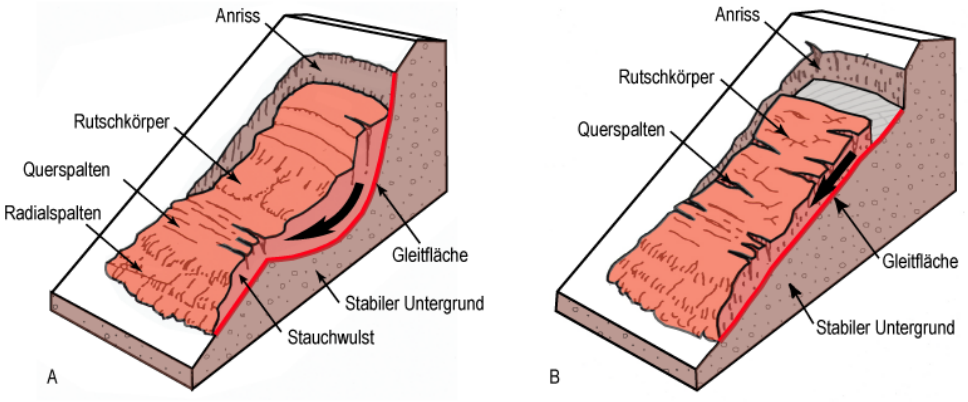
Die wichtigsten Merkmale von Rutschungen sind:

- Vorhandensein einer oder mehrerer Rutschflächen von geringer Mächtigkeit oder eines Bereichs mit stark umgearbeitetem Material, welche den anstehenden Untergrund zusammenhängend von der Gleitmasse trennen; die Gleitfläche kann gewölbt («Rotationsrutschung», Abb. 1A) oder eben («Translationsrutschung», Abb. 1B) sein und kann alle Übergangsformen sowie Kombinationen aufweisen;
- Bewegung von Lockermaterial (Deckschicht, quartäre Ablagerungen) und/oder von Fels («Felsrutschung»); die Gleitschicht oder die Anrisszone kann im Lockergestein, im Fels oder am Übergang Lockergestein/Fels lokalisiert sein;
- sehr unterschiedliche Dimensionen, sowohl was die Fläche (einige Dutzend m² bis mehrere km²), die Mächtigkeit (weniger als 2 m bis mehrere Hundert m) oder das Volumen (einige m³ bis mehrere Milliarden m³) anbetrifft;
- in der Regel variables Ausmass der Bewegung mit der Zeit (Aktivität; Abb. 2). Langfristig stellt eine Rutschung eine regelmässige Verschiebung dar, gemessen in mm/Jahr bis m/Jahr (grüne Linie in Abb. 2). Im Detail beobachtet man oft eine Folge von unterschiedlichen Geschwindigkeiten kürzerer oder längerer Dauer (mehrere Stunden bis mehrere Monate; blaue Linie in Abb. 2). Solche Geschwindigkeitsänderungen können zyklisch auftreten und zum Beispiel an das übliche Niederschlagsmuster gekoppelt sein. Besondere auslösende Momente können demgegenüber zu einer aussergewöhnlichen Beschleunigung führen; man spricht dann von

einer «Reaktivierung». Die Aktivität und deren Veränderung bilden das wichtigste Kriterium für die Erfassung des Gefahrenpotenzials, das eine Rutschung darstellt (BAFU 2010).

Abb. 1 > Rotationsrutschung (A) und Translationsrutschung (B)

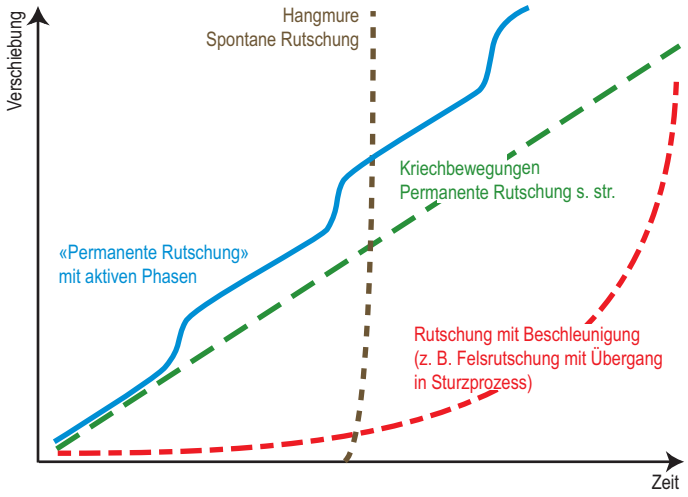
Die rutschende Masse und der stabile Untergrund können aus Lockergestein und/oder aus Fels bestehen.



geändert nach USGS 2004

Abb. 2 > Zeitlicher Verlauf der Bewegung bei verschiedenen Rutschungstypen

Die blaue und die grüne Linie entsprechen den sogenannten permanenten Rutschungen. Um Geschwindigkeitsänderungen aufzuzeigen, sind kontinuierliche Messungen nötig; Einzelmessungen können zu einer Fehlinterpretation des dynamischen Verhaltens einer Rutschung führen.



geändert nach PLANAT 2009

Ursachen von Rutschungen

Die Auslösung einer Rutschung hängt von mehreren Faktoren ab. Man unterscheidet üblicherweise zwischen den Faktoren, welche die Grunddisposition für eine Rutschung vorgeben (Geologie, Präsenz von Grundwasser, Hangneigung usw.) und den Auslösefaktoren, welche die Destabilisierung provozieren (Niederschläge, Zunahme der Grundwasserzirkulation, Erhöhung des Grundwasserfliessdrucks oder des Wassergehalts, Erosion am Hangfuss usw.). Dem Wasser kommt auf unterschiedliche Weise eine zentrale Bedeutung für die in einer Rutschung ablaufenden Prozesse zu (z. B. Bonnard 2006b, Parriaux 2009). Die Möglichkeit, die Wirkungen des Wassers zu beeinflussen, ist deshalb ein wichtiger Faktor bei der Sanierung von Rutschungen.

Interventionsmethoden

Üblicherweise werden Rutschungen mithilfe geotechnischer Massnahmen saniert, welche den Hang wieder ins Gleichgewicht bringen sollen. Dabei wird die Stabilisierung durch Verbauungen erreicht, welche punktuell oder flächig eine rückhaltende Kraft ausüben. Der wissenschaftliche Ansatz ist in diesem Fall im Wesentlichen geotechnisch. Die Erfahrung hat gezeigt, dass solche Massnahmen häufig langfristig nur begrenzte Wirksamkeit haben und bei grossen Rutschungen nur schwer anzuwenden sind.

Seit Kurzem interessiert sich die Forschung näher für das Verhalten des Grundwassers in instabilen Hängen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die hydrogeologischen Verhältnisse und deren Veränderungen bei der Aktivität der Rutschungen eine wichtige Rolle spielen. So wie seismische Erschütterungen einen Hang destabilisieren können, so wirkt Grundwasser häufig als auslösendes Element für eine Instabilität. Der Mensch hat zwar keine Möglichkeit, auf ein Erdbeben einzuwirken; das Grundwassersystem in einem Hang dagegen kann er sehr wohl beeinflussen. Er ist in der Lage, Grundwasserströmungen durch verschiedene Massnahmen zu verändern und damit das Ausmass von Bewegungen und der davon ausgehenden Gefährdung zu reduzieren. Dieser Ansatz, Rutschungen zu sanieren, erschliesst zahlreiche praktische Anwendungen, deren Potenzial deutlich höher ist als das einer mechanischen Verbauung. Kürzlich realisierte Beispiele zeigen, dass mit Eingriffen in das hydrogeologische System eines instabilen Hangs mit Erfolg eine Verlangsamung der Bewegungen, ja sogar eine Stabilisierung der Rutschung bewirkt wird. Im Unterschied zu geotechnischen Massnahmen, die in der Regel eine lokale Stabilisierung anstreben, erlauben hydrogeologische Interventionen sehr oft eine bedeutende Verbesserung der Situation in der gesamten Rutschung. Der hydrogeologische Eingriff besitzt weiterhin den Vorteil, dass auf direkte Weise verschiedene Szenarien des möglichen Klimawandels mit den entsprechenden Effekten studiert werden können, insbesondere die mögliche Zunahme von Niederschlagsereignissen (siehe z. B. Anhang A1). Er stellt so einen wichtigen Beitrag zur Prävention gegen Rutschungsgefahren dar.

Es ist festzustellen, dass neue wissenschaftliche Kenntnisse im Bereich der Hydrogeologie instabiler Hänge noch nicht genügend in die Praxis umgesetzt worden sind. Deshalb bildete das *Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement* der

Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (GEOLEP-EPFL) im Jahre 2000 eine Arbeitsgruppe Hydrogeologie und Rutschungen. Nach vier Jahren Arbeit wurde diese Arbeitsgruppe vom BAFU beauftragt, ihre Ergebnisse im vorliegenden Leitfaden zu publizieren.

Ziel des Leitfadens

Das Ziel dieses Leitfadens ist es, mit einer breit angelegten Analyse von typischen Fallbeispielen aus der Schweiz Praxisgeologinnen und -geologen ein Werkzeug in die Hand zu geben. Die Publikation soll zum besseren Verständnis hydrogeologischer Mechanismen im Vorfeld von Sanierungsmassnahmen führen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden Empfehlungen abgegeben, wie eine Rutschung zu erkunden und zu instrumentieren ist, wie daraus die Grundwasserverhältnisse modelliert werden und wie die Unsicherheiten bei den Kenntnissen der lokalen Geologie und deren Auswirkungen auf die hydrogeologischen Verhältnisse zu bewerten sind. Der Leitfaden stellt anschliessend die verschiedenen möglichen Massnahmen zur Stabilisierung einer Rutschung vor. Er zeigt auf, wie sich deren Wirksamkeit beurteilen lässt, bevor sie in die Realität umgesetzt werden, indem die Zusammenhänge mit der mechanischen Modellierung herausgearbeitet werden. Massnahmen und Techniken für die mechanische Verbauung einer Rutschung werden in diesem Leitfaden nicht behandelt.

Dieser ganzheitliche Ansatz kann sehr konkrete Auswirkungen darauf haben, wie hydrogeologische Risiken ermittelt werden sollen, und bildet eine Grundlage für die Wahl der Sanierungsvarianten. Durch die Verbesserung der Analyse und der Effizienz der Massnahmen können bei der Sanierung zahlreicher die Bevölkerung und Infrastruktur gefährdender Rutschungen beträchtliche Mittel eingespart werden.

1 > Hydrogeologie von Rutschungen

Die Untersuchung der Hydrogeologie von Rutschungen beruht auf der vorgängigen Festlegung eines als realistisch angenommenen Modells für die Eigenschaften und das Verhalten des Grundwassers in einem Hang (konzeptuelles Modell). Dieses berücksichtigt die lithologischen und geometrischen Eigenschaften der geologischen Einheiten, die Fliessverhältnisse des Grundwassers, die hydrologischen Verhältnisse und die Reaktion des Systems.

Kapitel 1 bis 3 behandeln die vollständige Methodik der hydrogeologischen Untersuchung von Rutschungen. Diese umfasst zwei entscheidende Phasen: die Erkundung und die Modellierung. Im spezifischen Kontext von Hangrutschungen ist das Ziel der Hydrogeologie, die Wirkung des Grundwassers in der instabilen Masse zu verstehen, damit Bauten oder Massnahmen geplant werden können, die zu einer Verbesserung der Stabilität führen.

Der hydrogeologische Ansatz bedingt, dass in allen Phasen der Erkundung (Vorstudie, Erkundung durch Bohrungen, Instrumentierung) der Geologe bzw. die Geologin ein Modell der Eigenschaften und des Verhaltens des Grundwassers im Hang definiert: das konzeptuelle Modell. Dieses bestimmt die Art der Untersuchung, gegebenenfalls die numerische Modellierung und schliesslich die Konzeption der Sanierungsmassnahmen.

Die Erstellung eines konzeptuellen Modells beinhaltet:

- Die lithologischen und geometrischen Charakteristiken (Struktur) der geologischen Einheiten.
- Die Auswirkung der geologischen Rahmenbedingungen und Phänomene auf die Fliessverhältnisse des Grundwassers: zum Beispiel Verwitterung oder postglaziale Auflockerung, Veränderung der Durchlässigkeit in den ersten Metern des anstehenden Fels (siehe Anhang A6).
- Die hydrogeologischen Verhältnisse: zum Beispiel Speisung von der Oberfläche, Versickerung von Wasserläufen oder Drainagen.
- Die Analyse der Systemreaktion: zum Beispiel Senkung des Grundwasserspiegels, Hydrodynamik der Quellen, geochemische Signatur des Grundwassers, Grundwasserstockwerksbau, freier oder gespannter Grundwasserspiegel, vertikale Zirkulation, schwebendes Grundwasser usw.

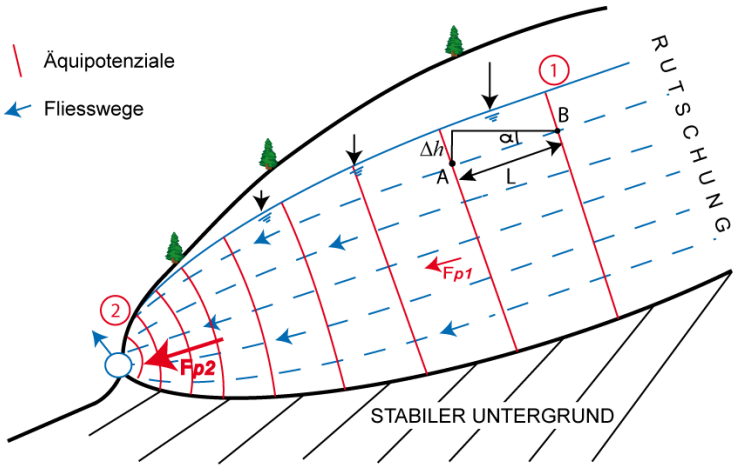
Der Vergleich von Grundwasserströmungen in Rutschungen mit denjenigen, mit welchen sich die Hydrogeologie vor allem in alluvialen Grundwasserleitern normalerweise beschäftigt, zeigt Besonderheiten auf, die instabilen Hängen eigen sind. Dies sind insbesondere:

1.1 Hoher hydraulischer Gradient

Die hydraulischen Gradienten reichen von wenigen Promille in Schwemmebenen bis zu 10 Prozent in Rutschungen. Solche Gradienten, kombiniert mit der topografischen Steilheit des Geländes sowie dessen geologischer Heterogenität, führen oft zu stark artesischen Bereichen (Anhang A6, A7 und A8) sowie zu zahlreichen Quellzonen, insbesondere in Geländemulden. Diese Tatsache macht im Übrigen die numerische Modellierung schwierig. Der Potenzialgradient am Fuss einer Rutschung kann wegen der Abnahme des Abflussquerschnitts (Abb. 3) besonders hoch sein; der Strömungsdruck, der sich proportional zum Gradienten verhält, ist daher hoch und kann zum Auswaschen von festem Material führen; diese innere Erosion kann ein auslösendes Moment für einen sich rückschreitend ausbreitenden Bruch sein, ähnlich wie sich dies beim Bruch eines Erddammes beobachten lässt. Die Strömungskräfte können auch Festgestein destabilisieren, sogar solches, das aus relativ massigem Material besteht, wie bei der Felsrutschung von St. Niklaus (siehe Anhang A2).

Abb. 3 > Auswirkung der Reduktion des Abflussquerschnitts (*S*) des Grundwassers in einer Rutschung mit freiem Grundwasserspiegel

Der Potenzialgradient kann an der Spitze der Rutschung derartige Werte erreichen, dass die Strömungskräfte zu einer inneren Erosion führen, was wesentlich zur Instabilität beiträgt. Schema ohne Massstab.



- Perkolationskraft in einem Volumen der Dimension x, y, z: $F_p \equiv x \cdot y \cdot z \cdot \gamma_w \cdot i$ (mit $i = \Delta h / L$ und γ_w spezifisches Gewicht des Wassers)
- (1) Abschnitt weit von der Spitze: $S_1 \nearrow \quad i_1 \searrow \Rightarrow F_{p1} \searrow$
  (2) Abschnitt nah an der Spitze: $S_2 \searrow \quad i_2 \nearrow \Rightarrow F_{p2} \nearrow$
- An der Quelle, $i \nearrow$ also $F_p \nearrow$ => Abschwemmen von festen Partikeln

geändert nach Parriaux 2009

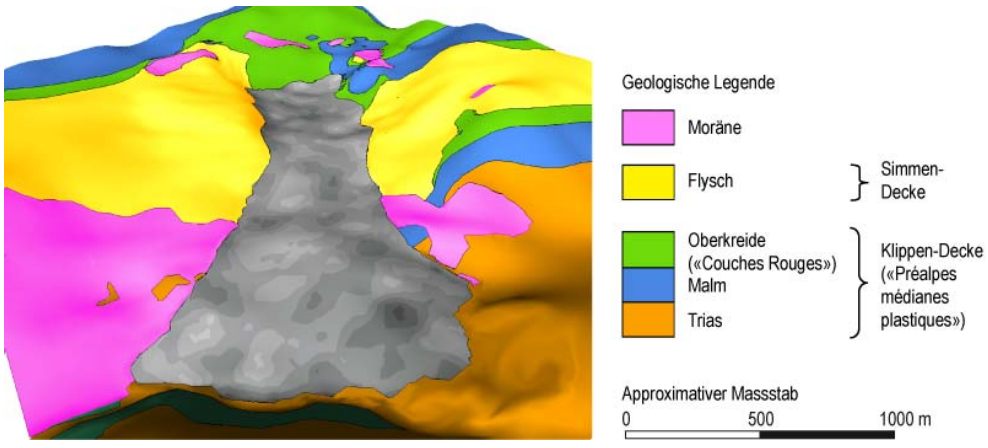
1.2 In ihrer Geometrie und in ihren Eigenschaften komplexe Milieus

Die Form und die Beschaffenheit des geologischen Rutschkörpers sind wegen der Prozesse, die auf das Material während der Verschiebung einwirken, oft komplex: Die Eigenschaften verändern sich dauernd beim Übergang vom stabilen zum instabilen Zustand. Dieser Wechsel umfasst nicht nur eine kinematische Komponente, sondern schliesst auch Phänomene der Verwitterung und der Entmischung im Verlauf der Bewegung mit ein. Die Materialeigenschaften können stark variieren, können aber innerhalb der Rutschung mehr oder weniger organisiert auftreten. Im Fall von Flysch kommt zur Heterogenität infolge der Bewegung auch noch die ursprüngliche Heterogenität des Ausgangsmaterials hinzu.

Zusätzlich zur komplexen Geometrie der Gleitmasse (im Meter- bis Dekameterbereich) verfügt auch die Form der Rutschung (im Hektometerbereich) oft über eine hohe Vielfalt in den drei Raumdimensionen. Lateral weist eine Sanduhrform häufig auf den Übergang zwischen der Ausbruchs- und der Ablagerungszone hin (Abb. 4). In der Tiefe werden die Bewegungen durch die Gesetze der Mechanik, die Geologie der Rutschmasse und des Substratums sowie die hydrogeologischen Verhältnisse bestimmt. Diese Charakteristiken machen aus Rutschungen ein dreidimensionales System, welches sehr schwer in zwei Dimensionen darzustellen ist, ohne dass ein beträchtlicher Informationsverlust entsteht. Dies ist besonders wichtig bei der Wahl der Werkzeuge für die geologische und hydrogeologische Modellierung (siehe auch Anhang A1).

Abb. 4 > Dreidimensionale Darstellung einer Rutschung

Die dreidimensionale Darstellung ermöglicht es, die geometrische Komplexität sowie die Vielfalt der Eigenschaften des Materials einer Rutschung sichtbar zu machen. Beispiel der Rutschung La Frasse (Waadtländer Voralpen; siehe z. B. Noverraz et al. 1998). Die Variation des Durchlässigkeitsbeiwerts an der Oberfläche der Rutschung ist in Grautönen dargestellt (hellgrau: $1 \cdot 10^{-3}$ m/s, dunkelgrau: $1 \cdot 10^{-7}$ m/s).



1.3 Oft sehr unterschiedliche Durchlässigkeit

Die lateral und vertikal sehr grossen Unterschiede der Durchlässigkeit sind das Ergebnis der aufgezeigten Charakteristiken (Abb. 4 und Anhang A1). Dies zeigt in deutlicher Weise das Problem der Repräsentativität einer geologischen, hydrogeologischen und hydrochemischen Probenahme auf. Insbesondere muss der Abstand zwischen den Erkundungsbohrungen auf einer Annahme in Bezug auf die laterale Ausdehnung geologischer Heterogenitäten beruhen. Ebenso müssen Piezometer so platziert werden, dass sie Auskunft über die laterale Konnektivität der durchlässigsten Strukturen geben. Wenn Pumpversuche durchgeführt werden, ist es nämlich wichtig, verifizieren zu können, ob die hohen Durchlässigkeiten in geschlossenen, linsenförmigen Strukturen oder in offenen Systemen, entsprechend einer allgemein grossräumigen Wasserzirkulation, auftreten. Dies ist ein bedeutender Aspekt bei der Erkundung der hydrogeologischen Verhältnisse einer Rutschung, wenn für ein konzeptuelles oder ein numerisches Modell die Kenntnis einer einheitlichen äquivalenten Durchlässigkeit benötigt wird.

Bei zusammenhängenden, durchlässigen Strukturen wird die entsprechende einheitliche Durchlässigkeit einen Wert nahe demjenigen der einzelnen Strukturen aufweisen. Bei fehlender hydraulischer Konnektivität wird demgegenüber die Grundwasserströmung vom am wenigsten durchlässigen Material am stärksten beeinflusst. Diese Informationen erleichtern die Interpretation der piezometrischen Messungen wesentlich, weil besser zwischen dem lokalen Verhalten und der allgemeinen Zirkulation unterschieden werden kann.

1.4 Schwankungen der Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Bewegung

Rutschungen haben die sehr spezielle Eigenheit, dass sich die Durchlässigkeiten in Abhängigkeit von den Bewegungen verändern. Der deutlichste Fall ist das Auftreten von Zugrissen in den Anrisszonen. Die Anrissnischen, die sich im Verlauf einer Aktivierungsphase öffnen, können erhebliche Mengen Wasser in den Untergrund eindringen lassen, genau dort im Übrigen, wo der Schubeffekt des Wassers am wirksamsten ist. Umgekehrt kann in den Kompressionszonen die Durchlässigkeit durch die Abnahme der Porosität vorübergehend reduziert sein, was zu einem Anstieg des Porenwasserdrucks führt (Abb. 5 und Abb. 6).

Abb. 5 > Schwankung der Durchlässigkeit innerhalb einer Rutschmasse in Abhängigkeit von der Bewegung

Im Anrissbereich erhöht sich die Durchlässigkeit (K) als Folge der sich bildenden Zugrisse stark. Im unteren Bereich ist, wenngleich weniger ausgeprägt, die Tendenz – infolge Kompression – gegenläufig. An der Basis der Rutschung kann die Scherfläche selbst einen besser durchlässigen Horizont mit erhöhtem Durchfluss ausbilden, dies selbst nach Ende der Bewegungen; im Gegensatz dazu können Scherflächen bei besonders lehmigem Material abgedichtet und ausgesprochen schlecht durchlässig sein.

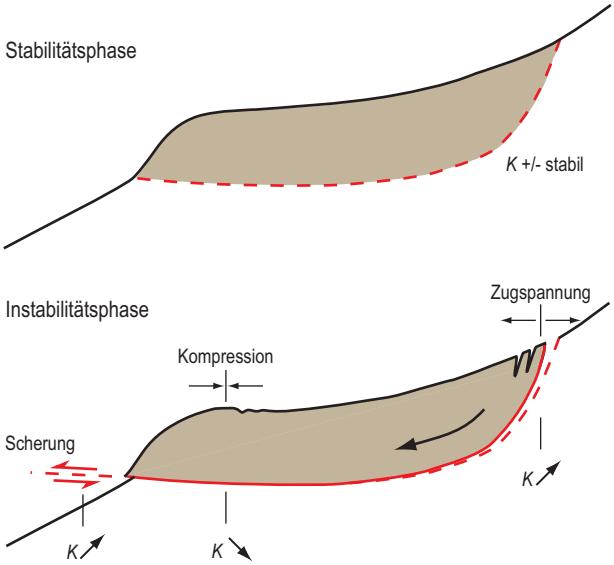
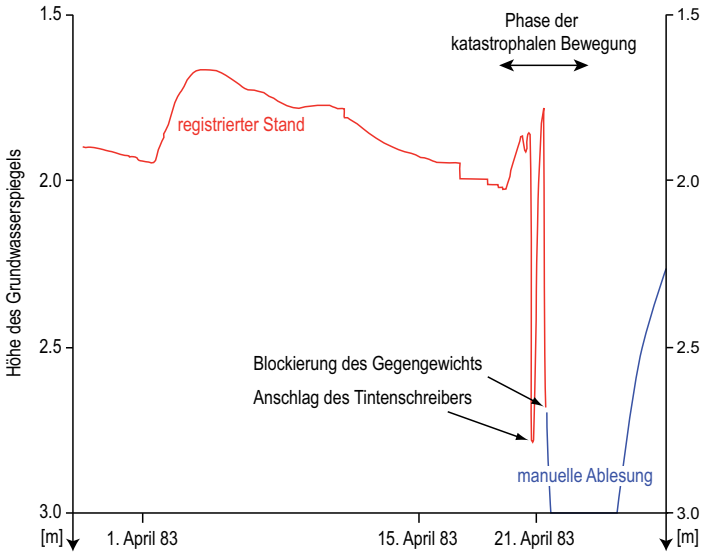


Abb. 6 > Beispiel einer abrupten Erhöhung der Durchlässigkeit am Beispiel der Rutschung Chenaula (Kanton Waadt), die 1983 die Verbindungsstrasse von Lausanne nach Belmont zerstörte

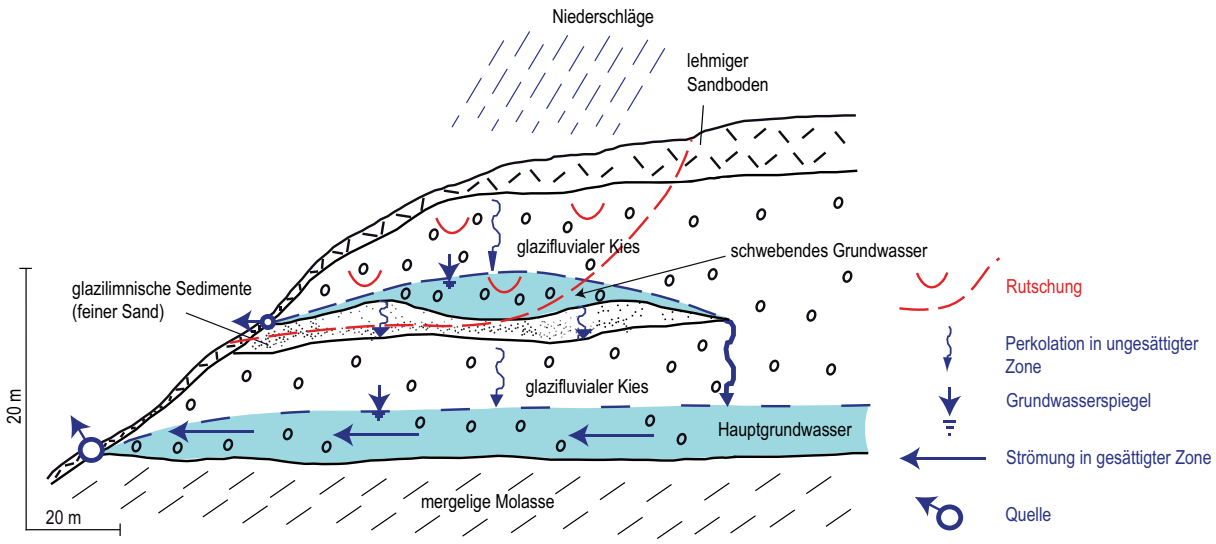
Die Aufzeichnung eines Limnigrafen zeigt einen Anstieg des Grundwasserspiegels in einem Piezometer zu Beginn der starken Bewegungen: Am 21. April 1983 fällt mit dem Höhepunkt der Verschiebungen der Grundwasserspiegel während einiger Stunden plötzlich, steigt dann sehr schnell wieder an, um am Ende des Tages erneut stark zu fallen, was zu einem Ausfall des Geräts führt. Handmessungen nach dem Ereignis zeigten, dass der Pegelstand am Ende der Ereignisse rund 2 m tiefer lag als normal. In den darauffolgenden Tagen normalisierte er sich wieder.



1.5 Auftreten von schwebendem Grundwasser

Im Gegensatz zu Lockergesteinen in Alluvialebenen kommt dem schwebenden Grundwasser (temporär oder permanent) bei Rutschungen eine wichtige Bedeutung zu (Abb. 7 und Anhang A3). Schwebendes Grundwasser wirkt bei der Anreicherung des Hauptgrundwasserleiters wie ein hydraulischer Puffer. Dessen Auftreten erschwert Bohrlochtests, die Instrumentierung von Bohrungen sowie die Modellierung.

Abb. 7 > Präsenz von schwebendem Grundwasser in Hängen und Auswirkungen auf den unterirdischen Abfluss



1.6 Starker Einfluss der ungesättigten Zone

Viele Rutschungen weisen stark schwankende Mächtigkeiten der ungesättigten Zone auf. Zum Verständnis der Mechanismen von Zu- und Abfluss muss in diesem Fall die ungesättigte Zone jedoch in die Beurteilung mit einbezogen werden. In Anbetracht der dort meist sehr heterogen verteilten Durchlässigkeiten ist deren Verhalten komplex. Die dazu benötigte Instrumentierung ist oft aufwendig, und deren Platzierung in der Bohrung ist kompliziert. Die Einbindung der ungesättigten Zone bei der Modellierung ist besonders schwierig und erfordert viel Rechenzeit und Rechnerkapazität.

1.7 Stark verlaufsabhängige Reaktionen

Aufgrund der vorhandenen Diskontinuitäten, intensiver Niederschlagsereignisse und tiefer Speicherkoeffizienten des Materials sind die hydrogeologischen Reaktionen oft sehr schnell, intensiv und von kurzer Dauer (Abb. 6). Dies sind Bedingungen, welche oft die Hauptphasen von Verschiebungen auslösen. Die Untersuchungsmethoden sind in der Regel nicht auf die Beobachtung von so kurz anhaltenden Verhältnissen ausgerichtet. Bei der Modellierung drängen sich im Übergangszustand Simulationen mit kurzen Zeitintervallen auf.

Alle diese Besonderheiten haben einen grossen Einfluss auf die Messmethoden, die Messtechniken und die Modellierung. Ihr Einbezug wird in den folgenden Kapiteln behandelt.

2 > Hydrogeologische Parameter und Instrumentierung

Drei Elemente des hydrogeologischen Systems müssen im Rahmen einer Zustandsbeurteilung einer Rutschung analysiert und gemessen werden: der Zufluss von Wasser (Einsickern von der Oberfläche, Speisung von den Rändern oder vom Untergrund), die Fliessverhältnisse (Grundwasserfluss) und der Austritt des Wassers (hydraulisches und geochemisches Regime des Abflusses).

Es sei daran erinnert, dass in diesem Leitfaden nur die Parameter, welche die Hydrogeologie betreffen, behandelt werden. Für das Monitoring von Verschiebungen im Rahmen von Hangrutschungen wird auf die Norm SN 670 305 (VSS 2000) verwiesen, die diesem Thema gewidmet ist, bzw. auf die Publikation des Bundesamts für Strassen: *Grundsätze für die Zustandserfassung von auf instabilem Untergrund ausgeführten Strassenbauwerken,* Nr. 384, Oktober 1996, Anhang 3 (Bonnard 1996).

Allgemein muss die Beobachtungsstrategie einer Rutschung darauf abzielen, die Parameter basierend auf zwei Grundcharakteristiken auszurichten:

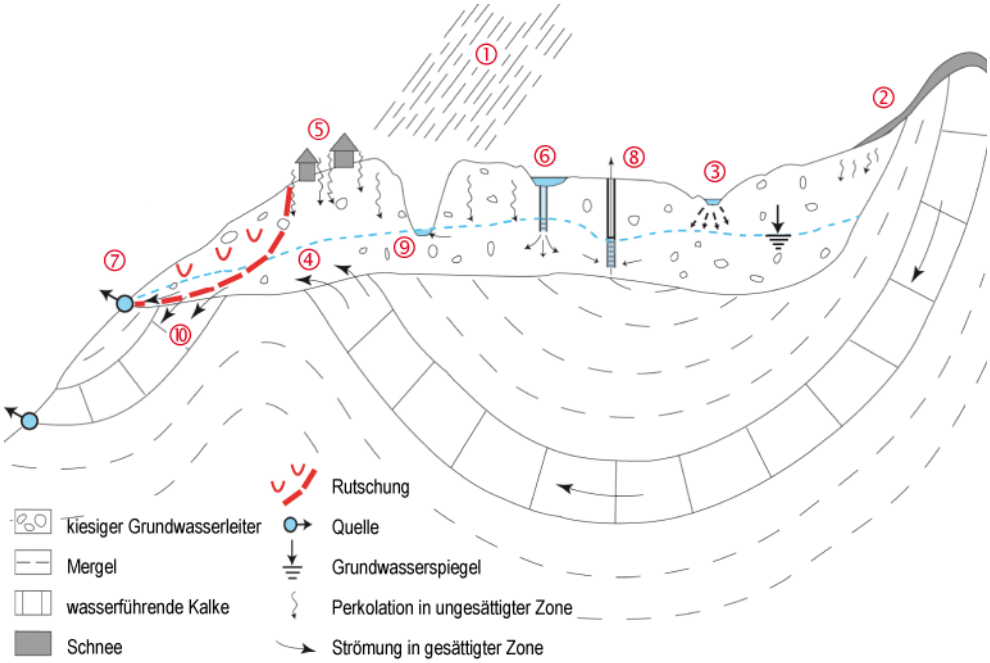
- grosse räumliche Variabilität (z. B. der Durchlässigkeit);
- kurzzeitige Reaktionen (z. B. des hydraulischen Potenzials).

Die erste Bedingung erfordert eine Vielzahl von Beobachtungspunkten in der instabilen Masse und deren Umgebung und berücksichtigt damit die Variabilität in der Vertikalen wie in der Horizontalen. Die zweite gibt der kontinuierlichen Aufzeichnung gegenüber einer diskreten Messung den Vorzug (siehe Anhang A1). Beide spezifischen Bedingungen können jedoch in der Praxis wegen der damit verbundenen Kosten nicht vollständig umgesetzt werden. Es geht also darum, diese Ideallösung anzustreben und gleichzeitig mit den zur Verfügung stehenden Mitteln die effektive Strategie zu optimieren.

Im vorliegenden Kapitel werden die Messkonzepte für die drei Elemente des hydrogeologischen Systems behandelt: Zufluss, Fliessverhältnisse im Untergrund und Abfluss (Abb. 8). Die zu treffenden Vorkehrungen und die möglichen Grenzen bei der Anwendung der Methoden werden erwähnt. Es ist jedoch aus offensichtlichen Gründen (Umfang eines Leitfadens) nicht möglich, die Messsysteme im Detail zu beschreiben (siehe hierzu z. B. Dunnicliff 1988).

Abb. 8 > Zu- und Abflüsse eines Hang-Grundwasserleiters

Zuflüsse: 1. Versickerung von Regenwasser. 2. Versickerung von Schmelzwasser. 3. Versickerung von Fliessgewässern. 4. Zufluss aus anderen Grundwasserleitern. 5. Künstliche Versickerung von unbelastetem urbanem Oberflächenwasser. 6. Künstliche Anreicherungsanlagen. Abflüsse: 7. Quellen. 8. Pumpbrunnen. 9. Speisung des Basisabflusses von Fliessgewässern. 10. Abfluss in andere Grundwasserleiter.



geändert nach Parriaux 2009

2.1 Messung der Zuflüsse

Das Wasser, das in eine Rutschungsmasse einfliesst, stammt natürlicherweise von der Oberfläche. Vom Rand her oder aus dem Liegenden kann jedoch ebenfalls Grundwasserneubildung erfolgen.

2.1.1 Niederschläge – Niederschlagsmessung

Gegenden mit Rutschungen weisen oft markante Geländeformen auf, in denen das Mikroklima einen grossen Einfluss ausübt. Höhenunterschiede und Exposition der Hänge wirken direkt auf die Verteilung der Niederschläge und deren Form als Regen oder als Schnee ein. Der Umwandlung von Schnee in Wasser während der Schneeschmelze kommt eine Schlüsselrolle zu. Es ist daher entscheidend, dass bei den von den Niederschlagsmessern registrierten Daten zwischen fest und flüssig im Detail unterschieden wird. Viel zu viele Studien stützen sich einzig auf Gesamtniederschlagswerte. Weil das hydrogeologische System so schnell reagiert, sind Pluviografen (Niederschlagsschreiber mit Kippwaage und Heizung) Regenmessern vorzuziehen. Beobachtungen über die Entwicklung der Schneedecke sind äusserst wertvoll. Die dazu nötige Aufzeichnung der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und auch der Sonneneinstrahlung ist einfach zu bewerkstelligen. Moderne Geräte erlauben sogar die

Fernübermittlung der Aufzeichnungen in Echtzeit. Dies kann nützlich sein, wenn katastrophale Ereignisse zu befürchten sind.

Wenn es nicht möglich ist, geeignete Instrumente am betroffenen Standort zu installieren, kann im meteorologischen Datennetzwerk auf Informationen von denjenigen Stationen zurückgegriffen werden, die Ähnlichkeiten mit der Gegend der untersuchten Rutschung aufweisen. Insbesondere die Wetterstationen des Schweizer Messnetzes liefern viele Daten, die direkt für die Schätzung der Wasserneubildung im Untergrund auswertbar sind. Die Veränderung der Niederschläge mit der Höhe muss ebenfalls berücksichtigt werden.

Die Beobachtung des Zuflusses beschränkt sich nicht nur auf quantitative Aspekte. Die Isotopen des Wassers (vor allem Sauerstoff-18 und Deuterium) können in den Niederschlägen analysiert und anschliessend mit den Isotopenänderungen im Abfluss verglichen werden. Daraus können wichtige Hinweise auf die Dämpfung des hydrogeologischen Systems und den Grad der Wassererneuerung im System erhalten werden (siehe z. B. Etcheverry & Parriaux 1998, Parriaux et al. 2001 [HADES, Tafel 6.2], Etcheverry & Vennemann 2009). Diese Parameter können ebenfalls nützlich sein für die Validierung der numerischen hydrodynamischen Modelle.

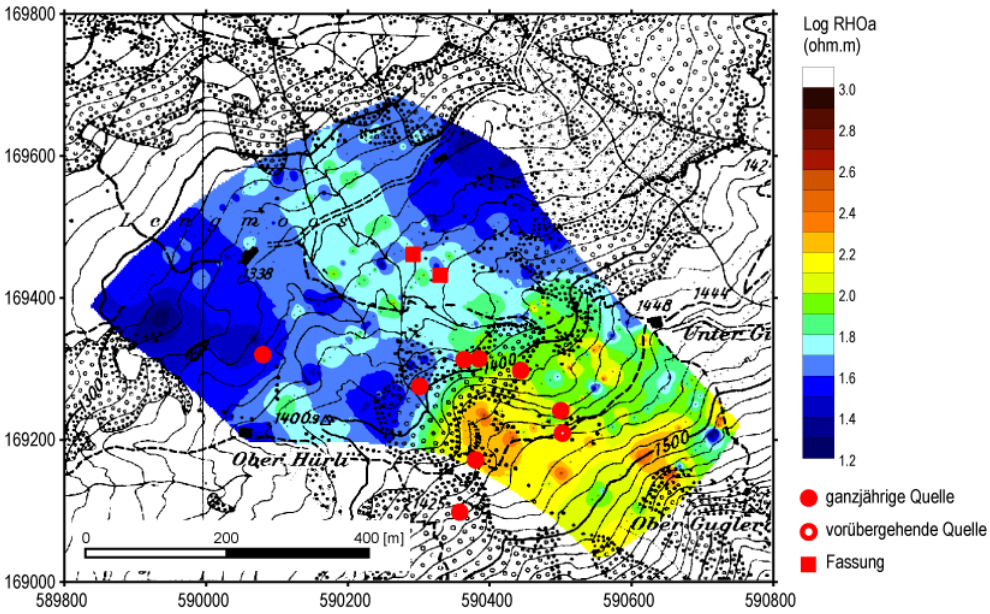
2.1.2 Niederschläge – Ermittlung der effektiven Versickerung

Bei der Verwendung von Programmen zur Berechnung der effektiven Versickerung (= Bruttoniederschlag - Evapotranspiration), wie zum Beispiel das *COUP model* (Jansson 2003), müssen die wasserbezogenen Eigenschaften der Böden bestimmt werden (Beziehungen Durchlässigkeit/Bodenfeuchte und kapillare Saugwirkung/Bodenfeuchte). In-situ-Sickerversuche ergänzt durch Labortests ermöglichen die Präzisierung dieser Beziehungen. Ansonsten sind Literaturwerte für vergleichbare Böden heranzuziehen oder Werte zu verwenden, welche sich aus geotechnischen Eigenschaften ableiten lassen.

Geophysikalische Methoden leisten wichtige Dienste bei der Abschätzung der Schwankungsbreite der Versickerungsbedingungen an der Oberfläche und im Besonderen beim Eruieren der Hauptinfiltrationsgebiete einer Rutschung. Die Messung des elektrischen Widerstands mit dem Schlumbergerverfahren oder mit radiomagnetotellurischen Techniken eignet sich oft gut, da auf diese Weise tonreiche oder tonarme Bereiche abgebildet werden können. Die auf der Rutschung von Hohberg (Kanton Freiburg; siehe Zusammenfassung in Oswald 2003) vorgenommenen und in Abb. 9 in Form einer Karte präsentierten Messungen des scheinbaren Widerstands sind ein Beispiel dafür (Tullen et al. 2006). Diese Karte zeigt eine kohärente Strukturierung des Untergrunds. Der im oberen Teil des kartografierten Bereichs beobachtete hohe Widerstand stellt grobe Hangschuttablagerungen (Blöcke) dar, während die im unteren Teil festgestellten schwachen Widerstände auf Material mit einem viel höheren Feinanteil schliessen lassen (Moränen- und Hanglehmablagerungen). Die hydrogeologische Untersuchung dieses Standortes konnte aufzeigen, dass der obere Bereich tatsächlich ein bevorzugtes Infiltrationsgebiet ist. Demgegenüber ist der untere Bereich durch schlechte Durchlässigkeit charakterisiert und bewirkt als Stauer eine Grundwasseraustrittszone (Tullen et al. 2006).

Abb. 9 > Karte des elektrischen Widerstands (RHOa), erstellt aus radiomagnetotellurischen Messungen im oberen Teil der Rutschung von Hohberg (Freiburger Voralpen)

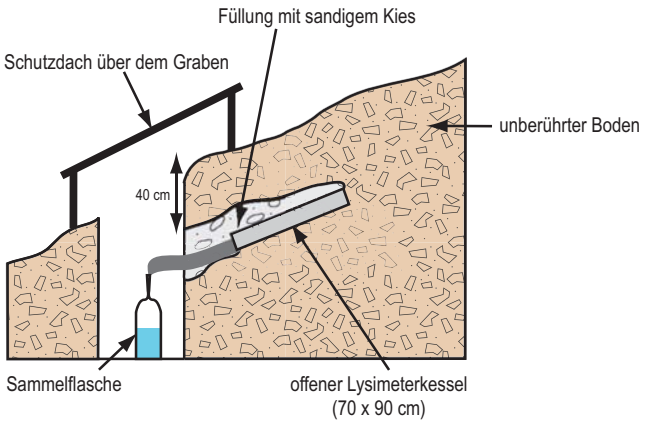
Verwendete RMT-Frequenzen: 60 und 77 kHz, Untersuchung der ersten 15 bis 20 m des Untergrunds, logarithmische Widerstandsskala.



geändert nach Tullen et al. 2006. Topografische Grundlage: Übersichtsplan © Amt für Vermessung und Geomatik, Kanton Freiburg

Eine direkte Messung des Sickerflusses ist mit Hilfe von Lysimetern möglich. Dabei werden an repräsentativ beurteilten Standorten Gräben ausgehoben, in denen Sickerwasser in unterschiedlichen Tiefen gesammelt wird (Abb. 10). Dies ist besonders während der Schneeschmelze wichtig, je nachdem, ob der Boden gefroren ist oder nicht (Bayard 2003). Solche In-situ-Beobachtungen sind jedoch schwer zu bewerkstelligen. Die hohen Kosten für Installation und Kontrolle limitieren sie auf Rutschungen, die ein beträchtliches Risiko darstellen.

Abb. 10 > An Hanglage angepasster Lysimeter



geändert nach Bayard 2003

2.1.3 Versickerung von Bächen

Grundwasserneubildung durch Teil- oder Totalversickerung von Bächen kommt in Rutschungszonen aufgrund der Diskontinuitäten in den Schub- oder Abscherbereichen häufig vor. Dies betrifft sowohl Wasserläufe, die Rutschgebiete durchfliessen, als auch solche, welche randlich von Rutschgebieten fliessen. Diese, oft punktuellen, Zuflüsse haben massive Auswirkungen auf den hydraulischen Druck in oder unter der Gleitmasse.

Messungen sollten wenn möglich mit einer Serie von hydrometrischen Stationen (Messüberfälle, System Parshall usw.) mit Aufzeichnungsgeräten vorgenommen werden, welche es ermöglichen, die Bilanzierung des Gewässers direkt vorzunehmen. Wenn dies nicht möglich ist, werden an verschiedenen Punkten des hydrografischen Netzes Verdünnungsmessungen unter typischen hydrogeologischen Verhältnissen durchgeführt. Im Anschluss können die Abschnitte identifiziert werden, in welchen die Rutschung entwässert und in welchen das Grundwasser angereichert wird. Die Geochemie des Bachwassers (gelöste Stoffe oder Isotopen) kann hilfreich sein, wenn die Wirkung der punktuellen Anreicherung im Grundwasserleiter bestimmt werden soll. Auch in diesem Fall können sich geoelektrische Methoden als nützlich erweisen, um auf indirekte Art die Durchlässigkeit der Bachsohle zu bestimmen.

2.1.4 Unterirdischer Grundwasserzufluss

Wenn die Basis einer Rutschung eine erhebliche Durchlässigkeit aufweist, müssen unterirdische Zuflüsse und/oder Abflüsse mit einbezogen werden. Da die Bestimmung dieser Flüsse durch hydrogeologische Methoden erfolgt, wird diese Frage im Kapitel über den Grundwasserfluss in der Gleitmasse behandelt (siehe Punkt 2.2 unten).

2.2 Messung des Grundwasserflusses

Die Beobachtung des Grundwasserflusses wird indirekt (durch Messung des hydraulischen Potenzials) oder direkt (durch natürliche oder künstliche Tracer) vorgenommen.

2.2.1 In-situ-Messung des Potenzials und des Drucks

Die klassische Methode zur Bestimmung des hydraulischen Potenzials im Untergrund führt über die Messung von Ruhewasserspiegeln in Sondierbohrungen. Diese Beobachtungen ermöglichen die Erstellung eines konzeptuellen Modells der Grundwasserfliessverhältnisse und die Kalibrierung des numerischen Modells (Differenz zwischen berechnetem Potenzial und gemessenem Potenzial). Verschiedene Techniken stehen zur Verfügung, die mehr oder weniger gut an die hydrogeologischen Eigenheiten der Rutschung angepasst werden können.

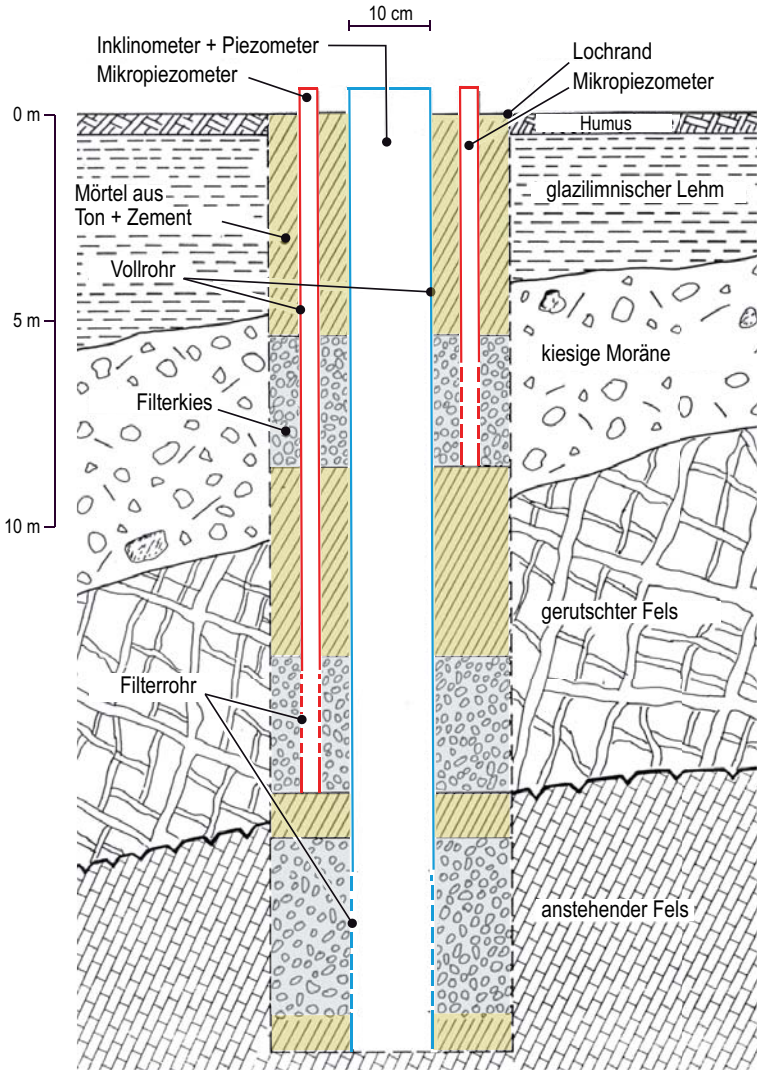
Piezometer

Im Piezometer erfolgt die Bestimmung des Potenzials direkt durch die Messung des Wasserstands in einem Rohr. Wenn das Rohr unten offen ist, ist der Wasserstand («Grundwasserspiegel») eine Punktmessung des Potenzials an dieser Stelle. Durch die Perforation in einer bestimmten Tiefe ergibt die Ablesung des Wasserstands das Gesamtpotenzial in diesem Tiefenbereich. Daraus folgt, dass die piezometrische Messung

in einem über mehrere Meter perforierten Rohr unter Umständen die wirklichen Verhältnisse des Potenzials im Grundwasserleiter nicht im Detail wiedergibt. Ein solcher Informationsverlust ist insbesondere in Rutschungen wahrscheinlich, denn deren vertikale geologische Heterogenität ist oft recht hoch. Im Übrigen kompensiert die kapazitive Wirkung des Rohrs die Schwankungen des hydraulischen Potenzials in der Zeit, vor allem wenn das Gestein wenig durchlässig ist ($K < 10^{-6}$ m/s); deshalb neigen piezometrische Messungen dazu, die wahren Schwankungen zu verschleiern, sowohl was die Amplitude wie die Geschwindigkeit betrifft. Aus diesen Gründen ist es vorzuziehen, anstatt nur eines Piezometers mehrere Beobachtungsrohre mit kleinem Durchmesser in der gleichen Bohrung zu installieren (Abb. 11). Für die Messung und die Aufzeichnung werden mit Vorteil druckempfindliche piezoelektrische Sonden verwendet (siehe weiter unten).

Abb. 11 > Mehrfachpiezometer bei mehreren Grundwasserleitern, mit Tonpfropfen isoliert

Es ist oft vorteilhaft, eine kombinierte Installation mit Inklinometer und Piezometer vorzunehmen. Dies wird durch die Perforation im unteren Abschnitt des Inklinometerrohrs erreicht.



Die folgenden allgemeinen Vorkehrungen bei der Einrichtung von Piezometern bleiben ebenfalls weiterhin gültig (Abb. 11):

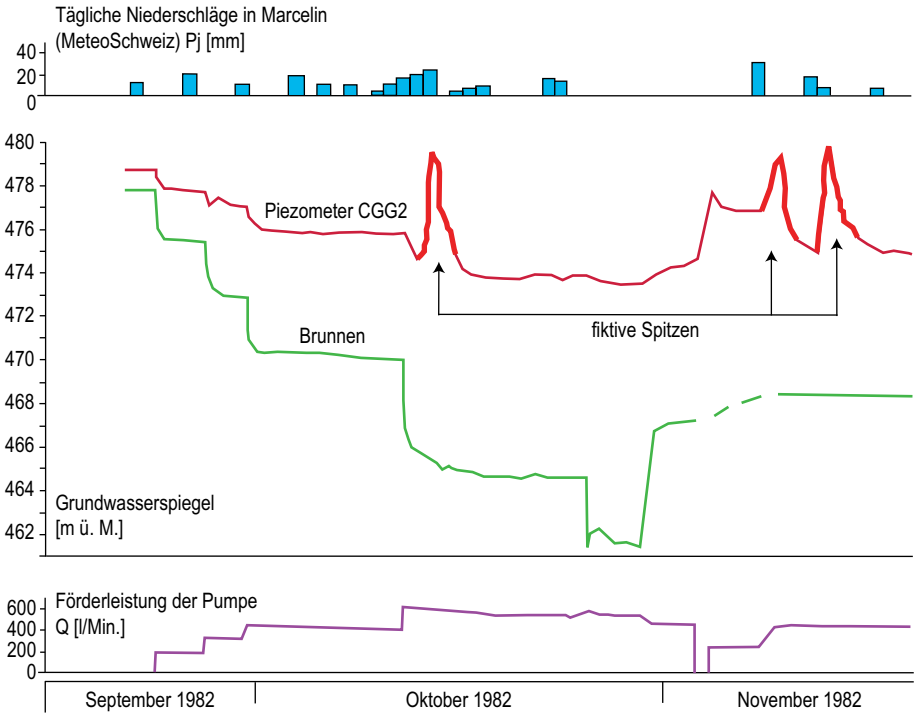
- perforierter Abschnitt nicht zu lang, um Verbindungen (by-pass) zwischen unterschiedlichen Grundwasserhorizonten zu vermeiden (es ist insbesondere darauf zu achten, das Potenzial in verschiedenen Horizonten der Gleitmasse sowie im Liegenden separat zu messen);
- Tonpfropfen zwischen perforierten Segmenten bei Mehrfachpiezometern;
- Tonpfropfen als Schutz gegen Oberflächenwasser (Abb. 12).

Die Ausrüstung als Inklino-/Piezometer mit Mikropiezometer gemäss Abbildung 11 stellt eine ausgezeichnete Kombination für die hydrogeologischen Messungen und die Messung der Verformungen dar. Diese komplexen Systeme sind allerdings in grossen Tiefen schwierig zu installieren, und die Kontrolle durch den Geologen muss während des Einbaus vorgenommen werden. Schlagsondierungen sind nach Möglichkeit zu vermeiden, vor allem, wenn sie nicht verrohrt werden, weil es schwierig ist, die Messabschnitte korrekt mit Tonpfropfen abzugrenzen (Abb. 12). Die Messung des Wasserstands kann durch einen Limnigrafen aufgezeichnet werden.

Die Piezometer bieten gegenüber Drucksensoren den zusätzlichen Nachteil, dass sie keine Messung mehr ermöglichen, wenn sie einmal durch die Bewegungen abgeschert worden sind.

Abb. 12 > Piezometrischer Artefakt wegen einer schlechten Abdichtung gegen Oberflächenwasser

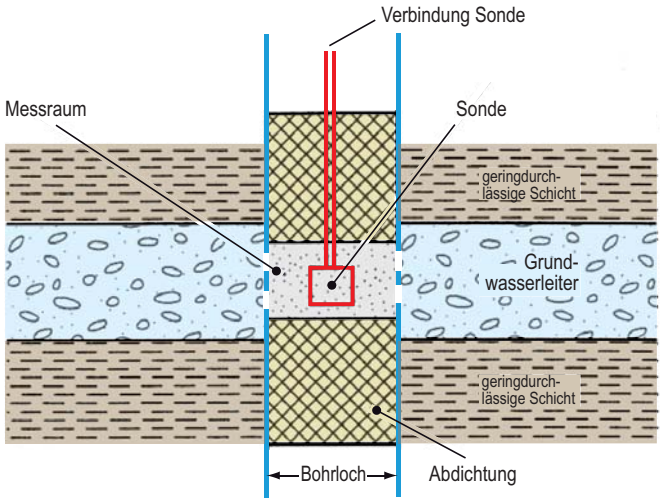
Grundwassermessungen während eines Pumpversuchs im Brunnen Chenaillette in Villars-sous-Yens (Waadtländer Mittelland). Das Piezometer CGG2, eingebaut in eine Rotary-Bohrung ohne Tonpfropfen, zeigt fiktive Veränderungen, die vom Eindringen von Oberflächenwasser in Regenperioden stammen.



Piezoelektrische Drucksonden

Die Nachteile der Piezometer sind bei Drucksonden nicht vorhanden. Eine piezoelektrische Sonde wird in einem kurzen Abschnitt der Bohrung in ein Sandbett platziert (Abb. 13). Das Wasservolumen, das nötig ist, um Druckveränderungen zu verursachen, ist sehr klein. Deshalb entspricht die Messung den Bedingungen im natürlichen Zustand besser. Das Signal des Sensors kann leicht mit einem Datenlogger aufgezeichnet werden. Abdichtungsmassnahmen sind auch in diesem Fall vorzunehmen. Eine Drucksonde mit Verbindungskabel widersteht im Vergleich zu einem perforierten Rohr den Bewegungen besser. Die vom Schwankungsbereich abhängige Genauigkeit der Sonden ist nicht überragend (einige cm), was allerdings wegen der hohen hydraulischen Gradienten in Rutschungen kein Problem darstellt. Der eine Nachteil der Sonden ist ihr Preis, denn sie sind nicht wiederverwendbar (rund 500 Franken für eine gängige Sonde). Der andere Nachteil liegt in der Schwierigkeit, ja Unmöglichkeit, sie nach einer gewissen Zeit zu eichen (mit der Zeit Abdrift der Nulleinstellung und Sondendrift). Drucksonden werden auch in Piezometern verwendet, um das hydraulische Potenzial zu messen und aufzuzeichnen.

Abb. 13 > Platzierung einer Drucksonde in einem Bohrloch



Vibrations-/Schwingungsdraht

Piezometer mit Vibrationsdraht (ein Draht, der eine flexible, dem Wasserdruck im Boden ausgesetzte metallische Membran mit einem fixen Punkt der Messeinrichtung verbindet) machen es möglich, dank der Veränderung der Oszillationsfrequenz des Drahtes unter der Wirkung eines durch eine Spule induzierten Magnetfeldes, die Werte des Porendrucks kontinuierlich oder diskret aufzuzeichnen. Der Vorteil dieser Messanlage, bei welcher weder die elektrische Spannung noch der elektrische Widerstand gemessen werden müssen, liegt darin, dass sie von einem Stromverlust im Boden und von der Kabellänge unbeeinflusst sind. Korrosion und Verformung des Drahtes können allerdings die Messung beeinflussen. Vor allem dank der eingebauten Eichungseinrichtung sind die heutigen Sensoren diesbezüglich unempfindlich.

Mit dem Vibrationsdraht gesammelte Messdaten sind selbst in grosser Tiefe verlässlich. Dies bestätigen Messungen in St. German (Walliser Alpen), wo ein Sensor in 73 m Tiefe zuunterst in einem Inklinometerrohr angebracht wurde.

Hydraulische Versuche

Man kann sich auf die Beobachtung der natürlichen Schwankungen des Grundwasserspiegels beschränken. Manchmal ist es jedoch sinnvoll, das Verhalten des Untergrundes mit künstlichen Beanspruchungen zu testen. Durch Pumpvorgänge oder Einspeisung von Wasser in die Bohrlöcher ist es möglich, entweder die Durchlässigkeit eines gegebenen Horizonts oder die Kommunikation (Verknüpfung) zwischen verschiedenen Horizonten des Untergrundes zu messen. Dies ist eine wichtige Ergänzung zu einer unbeeinflussten Messung. Diese Beanspruchungstests verwenden geeignete Instrumentierungstechniken, insbesondere Mehrfachpiezometer (siehe z. B. Abb. 11), wenn die Konnektivität zwischen verschiedenen wasserführenden Horizonten untersucht werden soll. Diese Techniken stammen aus dem Bereich der Pumpversuche (siehe z. B. Cassan 2005). Die so ermittelten Werte des Durchlässigkeitsbeiwerts werden vor allem für die numerische Modellierung gebraucht.

Diese In-situ-Untersuchungsmethoden können durch Flowmetermessungen in Bohrungen ergänzt werden. Sie ermöglichen es, Kurzschlüsse zwischen unterschiedlichen Grundwasserstockwerken zu eruieren sowie vertikale Durchlässigkeitsprofile zu errechnen. Dies ist in erster Linie bei der Festlegung des konzeptuellen Modells von Nutzen und um eine entsprechende Drainagetechnik, vor allem in Bezug auf die Tiefe der zu bauenden Schächte, zu wählen (siehe Anhang A7).

2.2.2 Messung der In-situ-Wasserflüsse mit Tracern

Die hydrogeologischen Beziehungen im Untergrund können mit im Wasser vorkommenden natürlichen Markierstoffen (Ionen, Isotopen usw., siehe Beispiel der hydrochemischen Schichtung im Anhang A7) oder mit künstlichen Tracern (fluoreszierende Tracer, Salze usw.) erforscht werden, die entweder an der Oberfläche oder von einer Sondierbohrung aus eingespiesen werden (Schudel et al. 2002; siehe Anwendung im Anhang A1). Das Prinzip wird bei dem Beschrieb der Abflüsse (Punkt 2.3 unten) detaillierter beschrieben. Ihr Einsatz im Untergrund bietet einige Schwierigkeiten angesichts der Tatsache, dass die Proben in Bohrlöchern entnommen werden. Die Qualität des Wassers hängt dabei stark von der Art ab, wie die Probe entnommen wird (statische Entnahme, mit mehreren mehr oder weniger ausgefeilten Probenahmegeräten, durch Pumpen). Im Fall von Rutschungen ist Pumpen aufgrund geringer Durchlässigkeiten im Unterrund selten möglich. Die Probeentnahme mit einem Probenahmegerät ist deshalb der Normalfall. Um zu gewährleisten, dass das Wasser in der Bohrung vor der Probenahme genügend erneuert wird, sollten die ersten Proben verworfen werden, bevor die tatsächliche Probe genommen wird. Bei fluoreszierenden Tracern ist aufgrund ihrer tiefen Konzentrationen das Verschmutzungsrisiko durch das Probenahmegerät zu berücksichtigen.

2.3 Messung der Abflüsse

Das hydraulische Regime der Abflüsse sowie die physikalisch-chemischen Veränderungen des Wassers widerspiegeln die Reaktion des Fliesssystems. Diese Felddaten bilden die Grundlage für das Verständnis der hydrogeologischen Zusammenhänge in Rutschungen. Sie dienen dazu, das konzeptuelle Modell und danach die Eichparameter von allfälligen numerischen Modellen festzulegen. Deshalb bestimmt in erster Linie die möglichst vollständige Erfassung dieser Reaktion des Fliesssystems die Qualität der Studie.

In Rutschungen sind die Abflüsse in der Regel schwerkraftbedingte Abflüsse (natürliche oder gefasste Quellen, Drainagen, Drainagebohrungen, Versickerungsbrunnen usw.), aber auch Schächte oder Bohrungen, die zum Pumpen verwendet werden, sei es für die Trinkwassergewinnung oder zur Hangstabilisierung. Die schwerkraftbedingten Abflüsse sind dank der Kontinuität der Abflussverhältnisse einfacher zu kontrollieren. Allerdings bestimmt die geringe Durchlässigkeit der Grundwasserleiter das, was als «Quelle» betrachtet werden muss: Es sind oft ziemlich grossflächige Feuchtgebiete. Die Messung der Schüttung, und erst recht die Entnahme von Wasserproben, sind alles andere als einfach. Häufig ist man gezwungen, das Wasser dieser Quellbereiche mit einem Netz von Drainagerohren oder in offenen Gräben zu sammeln. Die hydrologischen Verhältnisse an der Oberfläche haben daher die Tendenz, diese Messungen, vor allem in Bezug auf die Chemie des Wassers, zu beeinflussen. Solche Beeinträchtigungen liegen vor allem in Regenperioden oder während der Schneeschmelze vor, und diese entsprechen leider auch gerade den für die Hangstabilität heikelsten Perioden, das heisst den Zeiten, die für die Studie der kritischen Situationen am wichtigsten sind.

Für die Messung der Schüttung ist es ideal, wenn an den wichtigsten Abflüssen hydrometrische Stationen mit Überlaufvorrichtungen oder Parshall-Messrinnen installiert werden können (siehe die verschiedenen Techniken z. B. in *Hydraulique générale* von Lencastre 1996). Wenn die Aufzeichnung fehlt, besteht die Gefahr, dass kritische, oft nur kurz dauernde Ereignisse verpasst werden.

Der Limnigraf kann mit Sonden kombiniert werden, welche verschiedene physikalisch-chemische Parameter aufzeichnen, üblicherweise die Temperatur, die elektrische Leitfähigkeit und die Fluoreszenz (bei künstlichen Tracern). Damit ergeben sich leicht Hinweise, wie die Mischungsverhältnisse oberhalb des Messstandortes zu interpretieren sind (Abb. 14). Bei anderen Sonden (Redoxpotenzial, pH, andere spezifische Elektroden) ist es heikler, sie in Feldbedingungen dauerhaft einzusetzen.

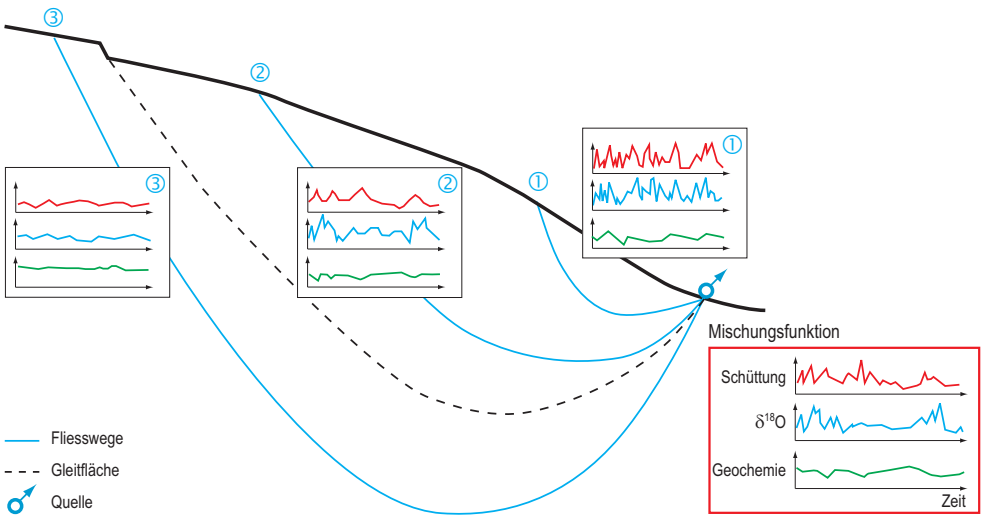
Das geochemische Regime wird vor allem mit Probenahmereihen untersucht. Die Installation von automatischen Probenahmegeräten kann dort gerechtfertigt sein, wo kurze Schwankungen vermutet werden. Die chemischen Parameter, die zu analysieren sind, hängen vom hydrogeologischen Kontext ab. Oft ist das Verhältnis HCO_3/SO_4 interessant, um Zuflüsse im Zusammenhang mit nicht sichtbaren anormalen tektonischen Kontakten bzw. eingeschlossenen triassischen Evaporiten zu erkennen, die die Chemie des Wassers beeinflussen. Stabile Wasserisotope (Deuterium, Sauerstoff-18) sind gute Indikatoren für die Höhenlage der Anreicherungszonen. Die Analyseresultate müssen jedoch methodikbedingt mit grosser Sorgfalt ausgewertet werden. Dies betrifft vor

allem die Wahl einer Höhen-Korrelationsfunktion (siehe z. B. Etcheverry & Parriaux 1998, Parriaux et al. 2001 [HADES, Tafel 6.2], Etcheverry & Vennemann 2009). Im Allgemeinen enthält die chemische Signatur natürliche Tracer, welche es ermöglichen, verschiedene Grundwasserzuflüsse zu differenzieren, was wiederum Aufschluss über die Fliesswege im Untergrund gibt (siehe z. B. Kilchmann 2001). Um nicht die Zahl der Probenahmereihen und damit die Analysekosten zu vervielfachen, ist die ereignisorientierte Probenahme gegenüber regelmässigen Reihenuntersuchungen zu bevorzugen.

Die Messung der hydraulischen Reaktion allein ist für ein gutes Prozessverständnis gefährlich (Abb. 14). Denn es ist damit nicht möglich, druckbedingte Signale («piston flow») von solchen zu unterscheiden, welche durch erhöhten Wasserfluss bedingt sind. Die Auswirkungen auf eine korrekte Interpretation des Fliesssystems sind beträchtlich. Allfällige Interpretationsfehler wirken sich direkt auf das vorzuschlagende Sanierungskonzept aus.

Abb. 14 > Die am Fuss der Rutschung austretenden Quellen werden von verschiedenen unterirdischen Zuflüssen mit unterschiedlichen Fliesswegen gespiesen. Sie bilden beispielsweise eine Mischung von unterschiedlichen Wässern, die durch die Rutschmasse (1 und 2) oder durch den stabilen Untergrund (3) fliessen können

1: nahe der Quelle; 2: weit von der Quelle; 3: im stabilen Fels-Untergrund. Die Messung der Schüttung erlaubt es nicht, die Mischungsbedingungen der verschiedenen Komponenten aufzulösen. Dafür braucht es andere geochemische Parameter, die durch ihren Weg im Untergrund (geogene Tracer) oder durch die Lage des Infiltrationsgebietes und die Verweildauer im Untergrund (stabile Isotope des Wassers) bestimmt werden.



Die Techniken der künstlichen Markierung mit Probenahme am Abfluss sind ebenfalls eine wertvolle Hilfe. Der Leser, die Leserin wende sich diesbezüglich an die Spezialpublikationen zum Thema (Parriaux et al. 1988 oder Schudel et al. 2002). Allgemein sollte nicht zur künstlichen Markierung gegriffen werden, bevor nicht das hydrogeologische Verhalten durch weniger invasive Methoden untersucht wurde. Man muss sich der Tatsache bewusst sein, dass die geringen Durchlässigkeiten in Rutschungen den Einsatz von künstlichen Tracern stark einschränken.

3 > Hydrogeologisches Verhalten: vom konzeptuellen Modell zur numerischen Modellierung

Weil das Verhalten von Rutschungen eng mit den hydraulischen Verhältnissen verknüpft ist, kann ein System nur in Zusammenhang mit den hydrogeologischen Mechanismen verstanden werden. Die numerischen hydrogeologischen Modelle machen es möglich, das konzeptuelle Modell zu verifizieren und das Verhalten einer Rutschung zu verstehen und vorauszusagen.

Die hydrogeologische Modellierung, allenfalls kombiniert mit geomechanischen Modellen, macht es möglich, das konzeptuelle Modell zu verifizieren oder zu verfeinern. Die Mechanismen innerhalb einer Rutschung können ebenfalls auf diesem Weg analysiert werden, sowohl in der momentanen Situation wie in Bezug auf neue Rahmenbedingungen (mögliches Verhalten in der Zukunft). Diese Modelle werden anschliessend für die Planung von Stabilisierungsmassnahmen und die Prüfung ihrer Wirksamkeit eingesetzt. Die Modelle dienen auch der Raumplanung, indem sie kritische Wasserstände definieren und die Auswirkungen von möglichen Klimaveränderungen prüfen. In allen Fällen, in denen hohe Summen auf dem Spiel stehen, stellen die Modelle ein immer weiter verbreitetes Mittel zur Entscheidungsfindung bei der Bewältigung von akuten Ereignissen und der Umsetzung von Präventionsmassnahmen dar.

Der Begriff «Modelle» bezeichnet hier numerische Modelle. Wegen der Ungleichförmigkeit der Parameterfelder, der Grundwasserneubildung und der Verteilung der Austrittzonen sowie wegen des unsteten Verhaltens der Fliessverhältnisse sind analytische Lösungen nicht in der Lage, den Grundwasserfluss in einer Rutschung angemessen wiederzugeben.

3.1 Dimensionalität der Modelle

Die zweidimensionale Modellierung (2-D) eines in der Natur dreidimensionalen Systems (3-D) stellt eine Vereinfachung dar, die Vorteile bietet, wenn es um eine schnelle Vorbereitung und Durchführung der Berechnungen geht. Oft beruht sie jedoch auf Hypothesen, mit welchen sich keine repräsentativen Ergebnisse erzielen lassen.

2-D-Schnittmodelle

In zweidimensionalen Schnittmodellen muss von einer lateralen Konstanz der hydrogeologischen Parameter ausgegangen werden. Dies bedeutet, dass in Rutschungen die laterale Heterogenität nicht dargestellt werden kann. Auch ist die laterale Ausdehnung einer Rutschung, welche oft die Form einer Sanduhr besitzt, ein Element, das im Modell berücksichtigt werden müsste. Ebenso wenig können die Versickerungsverhältnisse von oben und allfällige Beziehungen mit dem unterliegenden stabilen Gestein lateral differenziert werden. Ein hydraulisches Potenzial an der Oberfläche, welches eine Quellzone repräsentieren soll, entspricht im Modell einer linearen, in der Horizon-

talen unendlich ausgedehnten Quelle. Im Fall eines Brunnens entspricht die Festlegung eines Potenzials einem horizontalen Drainagerohr. Seitliche Zuflüsse zur Rutschung sind, falls vorhanden, ebenfalls schwer darzustellen, sind sie doch nur als auf der gesamten Breite der Rutschung wirkender Einfluss wiederzugeben; in Wirklichkeit bestehen solche Zuflüsse nur am Rande der Rutschung.

Das 2-D-Schnittmodell kann also, aufgrund des Fehlens einer lateralen Komponente der hydraulischen Strömungen, Resultate liefern, welche wesentlich von den reellen Gegebenheiten abweichen. Mit ihm wird ein «äquivalenter Schnitt» erstellt, welcher keinem spezifischen Schnitt entspricht und entsprechend schwer durch Feldmessungen zu kalibrieren ist.

2-D-Grundrissmodelle

Zweidimensionale Grundrissmodelle setzen die Homogenität der Parameter in der ganzen Mächtigkeit der Rutschung voraus. Die berechneten Flüsse haben daher keine vertikale Komponente. Dies ist vor allem dann von Nachteil, wenn Gleitflächen vorhanden sind, deren hydrogeologischen Eigenschaften sich von denjenigen der Gleitmasse unterscheiden. Diese Modelle können einen Wassereintrag von oben (Versickerung, Infiltration aus Wasserläufen) und einen allfälligen Abfluss durch den Untergrund nicht gleichzeitig darstellen. Ebenso geht die Potenzialabschätzung einer Quelle im Modell von einem vollkommenen Brunnen aus. Typischerweise kann mit diesen Modellen die Wirkung von Schächten in Bezug auf ihre Tiefe nicht geprüft werden. Darüber hinaus ist dort, wo ein geomechanisches Modell mit der hydrogeologischen Modellierung gekoppelt wird, die Berechnung eines zweidimensionalen Grundrissmodells sinnlos, denn das geomechanische Modell beschreibt prinzipiell Belastungen und Bewegungen tiefenabhängig. Zweidimensionale geomechanische Grundrissmodelle gibt es daher auch nicht.

3-D-Modellierung

Um zuverlässige Resultate zu erzielen, sollte die Modellierung der hydrogeologischen Mechanismen von Rutschungen daher in 3-D erfolgen. Dies, weil für die Beschreibung einer Rutschung folgende räumlichen Besonderheiten wesentlich sind:

- die durch Bewegungen entstandene hohe Heterogenität;
- die komplexe, sich verändernde Topografie;
- die komplexe, zeitlich und räumlich variierende Geometrie;
- das räumliche Verteilungsmuster der Quellen und Wasserläufe;
- die lateralen und in die Tiefe wirkenden Beziehungen zum Umgebungsgestein.

Gewisse markant dreidimensionale Strukturen können in zwei Dimensionen nicht einmal qualitativ modelliert werden, wie zum Beispiel die Strömung zwischen zwei wasserdichten Trennschichten; für die Berechnung von hydraulischen Gradienten im Untergrund drängt sich die dreidimensionale Modellierung auf (siehe Anhang A2).

3.2 Fliessregime

Die Bodenmechanik beschreibt Rutschungen unter Berücksichtigung von Mechanismen, welche in der Regel zeitliche Veränderungen des hydraulischen Druckfeldes bedingen. Während solche Druckschwankungen elasto-plastische Verformungen bewirken, treten Kriechverformungen auch ohne solche auf. Deshalb ist die hydro-

geologische Modellierung mit anschliessender geomechanischer Modellierung im stationären Zustand nur sinnvoll, wenn das Kriechen das vorherrschende Phänomen ist. Umgekehrt müssen Verformungen, welche hauptsächlich elasto-plastischen Ursprungs sind (der Normalfall), unter variablen Strömungsverhältnissen modelliert werden.

Eine Besonderheit der instabilen Hänge liegt darin, dass als Folge von Bewegungen die physikalischen Parameter zeitlich variieren. Übersteigt die Variation ein gewisses Ausmass, sind diese im Modell zu berücksichtigen (z. B. Risse). In diesem Fall ist der Strömungszustand prinzipiell unstet, und ein auf einem stationären Zustand beruhendes Modell ist nicht mehr geeignet.

Modellierungen, welche einer variablen Strömung im gesättigten Milieu Rechnung tragen, machen die Festlegung eines feldspezifischen Speicherkoeffizienten (S) nötig. Der spezifische Speicherkoeffizient beschreibt das Wasservolumen, welches in 1 m³ eines Grundwasserleiters gespeichert werden kann, wenn das hydraulische Potenzial um 1 m erhöht (oder gesenkt) wird. Dieser Koeffizient kann sehr unterschiedlich sein, je nachdem, ob der Grundwasserleiter frei (z. B.: $S = 0{,}1$ = nutzbare Porosität) oder gespannt (z. B.: $S = 10^{-4}$) ist. Je tiefer sein Wert, desto ausgeprägter und grösser sind die Schwankungen des hydraulischen Potenzials als Reaktion auf die Infiltrationsereignisse. Die Grundwasserzirkulation in Rutschungen lässt sich, auch aufgrund der hohen Heterogenität des Materials, als komplexe Vielfalt von kleinen, mehr oder weniger verknüpften, einmal freien, einmal gespannten Grundwasserleitern darstellen. Unter diesen Bedingungen ist es ratsam, für die Abschätzung des spezifischen Speicherkoeffizienten in einem ersten Schritt von gespannten Verhältnissen auszugehen, auf die Gefahr hin, die Empfindlichkeit des Systems zu überschätzen.

3.3 Fliessverhältnisse

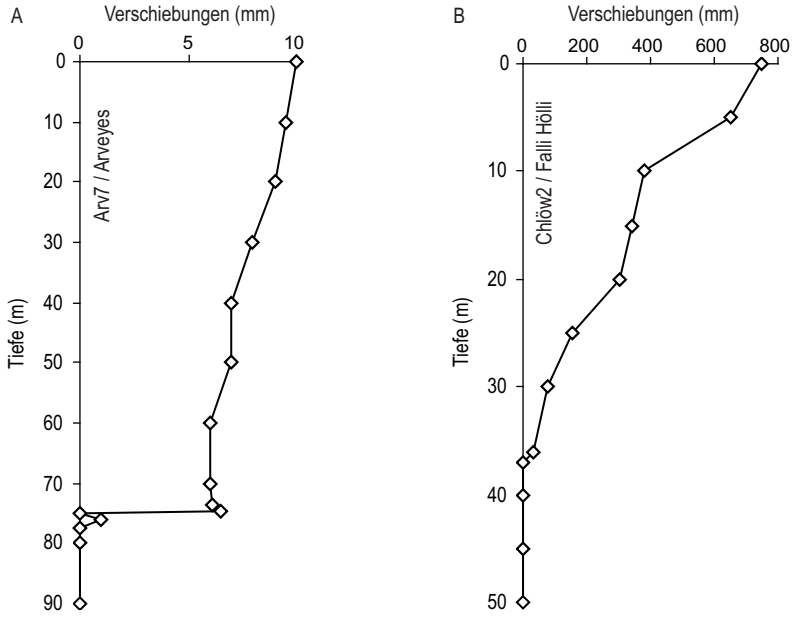
Auch wenn Grundwasserleiter in Rutschungen immer eine nichtgesättigte Zone von variabler Mächtigkeit aufweisen, ist deren Berücksichtigung bezogen auf die Rechenzeit sehr aufwendig; sie erfordert die Einführung von im Allgemeinen schlecht bekannten physikalischen Parametern (Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Sättigung, Saugwirkung in Abhängigkeit der Sättigung) und kann zu numerischen Instabilitäten führen. Deshalb hängt die Wahl der modellierten Fliessverhältnisse (gesättigt oder nichtgesättigt) vom realen Milieu, von der Grösse der instabilen Masse, vom Problem, welches das Modell lösen muss, und von der Leistungsfähigkeit und Schnelligkeit des Rechners sowie von den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln ab.

In vielen Fällen sind die Bewegungen entlang einer Gleitfläche konzentriert (Abb. 15 links, aus dem im Anhang A7 behandelten Beispiel). Dies erlaubt die Modellannahme, dass sich das Volumen der Gleitmasse darüber ohne interne Bewegungen verschiebt, sodass sich die hydrogeologische Modellierung auf die präzise Berechnung der hydraulischen Potenziale auf der Gleitfläche konzentrieren kann. Wenn diese Fläche in der gesättigten Zone des Grundwasserleiters liegt, stellen die Modelle vom Typ «gesättigt» eine akzeptable Annäherung dar.

Abb. 15 > Inklinometrische Kurven

A. Konzentration der Bewegungen entlang einer Gleitfläche bzw. eines Gleithorizonts. Sondierbohrung Arv7 in Arveyes (VD) (siehe auch Anhang A7). Messungen vom 9. November 1983 bis 14. Mai 1986.

B. Verteilung der Bewegungen über die gesamte Mächtigkeit der Gleitmasse. Sondierbohrung Chlöw2 in Falli Hölli (Freiburger Voralpen; siehe z. B. Raetzo 1997). Messungen vom 24. Juni bis 20. Juli 1994, unmittelbar vor dem Bruch des Rohrs.



geändert nach Noverraz und Bonnard 1986

geändert nach Vulliet und Bonnard 1996

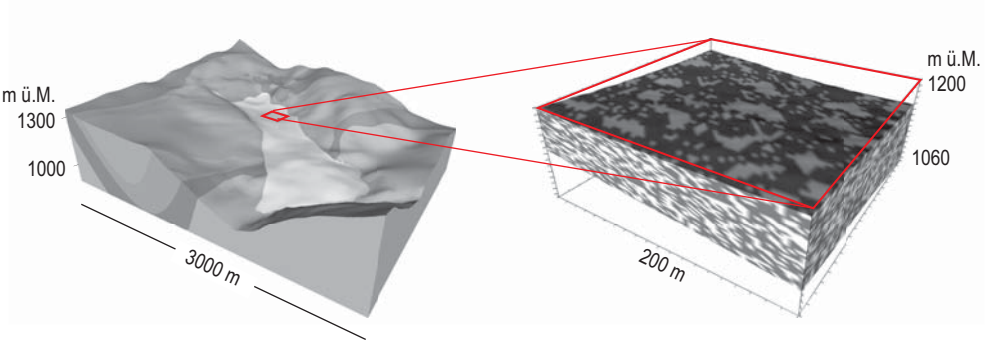
Wenn dagegen die Gleitfläche oberflächennah liegt und teilweise oder vorübergehend entwässert wird (wie in Triesenberg, Anhang A1), so drängt sich die Berücksichtigung einer variablen Sättigung auf. Denn die Saugkräfte (negativer Druck) in der ungesättigten Zone unterscheiden sich, vor allem bei mittlerer und schwacher Durchlässigkeit, je nach Berechnungsart stark. Bei Rutschungen, in welchen die Bewegungen über die gesamte Mächtigkeit verteilt sind (z. B. Abb. 15 rechts), muss im Hinblick auf die geomechanische Modellierung der Sättigungsverlauf ebenfalls systematisch berücksichtigt werden; dies, weil die Saugwirkung die Kohäsion des Materials beeinflusst.

3.4 Massstab der Modelle

In der Praxis treten grosse Rutschungen im Kilometerbereich in Erscheinung, während mit diesen verbundene Heterogenitäten einen Meter- bis Dekameterbereich aufweisen. Abgesehen davon, dass die Details dieser Heterogenitäten nicht bekannt sind, würde ihre Diskretisierung im Modell eine zu feine Rasterauflösung erfordern, um noch eine Berechnung durchführen zu können.

Abb. 16 > Verteilung der hydrogeologischen Parameter eines Modells bezogen auf das Rutschgebiet (links) und im lokalen Bereich (rechts)

Im Lokalmodell sind die Werte der Parameter durch die Intensität des Farbtons dargestellt.

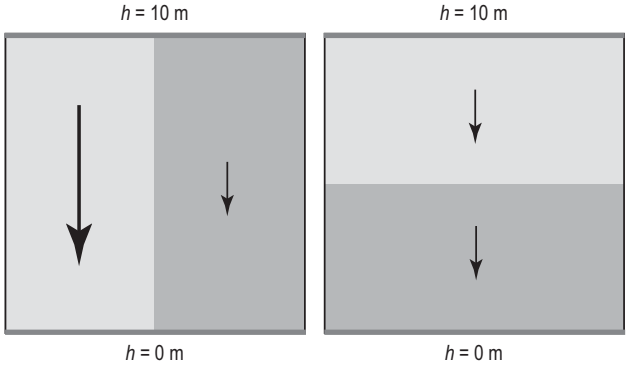


geändert nach Tacher et al. 2005

Bezogen auf das Rutschgebiet (Abb. 16) stellen die Parameter des Modells also eine Vereinfachung des realen Milieus dar. Zusammen mit der Vereinfachung der Randbedingungen (Annahme konstanter oder nach einfachen Funktionen schwankender Potenziale/Flüsse) führt dies zu Ergebnissen, welche auf lokaler Ebene mit Vorsicht zu betrachten sind. Es ergeben sich zwar Hinweise zur generellen Grundwasserbilanz, zum allgemeinen Verhalten der/des Grundwasserleiter/s oder zur Wirksamkeit der Sanierungsmassnahmen, es sind jedoch keine diskreten Werte des hydraulischen Potenzials an bestimmten Stellen abzuleiten. Lokal ist die Wahl der Parameter weitgehend durch die Konnektivität der wasserführenden Strukturen bedingt (Abb. 17).

Abb. 17 > Zwei 2-D-Schnittmodelle, jeweils in stationärem Zustand und unter gesättigten Fliessverhältnissen

Diese Modelle zeigen die Wirkung einer ungleichförmigen Transmissivität. Hellgrau: $T = 10^{-4}$ m²/s, dunkelgrau: $T = 10^{-6}$ m²/s. Sie schematisieren verbundene durchlässige Strukturen (links) oder unverbundene (rechts) in einer wenig durchlässigen Matrix. Links fliesst ein Teil der Strömung vollständig durch das durchlässigste Material, während rechts alle Fliessbahnen beide Milieus durchqueren. Die Gesamtfliessraten in den Modellen sind also Q = 43,63 m³/Tag (links) und Q = 1,71 m³/Tag (rechts). Die Transmissivität des äquivalenten homogenen Milieus, das identische Fliessraten zirkulieren lässt, beträgt $T = 5{,}05 \cdot 10^{-5}$ m²/s für das linke Modell (arithmetisches Mittel der Transmissivitäten). Für das rechte Modell beträgt $T = 1{,}98 \cdot 10^{-6}$ m²/s (harmonisches Mittel) und liegt damit nahe am Wert des am wenigsten durchlässigen Milieus.



Eine realistischere Heterogenität von Parametern kann durch die Erstellung von Lokalmodellen, zum Beispiel im Hektometerbereich, erreicht werden. In diesem Fall können, bei einer Rasterauflösung von vertretbarer Grösse, die Methoden für die Generierung von heterogenen Milieus (z. B. Fang & Tacher 2003) angewendet werden. Diese Methoden bilden zwar die Parameterverteilung auch nicht realistisch ab, aber es ergeben sich daraus plausible Umsetzungen, welche es erlauben, die Wirkung der Heterogenitäten auf das System zu testen. Sie sind auch eine grosse Hilfe, um die Parameter bezogen auf das Rutschgebiet festzulegen.

3.5 Charakteristiken der numerischen Modellierungsprogramme

Die hydrogeologischen Besonderheiten von Rutschungen besitzen gewisse Charakteristiken, welche die Programme für die numerische Modellierung wiedergeben müssen.

Im transienten Regime und vor allem bei ungesättigten Fliessverhältnissen erhöht die automatische Anpassung der Zeitschritte durch das Programm die Chancen einer Konvergenz der Berechnung und erlaubt, diese so kurz wie möglich zu halten. In der Praxis ist diese Eigenschaft entscheidend. Während der Schneeschmelze oder bei Gewittern (Spitzenwerte der Infiltration) sind die hydraulischen Gradienten so hoch, dass z. B. eine 3-D-Modellierung (ungefähr 35 000 Verknüpfungen) in ungesättigtem Zustand bei Triesenberg (Beschreibung des Fallbeispiels: siehe Anhang A1) auf einem Computer mit schnellem Monoprozessor in einem Rechentag nur gerade drei Tage Abfluss simulieren kann.

Die Konvergenz der Berechnung einer Strömung im ungesättigten Milieu hängt direkt von der Auflösungstechnik eines Gleichungssystems in jedem Zeitschritt ab. Eine hohe Qualität des Auflösungstools und das Verfügbarmachen von spezifischen Optionen machen es in der Regel möglich, eine Konvergenz der Berechnung zu erreichen. Aus diesem Grund muss die Modellierung eines stationären Zustands des Abflusses im ungesättigten Milieu immer durch eine Berechnung im transienten Zustand und mit konstanten Randbedingungen erfolgen. Die Anwendung des stationären Rechenmodus führt zu wenig verlässlichen Resultaten im ungesättigten Milieu.

Simulierte Perioden umfassen oft mehrere Monate oder Jahre. Daher sollte das Programm es erlauben, die Verhältnisse mit zeitlich variablen Randbedingungen zu programmieren, ohne dass während der Berechnung eingegriffen werden muss, um diese zu verändern. Dies betrifft typischerweise die Zeitreihen der effektiven Versickerung.

Zwei Hauptfamilien numerischer Modelle werden in der Hydrogeologie verwendet: die Finite-Differenzen-Methode und die Finite-Elemente-Methode. Letztere wird aufgrund der Diskretisierungsqualität, obschon aufwendig in der Berechnung, immer häufiger eingesetzt. Sie erlaubt es, in 3-D ein Gitter aus Parallelepipeden, dreieckigen Prismen oder Tetraedern zu erstellen. Was die mechanischen Modelle betrifft, besteht das Gitter aus Gründen der Berechnungsstabilität immer aus Parallelepipeden. Dieser Punkt muss berücksichtigt werden, soll das gleiche Gitter für beide Modelltypen verwendet werden. In der Praxis werden eher unterschiedliche, gröbermaschige Gitter für die mechanischen Modelle verwendet, um die Rechenzeit zu begrenzen.

Angaben zu verschiedenen Programmen finden sich auf der Website der *International Association for Mathematical Geology*.

Kleiner Überblick über die wichtigsten Ansätze bei der geomechanischen Modellierung

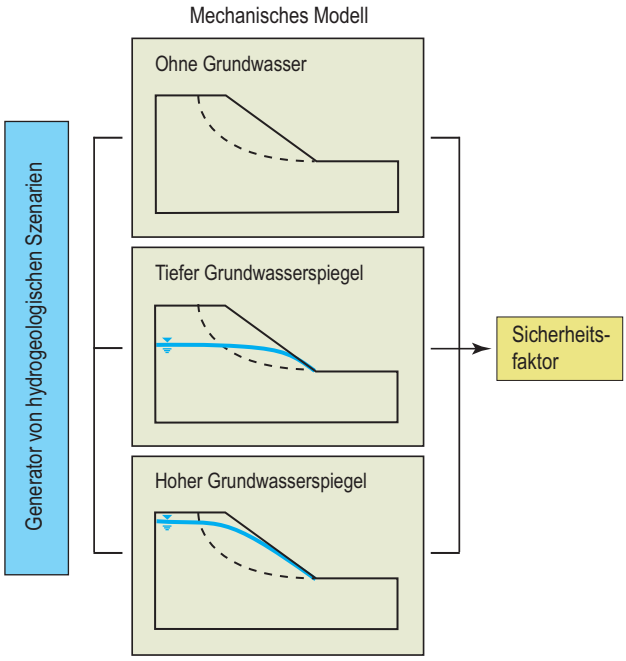
Um die Wirkung von Sanierungsmassnahmen, insbesondere der Drainage, auf die Stabilisierung der Hangbewegungen zu quantifizieren, kann zu einem ersten klassischen, grob vereinfachenden Ansatz gegriffen werden, indem die Bedingungen des Grenzgleichgewichts der instabilen Masse bestimmt werden. Dabei wird das Verhältnis der bewegungshemmenden zu den bewegungsfördernden Kräften in verschiedenen hydrogeologischen und mechanischen Hypothesen definiert (Vulliet & Dewarrat 2001). Allerdings ergibt diese Analyseart, für die es verschiedene Berechnungsmethoden gibt (Bishop, Morgenstern und vor allem Price), nur eine Sicherheitsmarge in Form eines Globalfaktors in Bezug auf das theoretische Gleichgewicht des Hangs (Sicherheitsfaktor > oder = 1). Sie erlaubt keine Quantifizierung der Veränderungen bei Bedingungen nahe am Grenzwert, in denen man sich in der Regel im Falle einer Drainage des Hangs bewegt (ein Gewinn von einigen Prozenten auf dem realen Sicherheitsfaktor genügt in der Regel, um die Bewegungen signifikant zu verlangsamen).

Die beschriebene Vorgehensweise beruht auf einer deterministischen Analyse, bei welcher vorgängig die Grenzbedingungen festgelegt werden. Es ist aber auch möglich, die zufälligen Änderungen der hydrogeologischen Verhältnisse, wie die geomechanischen Parameter, in einem probabilistischen Ansatz anzugehen. Dies, indem die wichtigsten variablen Parameter mit ihren Mittelwerten und ihrer Standardabweichung sowie durch ein Gesetz der statistischen Verteilung (Harr 1981) definiert werden. Mit diesem Ansatz wird statt der Gleichgewichtsbedingungen die Wahrscheinlichkeit festgelegt, dass der Punkt des theoretischen Gleichgewichts überschritten wird. Diese Art Wahrscheinlichkeit ist jedoch insofern nicht zeitlicher Natur, als dass ihre Einbeziehung zur Bestimmung der Grössenordnung der zeitlichen Wahrscheinlichkeit bei einer gegebenen Intensität nicht unmittelbar ist. Ihr Informationsgehalt ist jedoch aussagekräftiger als ein Sicherheitsfaktor, denn sie berücksichtigt auf explizite Weise die natürliche Variabilität der Parameter und die Kombination ihrer Wirkungen auf die Stabilität. Was die Dichtefunktion der Wahrscheinlichkeit betrifft, so kann sie durch eine Betafunktion dargestellt werden, in der das Mittel, die Standardabweichung und die Extremwerte die bestimmenden Parameter sind.

Um die Verschiebungen aller Punkte und die Verteilung der Kräfte in einer Masse in Bewegung zu quantifizieren, ist es notwendig, geomechanische Modelle nach der Finite-Elemente-Methode einzusetzen. Diese Modelle bilden das Verhalten des beteiligten Materials im Verlauf der Zeit und/oder unter der Wirkung der Veränderung der hydrogeologischen Verhältnisse (Vulliet 2000) ab. Die Bedingungen werden durch die hydrogeologische Modellierung (natürlicher Zustand und Zustand mit Drainage) ermittelt und ins geomechanische Modell eingesetzt (Abb. 18). Die Charakteristiken der Verformbarkeit der verschiedenen beteiligten Materialien oder Bodenschichten unter unterschiedlichem Druck müssen bekannt sein. Die Grenzwerte der Bruchfestigkeit allein reichen nicht aus. Die geomechanischen Modelle legen die Verformungsbedingungen jedes Gitterelements unter der Wir-

kung einer Belastungsveränderung fest und bestimmen die entsprechenden Verschiebungsfelder sowie die Scherzonen an der Oberfläche wie in der Tiefe. Es ist also möglich, den Wert der Verschiebung an einem Punkt der Rutschung im Verlauf einer Beschleunigungsphase zu quantifizieren und dabei entweder die natürlichen hydrogeologischen Verhältnisse oder die veränderten Verhältnisse durch die Drainagemassnahme mit einzubeziehen.

Abb. 18 > Hydrogeologische Modelle erlauben die Erstellung von Verhaltensszenarien des Grundwassers, die anschliessend in mechanische Modelle integriert werden, um daraus die Wirkung auf die Gleichgewichtsbedingungen des Hangs zu bestimmen



Dieser zukunftsweisende Ansatz bleibt insofern komplex, als die wichtigsten Bewegungen oft in einem Horizont von geringer Mächtigkeit ablaufen (Ebene oder Gleitfläche) und deren zuverlässige Modellierung (feines Gitter) und Charakterisierung (auf der Ebene der geomechanischen Parameter) nicht einfach sicherzustellen sind. Dennoch erlauben die Resultate, die im Rahmen von gut dokumentierten Fallstudien wie der Rutschung von La Frasse (Tacher et al. 2005; siehe Abb. 4, Abb. 20 und Abb. 32) und am Triesenberg (Anhang A1) erzielt werden, signifikante Schlüsse über die Wirksamkeit der Sanierungsmassnahmen zu ziehen.

4 > Überblick über die Beziehungen zwischen Hydrogeologie und Bewegung

Aufgrund der Vielfalt der geologischen Verhältnisse korrelieren Bewegungen von Rutschungen in unterschiedlicher Weise mit den Grundwasserverhältnissen: Die Reaktion auf die Niederschlagsverhältnisse kann einfach und direkt, aber auch komplex und nur durch eine Funktion zu erklären sein, welche den Grundwasserfluss im Hang beschreibt; schliesslich können die Bewegungen auch von den Niederschlägen unabhängig sein.

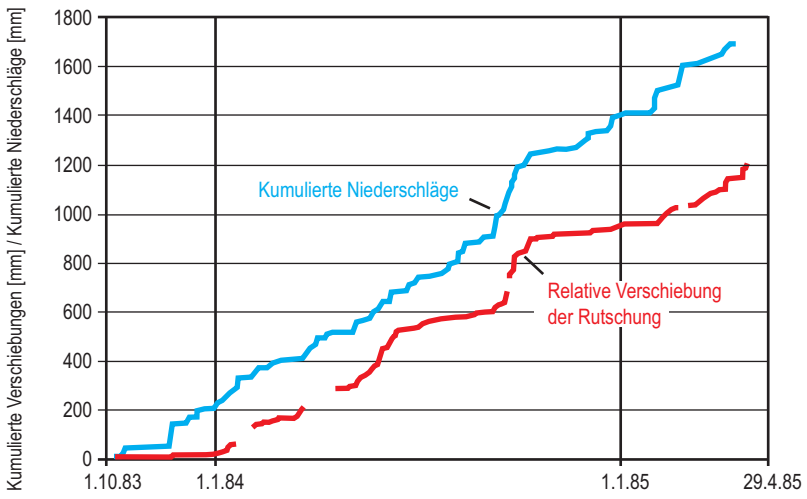
Die Korrelationen zwischen Bewegung und Grundwasserfliessverhältnissen können mehr oder weniger direkt, komplex oder auch inexistent sein. Dieses Kapitel zeigt diese Unterschiede anhand von drei repräsentativen Fallbeispielen auf.

4.1 Schnelle Reaktion

Die meisten relativ oberflächennahen Rutschungen zeigen ein Regime der Verschiebungen, welches stark mit den Niederschlägen zusammenhängt. Der Fall der Rutschung von Villarbeney, am rechten Ufer des Greyerzersees, ist dafür ein gutes Beispiel (Abb. 19).

Abb. 19 > Fortlaufende Entwicklung der Oberflächenbewegungen eines Punktes im aktivsten Teil der Rutschung Villarbeney (Freiburger Voralpen) zwischen Oktober 1983 und April 1985 und der Tagesniederschläge, die auf der Rutschung gemessen wurden

Das Beispiel zeigt eine gute Gesamtkorrelation dieser Daten, wobei besonders die Beschleunigungsspitze im Herbst 1984 hervorragend korreliert. Die Bewegungen im Winter sind jedoch aufgrund des in Form von Schnee gefallenen Niederschlags abgeschwächter. Die Oberflächenbewegung wurde mittels Invardraht-Extensometer ab einem wenig aktiven Punkt der Rutschung überwacht, sodass die tatsächlichen Verschiebungen am dargestellten Punkt effektiv etwas grösser sind.



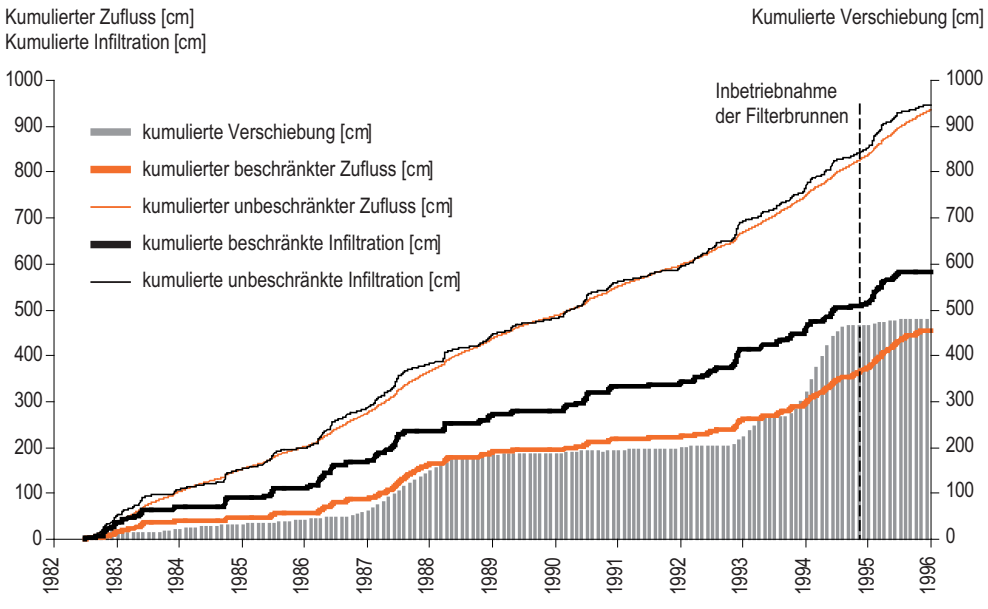
nach Engel 1986, Bonnard et al. 1989

4.2 Komplexe Reaktion

Wenn der Wassereintrag in die Rutschung nicht nur aus der Versickerung in die oberflächennahen Schichten besteht, reicht die Beziehung Regen/Verschiebung nicht aus, um den Einfluss des Wassers auf die Bewegung zu charakterisieren. So war z. B. bei der Rutschung La Frasse eine komplexe Betrachtung des Wasserzuflusses in die Rutschung notwendig, um das Regime der Verschiebungen zu erklären (Abb. 20). Am Triesenberg zeigte sich, dass die Schneeschmelze im angrenzenden hydrologischen Einzugsgebiet einen entscheidenden Einfluss auf das Verhalten der Rutschung hat (siehe Anhang A1).

Abb. 20 > Beziehung zwischen hydrogeologischen Parametern und Verschiebungen bei der Rutschung La Frasse (Kanton Waadt)

Kumulierte Verschiebungen (grau) in der Zone Süd (aktivster Bereich) und Zufluss, der die Rutschung gemäss vier Hypothesen speist. Die Kurven mit der Legende «Infiltration» (schwarz) bezeichnen die effektive Versickerung an der Oberfläche der Rutschung. In der einen sind ausschliesslich die täglichen Niederschlagsereignisse von mehr als 2 mm festgehalten («beschränkte Infiltration»). Die Kurven «Zufluss» (orange) entsprechen einer zusammengesetzten Speisung aus zwei Dritteln Zufluss von den Rändern der Rutschung und einem Drittel effektiver Versickerung von der Oberfläche. Die Komponente Rand ist mit einem Verzögerungseffekt durch eine Gewichtung nach Gauss von bis zu zwei Jahren Infiltration im hydrologischen Einzugsgebiet verbunden. Dies sind diejenigen Werte, die mit der alleinigen Berücksichtigung der Niederschlagsintensitäten über 2 mm/Tag («beschränkter Zufluss») die beste Korrelation mit den Bewegungen zeigen. Dies unterstreicht einerseits die Notwendigkeit, pluviometrische Ereignisse der Vergangenheit einzubeziehen, und andererseits, dass es die intensivsten Infiltrationsepisoden sind, welche die Vorwärtsbewegung der Rutschung bestimmen. Ab Ende 1994 verliert diese Korrelation aufgrund der Inbetriebnahme eines Schirms bestehend aus 22 vertikalen Filterbrunnen mit Pumpen ihren Sinn.



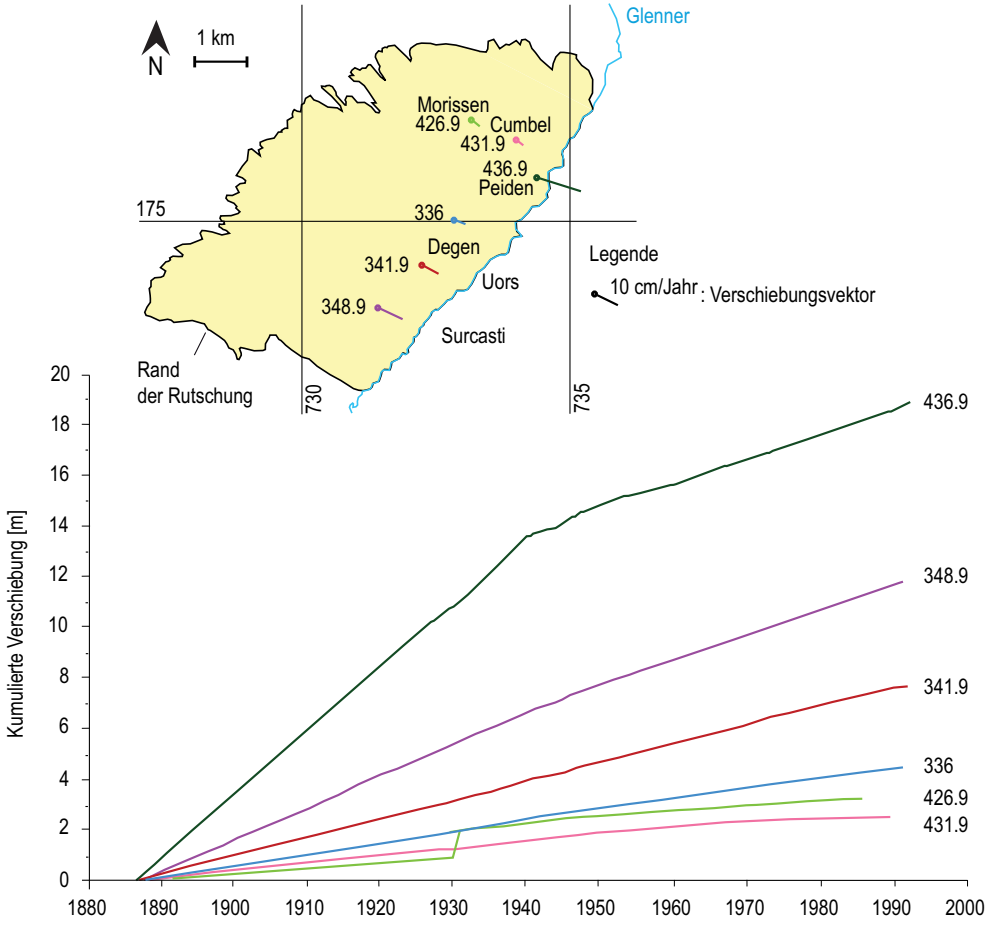
geändert nach Tacher et al. 2005

4.3 Von hydrologischen Schwankungen unbeeinflusstes Verhalten

Einige Rutschungen zeigen keine Beschleunigung in Perioden grosser Niederschläge. Es handelt sich dabei in der Regel um tiefgründige Rutschungen und solche sehr grossen Ausmasses (Abb. 21). Diese Unempfindlichkeit rührt sicherlich von der grossen Trägheit von Fliesssystemen her, wie sie gewöhnlich in tiefen hydrogeologischen Systemen vorkommen. Die Reaktion des Grundwassers ist so stark gedämpft, dass sich die Strömungsverhältnisse im Verlauf der Zeit praktisch nicht verändern. Solche Rutschungen sind allerdings selten.

Abb. 21 > Messungen der Oberflächenbewegungen der grossen Rutschung im Lumnez seit 1887 (30 km², Kanton Graubünden)

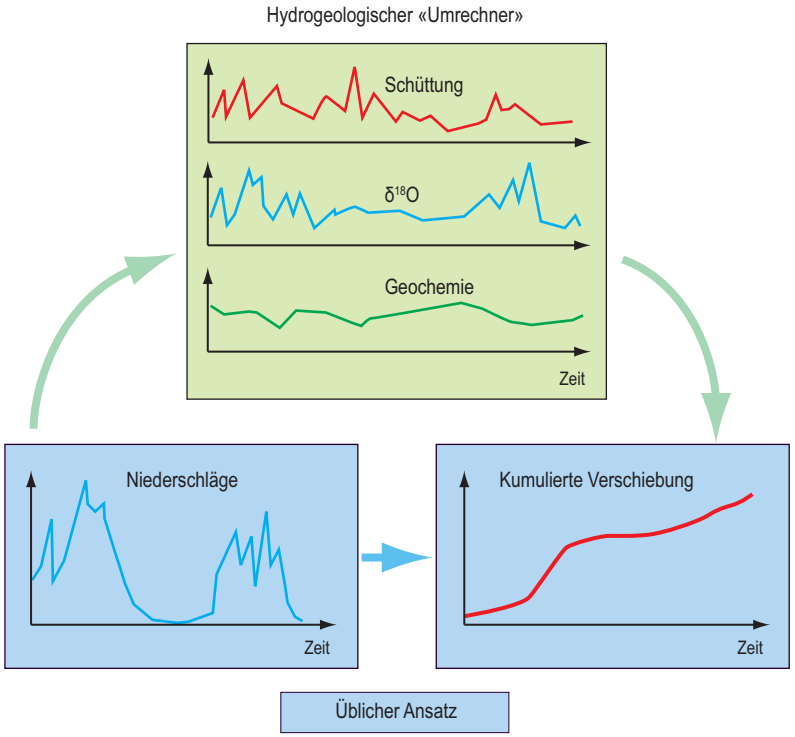
Die meisten Punkte zeigen langfristig eine mittlere konstante Geschwindigkeit. Eine Ausnahme bildet Punkt 436.9 (Kirche von Peiden), der seit Mitte des 20. Jahrhunderts eine geringere Geschwindigkeit aufweist (8 cm/Jahr), vermutlich als Folge des Baus der Zervreilastaumauer an einem Zufluss des Glenners. Punkt 426.9 in Morissen hat hingegen 1930 eine Beschleunigung erfahren, ohne dass die Niederschlagsentwicklung diese begründen könnte.



geändert nach Noverraz et al. 1998

Zusammenfassend zeigen diese Beispiele die Notwendigkeit, allgemeine Schemata hinter sich zu lassen und im Detail und in jedem Fall die Funktion «Anreicherung – unterirdische Zirkulation – Reaktion durch Verschiebungen» zu analysieren. Offensichtlich sind zahlreiche Studien, die versuchen, die Niederschläge mit den Bewegungen in Korrelation zu bringen, in den meisten Fällen zum Scheitern verurteilt, weil ein Schritt in der Beziehung Störung/Reaktion fehlt (Abb. 22).

Abb. 22 > Die Beziehung zwischen Niederschlägen und Bewegungen sollte in der Regel über ein beeinflussendes Element führen, das nicht umgangen werden kann: die unterirdischen Fliessverhältnisse



5 > Sanierung von Rutschungen durch Fassen und Ableiten des Wassers

Zahlreiche und vielfältige Methoden und Techniken ermöglichen es, hydrologische und hydrogeologische Verhältnisse zu beeinflussen, um die Hangstabilität zu verbessern. Sie können nach dem Bereich eingeteilt werden, in welchem sie ihre Wirkung entfalten: an der Oberfläche (z. B. offene Sammelgräben für das Oberflächenwasser), in geringer Tiefe (z. B. Drainagegräben) und schliesslich in grösserer Tiefe (z. B. Stollen mit strahlenförmig angelegten Drainagebohrungen). Auch der Wald beeinflusst die Fliessverhältnisse und kann bei einer Sanierung eine wichtige Rolle spielen.

Die Prinzipien, welche den Sanierungskonzepten mittels Drainage zugrunde liegen, sind in der Einleitung aufgeführt und kommentiert. Die verschiedenen Interventionstechniken werden im Folgenden nach ihrem Wirkungsort vorgestellt: an der Oberfläche, in geringer Tiefe und in grösserer Tiefe. Mechanische Verbauungen werden in diesem Leitfaden nicht spezifisch behandelt (siehe z. B. Holtz & Schuster 1996); sie können in gewissen Fällen für lokale Stabilisierungen vorteilhaft mit den Sanierungsmassnahmen kombiniert werden.

5.1 Sanierungsgrundsätze und -konzepte

Es geht hier nicht darum, die Berechnung des Gleichgewichts von Hängen zu behandeln. Der Leser konsultiere, wenn nötig, die allgemeinen Werke wie Veder (1981) oder Turner und Schuster (1996). Es sei jedoch daran erinnert, dass das Grundwasser mit mehreren Faktoren auf eine abgleitende Masse einwirkt (Abb. 23). Einige wirken auf bewegungsfördernde Kräfte der Instabilität, andere wiederum auf die bewegungshemmenden Kräfte.

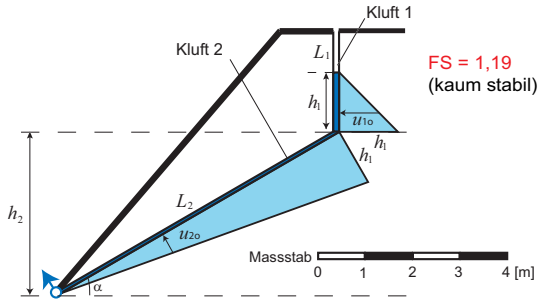
Das Prinzip der hydrogeologischen Sanierung (Drainage) besteht darin, die Fliessverhältnisse künstlich zu verändern, um die bewegungsfördernden Wirkungen des Wassers zu reduzieren und die bewegungshemmenden Kräfte zu erhöhen. Dieses Resultat lässt sich mit zwei Mitteln erreichen, nämlich:

- indem man den Zufluss zum Untergrund durch die Reduktion der Einsickerung an der Oberfläche, an den Seiten oder unter der Gleitmasse verringert;
- indem man mittels verschiedener Drainagetechniken den Grundwasserspiegel in der instabilen Masse und/oder im Untergrund absenkt.

Abb. 23 > Wirkung des Wassers auf die Stabilität eines Felskeils

Für dieses fiktive Beispiel werden realistische mechanische Eigenschaften angenommen.
Die Stabilität wird durch die Berechnung des Sicherheitsfaktors FS des Felskeils ermittelt.
Fall A: wasserführende Klüfte mit offenem Abfluss. Stabil, aber nahe am Limit.
Fall B: idem, aber mit Verschluss des Abflusses, zum Beispiel durch Frost. Die Stabilität ist nicht mehr gewährleistet.
Fall C: ohne Grundwasser in den Klüften; stabil.

Fall A: wasserführende Klüfte, Abfluss offen
Geringe Strömung (quasi-statisch) $K2 << K1$



FS = 1,19
(kaum stabil)

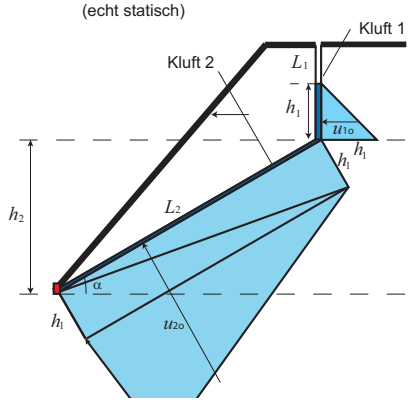
$$u_{1o} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot h_1^2 \qquad u_{2o} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot h_1 \cdot L_2$$

Scherwiderstand auf offener Kluft 2

$$FS = \frac{R}{M} = \frac{c'.L_2 + (W \cdot \cos\alpha - u_{2o} - u_{1o} \cdot \sin\alpha) \cdot tg\phi'}{W \cdot \sin\alpha + u_{1o} \cdot \cos\alpha}$$

mit c' und ϕ' = Kohäsion und interner Reibungswinkel (effektiv), Kluft 2

Fall B: wasserführende Klüfte, Abfluss verschlossen
(echt statisch)



FS = 0,09
(sehr unstabil)

$$u_{1f} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot h_1^2 = u_{1o}$$

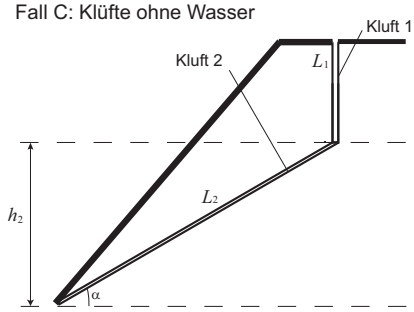
$$u_{2f} = \gamma_w \cdot \frac{h_1 + h_1 + h_2}{2} \cdot L_2 = \gamma_w \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right) \cdot L_2$$

Scherwiderstand auf verschlossener Kluft 2

$$FS = \frac{R}{M} = \frac{c'.L_2 + (W \cdot \cos\alpha - u_{2f} - u_{1f} \cdot \sin\alpha) \cdot tg\phi'}{W \cdot \sin\alpha + u_{1f} \cdot \cos\alpha}$$

mit c' und ϕ' = Kohäsion und interner Reibungswinkel (effektiv), Kluft 2

Fall C: Klüfte ohne Wasser



FS = 1,59
(stabil)

	h_1 [m]	h_2 [m]	α [°]	L_2 [m]	c' [kPa]	φ' [°]	W [kN]	γ_w [kN/m³]	u_1 [kN]	u_2 [kN]	R	M	FS = R/M
Fall A	2.60	7.20	30	14.40	5	40	1016	10.00	33.80	185.90	639.64	537.27	1.19
Fall B	2.60	7.20	30	14.40	5	40	1016	10.00	33.80	893.75	45.68	537.27	0.09
Fall C	0.00	7.20	30	14.40	5	40	1016	10.00	0.00	0.00	809.81	508.00	1.59

K = Durchlässigkeit; *u* = hydrostatischer Druck; Indiz *o* = offen; Indiz *f* = geschlossen; *R* = Summe der bewegungshemmenden Kräfte; *M* = Summe der bewegungsfördernden Kräfte

Die Auswirkungen einer Potenzialverringerung durch Drainage sind die folgenden:

Bewegungsfördernde Kräfte

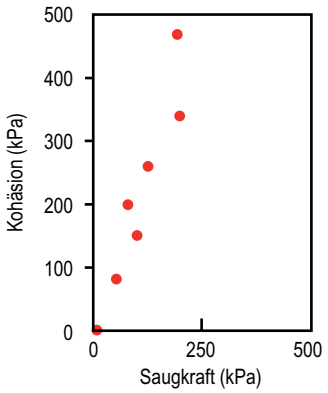
> Verringerung des hydrostatischen Auftriebs in den Poren bzw. in den Diskontinuitäten (hydrostatische Verhältnisse);
> Verringerung des hydraulischen Gradienten und somit proportional zu den Perkolationskräften in der gesättigten Zone (hydrodynamische Verhältnisse);
> Verringerung des Risikos für Bewegungsschübe durch Aufquellen.

Bewegungshemmende Kräfte

> Bei Material mit tonigem Anteil erhöht eine Reduktion des Wassergehalts die Scherfestigkeit nach Elimination des Porendrucks; es ist eine langsame Reaktion, die vor allem auf die Kohäsion einwirkt (Abb. 24) und weniger deutlich auf den Reibungswinkel;
> eine Reduktion des Wassergehalts verringert die Neigung dieser Materialien, sich mit der Zeit zu verformen (Schlupf, Kriechen);
> bei Materialien mit feiner Körnung und schwacher Kohäsion reduziert eine Verringerung des Wassergehalts das Risiko der Materialbewegung durch Verflüssigung;
> bei Materialien mit grober Körnung erhöht die Reduktion des Wasserdrucks schnell die effektive Spannung zwischen den Körnern und damit die Scherfestigkeit;
> bei Felsrutschungen steigt die Scherfestigkeit der Diskontinuitäten, wenn der Druck in der Fuge abnimmt (Verzahnungseffekt aufgrund der Rauhigkeit).

Abb. 24 > Beziehung zwischen der Saugkraft und der Kohäsion bei feinen Böden. Versuche an Ton aus der Kiesauswaschung der Region Sitten (Kanton Wallis)

Je nach der Mineralogie der Partikel, insbesondere der Tone, im Bodenmaterial, kann diese Beziehung sehr unterschiedlich sein. Der Reibungswinkel kann sich ebenfalls auf den Wassergehalt auswirken. Die Tests müssen am effektiv in den Gleitschichten vorhandenen Material vorgenommen werden. In der Praxis nimmt die Saugkraft mit Abnahme der Sättigung zu.



aus Geiser 1999, geändert nach Parriaux 2009

Zusammenfassend wirken alle Drainagemassnahmen auf eine Stabilisierung des Hanges hin. Drainagen haben auch weniger erwünschte Nebeneffekte zur Folge:

> Setzungen infolge der Erhöhung der effektiven Spannungen; die Rutschmasse besteht häufig aus besonders gut komprimierbaren geologischen Formationen, insbesondere Sumpf- und Hangschuttablagerungen; die differenziellen Setzungen, die dabei entstehen, sowie die lange Dauer dieser Verformungen können grosse Schäden an Bauten verursachen;

- Zunahme der Perkolationskräfte, wenn die Drainage nur im nahen Umfeld der Drainage wirkt, ohne den Grundwasserspiegel generell zu senken;
- teilweises oder vollständiges Versiegen von Quellen, von denen manche Trinkwasserfassungen speisen, oder mögliche Beeinflussungen der Wasserqualität;
- Auswirkungen auf die Umwelt durch das Trockenlegen von unter Umständen geschützten Feuchtgebieten oder von Bächen.

Die Wahl der Sanierungstechnik ist eine komplexe Operation, welche von mehreren Faktoren abhängt, insbesondere:

- dem konzeptuellen Modell,
- den hydrogeologischen Verhältnissen,
- der Wirksamkeit der Technik (Mass der Absenkung, Regionalisierung der Wirkungen),
- der Zeit, die es braucht, um die stabilisierenden Massnahmen umzusetzen (Krisenfall) und um eine Wirkung zu erreichen,
- der Dauerhaftigkeit, die für die Sanierungsbauten vorgesehen ist,
- den Auswirkungen auf die Umwelt,
- den Risiken, welche indirekt die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel beeinflussen.

Die hier präsentierten verschiedenen Massnahmen und Techniken werden systematisch aufgelistet, damit sie verglichen werden können. Im Prinzip werden die folgenden Charakteristiken beschrieben:

- Art der Massnahme und deren Funktionsweise,
- zu erstellende Bauten,
- Bauweise,
- Betriebsweise,
- hydrogeologischer Kontext, für den die Technik geeignet ist,
- Wirksamkeit, Wirkungsbereich,
- Vorlaufzeit für die Umsetzung,
- Dauerhaftigkeit,
- Baukosten,
- Betriebskosten,
- Verweis auf ein Fallbeispiel im Anhang.

Jeder Punkt ist durch Beispiele aus Fällen dokumentiert, bei denen solche Massnahmen umgesetzt wurden. Der Leser, die Leserin kann auch auf die im Anhang aufgelisteten Fallstudien zurückgreifen (A1 bis A8), welche die Erläuterungen mit zahlreichen zusätzlichen Abbildungen sinnvoll ergänzen. Abb. 25 stellt in schematischer Weise das Prinzip der wichtigsten Techniken dar und ermöglicht einen leichten Vergleich. Tab. 2 am Ende des Kapitels fasst die Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden zusammen und präzisiert deren am besten geeigneten Anwendungsbereich.

5.2 Eingriffe beim Oberflächenwasser

Der Eingriff beim Oberflächenwasser bezweckt, dessen Infiltration in die Gleitmasse zu reduzieren. Er kann oberhalb oder auf der Rutschung selbst erfolgen.

5.2.1 Offene Sammelgräben für das Oberflächenwasser

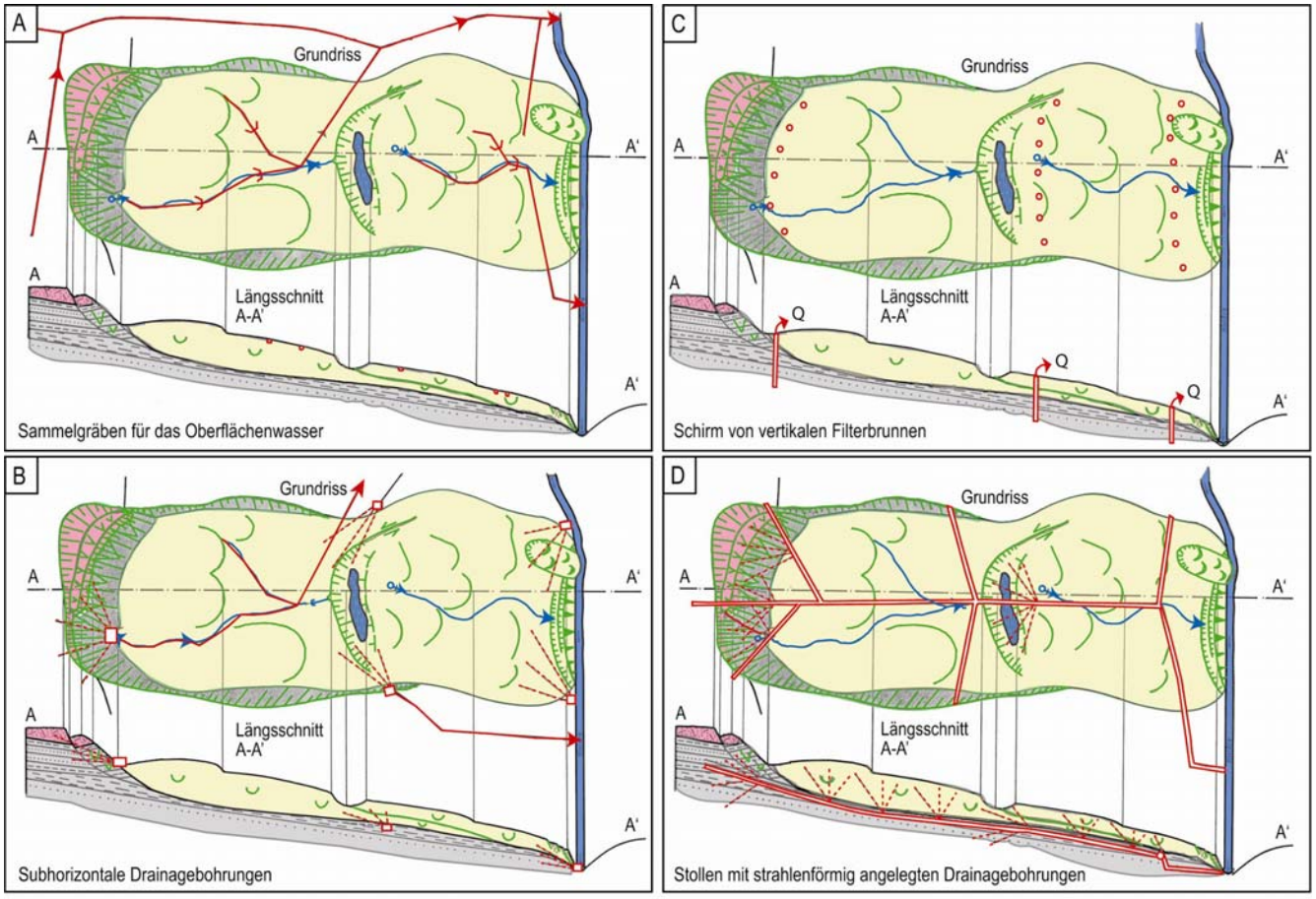
Art und Wirkung der Massnahme

Das Oberflächen- und Quellwasser wird oberhalb und auf der Rutschung selber durch ein Netz von Abflussrinnen gesammelt, welche die Ableitung erleichtern und das Infiltrationsrisiko verringern. Dieses Netz folgt den natürlichen Talwegen. Das gesammelte Wasser ist ein Gemisch aus reinem Oberflächenwasser und Sickerwasser der Böden, aber auch Grundwasser, das an die Oberfläche tritt. Die Absenkwirkung in den oberflächennahen Erdschichten ist sehr beschränkt.

Im Fall von Rutschungen mit deutlicher Ablations- und Akkumulationszone sollte das Oberflächenwasser im oberen Bereich wenn möglich seitlich abgeführt werden; dies, um zu vermeiden, dass es an der Oberfläche der Akkumulationszone stagniert (Abb. 25A). Ein Sammeln des Wassers oberhalb der Anrissnische wird ebenfalls empfohlen. Ebenso sollten Quellen so sorgfältig wie möglich gefasst werden (siehe Anhang A4).

Abb. 25 > Vergleichendes Schema der wichtigsten hydrogeologischen Sanierungsmethoden

A: Offene Sammelgräben für das Oberflächenwasser. B: subhorizontale Drainagebohrungen zur Entwässerung mittels Schwerkraft. C: Schirm aus vertikalen Filterbrunnen. D: Stollen mit strahlenförmig angelegten Drainagebohrungen.



geändert nach Parriaux 2009

Für diese Abflussnetze werden verschiedene Vorrichtungen verwendet. Der erste Typ entspricht einem einfachen Graben ohne Abdichtung. Er ist in undurchlässigen Tonböden realisierbar. Beim zweiten Typ wird die Sohle mit handelsüblichen Rinnen aus verschiedenen Materialien (Holz, PVC oder PE, galvanisiertem Blech oder Zement) abgedichtet. Energiebrechende Schwellen werden manchmal eingesetzt, um die Geschwindigkeit des Wassers zu reduzieren. Das erste System ist billiger, aber es reduziert das Infiltrationsrisiko nicht wesentlich, vor allem dann nicht, wenn das Gefälle in der Rinne gering ist. Das Wasser muss bis in einen Bereich geleitet werden, in welchem es keinen Schaden mehr anrichten kann, beispielsweise in ein nahe gelegenes Bachbett.

Zu erstellende Bauten

Das Netz wird von örtlichen Unternehmen mit Kleinbaggern gegraben. Die Rinnen können auf dem Boden verlegt und von Hilfskräften auf der Schulter an die abschüssigen Stellen gebracht werden.

Bauweise

Der Wasserfluss erfolgt rein gravitativ. Um zu vermeiden, dass die Rinnen verstopfen oder durch Hangbewegungen undicht werden, muss das Entwässerungssystem regelmässig unterhalten werden.

Betriebsweise

Offene Sammelgräben eignen sich für eine Sanierung in all jenen Fällen, in denen eine beträchtliche Infiltration zu befürchten ist, welche zur Anreicherung des Grundwassers beiträgt.

Hydrogeologischer Kontext, für den sich die Technik eignet

Die Wirksamkeit von offenen Sammelgräben auf tiefer liegende Grundwasserspiegel ist sehr begrenzt.

Wirksamkeit, Wirkungsbereich

Die Massnahmen sind sehr schnell umsetzbar, weil konventionelle Bautechniken zum Einsatz kommen.

Vorlaufzeit für die Umsetzung

Wenn das Netz gewartet wird und wenn die Bewegungen nicht allzu stark sind, ist eine gute Dauerhaftigkeit zu erwarten. Die Lebensdauer der Rinnen aus Holz (Verfaulen) und aus PVC (Brüchigkeit) ist in der Regel auf rund 20 Jahre beschränkt, wenn die Bewegungen nicht allzu ausgeprägt sind. Ein Bruch der Rinnen kann insofern nachteilig sein, als das Wasser an diesen sehr heiklen Stellen erneut ins Innere der Gleitmasse eindringen kann.

Dauerhaftigkeit

Die entstehenden Kosten sind bescheiden. Eine Rinne aus Metall kostet, platziert, rund 200 Franken pro Laufmeter.

Baukosten

Die Betriebskosten sind gering (wenn die Bewegungen langsam sind).

Betriebskosten

Fallbeispiele werden in den Anhänge A3 und A5 vorgestellt.

Fallbeispiele

5.2.2 Korrekturen von Fliessgewässern

An Fliessgewässern werden oft bautechnische Stabilisierungsmassnahmen vorgenommen, welche vor allem der Erosion und damit Uferstabilität entgegenwirken sollen. Obschon diese Massnahmen nicht Gegenstand dieses Leitfadens sind, erscheint es sinnvoll, einige Techniken gegen die Erosion von Bachsohlen in Erinnerung zu rufen, ohne allzu sehr ins Detail zu gehen. Allgemein gilt: Wenn das Erdreich, welches das Ufer bildet, locker ist und wenn die Erosion am Bachuferfuss ein Rutschungsrisiko darstellen könnte, sind Bauten gegen die Erosion unabdingbar. Die eingesetzten Me-

thoden können sich je nach Gefälle der Sohle, der zu berücksichtigenden Abflüsse und dem zur Verfügung stehenden Raum unterscheiden.

Grünverbauungen (Flechtwerk, Faschinen, Stecklinge usw., z. B. Zeh 2007, Zeh 2010) kommen in der Regel nur für einen fluvialen Wasserabfluss in Frage, bei dem die bewegungsfördernden Kräfte relativ moderat sind. In Bachläufen vom Typus Wildbach ist jedoch eine Verbauung mittels Felsblöcken unvermeidbar. In der Praxis muss die untere Reihe der Felsblöcke unter dem Niveau der Bachsohle gut verankert sein. Die Blöcke der oberen Reihen ihrerseits werden so platziert, dass die Uferböschung ein maximales Gefälle von 2 : 3 aufweist und das Hochwasserniveau erreicht wird. Hinter den grossen sichtbaren Felsblöcken werden kleinere Blöcke so platziert, dass sie einen Filter bilden. Bei grossen Hangwasseraustritten ist das Einbringen eines Geotextils vorzusehen. In einigen kritischen Fällen, in denen das Fliessgewässer das angrenzende Terrain durch Mäander destabilisiert, und um gewisse Bauten zu schützen, kann sich eine simple stabilisierend wirkende Aufschüttung in der Flussschlaufe nahe der Bauten als technisch optimale Massnahme erweisen. Dies kann eventuell die Verlagerung des Bachbettes nach sich ziehen.

Diese Techniken werden entlang von Bachläufen mit dem Ziel angewendet, auf das Grundwasser der Gleitmasse einzuwirken.

Art und Wirkung der Massnahme

Die hydrogeologische Massnahme an Bächen hat im Wesentlichen zwei Ziele:

- einerseits die Anreicherung des Grundwassers durch Infiltration aus der Bachsohle zu begrenzen;
- andererseits die Drainagefunktion der oberflächennahen Bereiche des Grundwasserleiters durch den Bach zu erhöhen.

Der erste Ansatz besteht darin, den Bach in eine weniger gefährliche Zone zu verlegen, wenn möglich ausserhalb der Rutschung, oder seine Sohle an den Stellen mit bedeutender Infiltration in die Rutschmasse abzudichten.

Der zweite Ansatz ähnelt der in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Massnahmen des Sammelns. Es ist jedoch wichtig, sich bewusst zu sein, dass sich in wenig durchlässigem Material die Absenkung des oberflächennahen Grundwassers auf die Bachufer konzentriert. Der hohe Gradient führt dazu, diese durch den Effekt der Perkolationskräfte proportional zum Gradienten zu destabilisieren. In diesen Fällen ist es sinnvoll, kurze drainierende Abschnitte in die Ufer einzubauen, welche es ermöglichen, die Absenkung des Potenzials über die Böschung hinaus zu verlagern und zu verhindern, dass die Perkolationskräfte senkrecht zu dieser wirken. So wird die Stabilität der Ufer gestärkt.

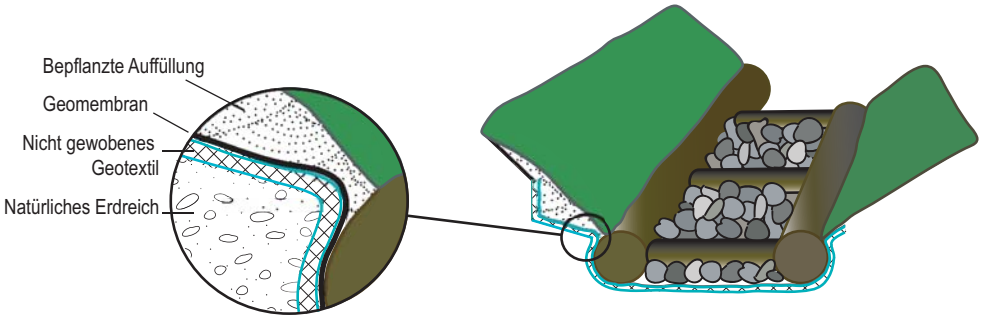
Zu erstellende Bauten (mit verschiedenen Varianten)

Die Abdichtung der Sohle oder die Verlegung des Bachs in einen neuen Lauf macht den Einbau von wenig durchlässigem Material unter der Bachsohle notwendig. Man verzichte dabei auf steifes, wasserdichtes Material (Beton, Asphalt, zementierter Blockteppich) zugunsten von Schichten aus natürlichem Material (Böden mit hohem Tongehalt) oder aus Kunststoff (Geomembranen, Bentonit-Geotextile). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Geomembranen oder -textile an Wirksamkeit verlieren, wenn sie durchlöchert werden. Zum Schutz vor Erosion werden die Abdichtungsschichten durch energiebrechende Bauten, zum Beispiel Schwellen aus Holz, geschützt, um das natürliche Umfeld der Rutschung zu berücksichtigen (Abb. 26); dabei sollten diese

wenn möglich durch Blockteppiche oder grobes Geschiebe abgedeckt werden, damit sie nicht zu sehr der Sohlenerosion und der oberflächlichen Verwitterung ausgesetzt sind.

Die Drainage der Bachufer wird durch den Einbau drainierender Schichten in jenen Bereichen vorgenommen, in welchen die unterirdischen Wasserzuflüsse sichtbar sind. Der in die Böschung eingebaute Drainagebereich wird durch Blockwurf geschützt, welcher die Wirkung der Scherkräfte bei Hochwasser begrenzt. Die Drainage mündet am Fuss des Blockwurfs; mit einem Sicherheitsabstand zur Bachsole wird dabei verhindert, dass der Abfluss durch Geschiebe eingedeckt wird (siehe auch Abschnitt 5.3).

Abb. 26 > Schema des Prinzips der Abdichtung von Bachsohlen



siehe auch Anhang A3

Bauweise

Alle diese Arbeiten sind handwerklich geprägt. Sie werden mit einem Schreitbagger ausgeführt, der das neue Profil aufbaut. Für die Abdichtung eines Bachs arbeitet man abschnittsweise bei Niedrigwasser, indem das Wasser provisorisch durch eine mobile Leitung geführt wird.

Betriebsweise

Die Widerstandskraft gegen Erosion muss nach Hochwasser überwacht werden; die Reparaturen an einzelnen Stellen sind sofort auszuführen, bevor die Abdichtschicht betroffen ist.

Hydrogeologischer Kontext, für den sich die Technik eignet

Die Abdichtung der Bachsohle wird in Zonen mit durchlässiger Bedeckung angewendet, die Drainage in gesättigten Zonen des Uferbereichs.

Wirksamkeit, Wirkungsbereich

Die Abdichtung ist wirksam, wenn sie gut konzipiert ist und gut gewartet wird. Die Drainage an den Bachufern wirkt bei schwacher Durchlässigkeit nur auf kurze Distanz, aber ihre Aufgabe besteht ja auch nur im Uferschutz.

Vorlaufzeit für die Umsetzung

Die Abdichtung der Bachsohle oder die Uferdrainage sind keine Notmassnahmen. Sie bedingen eine Periode mit Niedrigwasser.

Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit ist die gleiche wie für den Schutz vor Erosion. Sie ist gut, wenn der Unterhalt genügend gut ist. Die Schutzbauten aus Holz haben je nach gewählter Holzart und vor allem je nach den Sättigungsverhältnissen eine sehr unterschiedliche Lebensdauer. In ständig gesättigtem Zustand können die Verbauungen aus Holz mehrere Jahrzehnte überdauern; wenn das Holz wechselweise vom gesättigten zum trockenen Zustand übergeht und auch noch Sonnenstrahlen ausgesetzt ist, reduziert sich die Lebensdauer auf etwa zehn Jahre.

Der Eingriff in Bachläufe bedingt beträchtliche Bauarbeiten, die aber mit einfachen Techniken vorgenommen werden. Daher entstehen nur mittelhohe Kosten (in der Regel zwischen 500 und 3000 Franken pro Laufmeter, je nach Breite des Bachs und je nach Zugangsmöglichkeiten).

Baukosten

Die Betriebskosten für den Unterhalt sind tief.

Betriebskosten

Ein Fallbeispiel wird in Anhang A3 vorgestellt.

Fallbeispiel

5.3 Drainagegräben

In Abschnitt 5.2.1 wurde die Methode des Sammelns von Oberflächenwasser durch das Ausheben von offenen Gräben beschrieben. Solche Gräben haben die Eigenschaft, auch das oberflächennahe Grundwasser zu fassen. Oberflächennahe Drainagen (Drainagegräben oder Drainageleitungen) stellen eine Alternative für eine solche Fassung in geringer Tiefe dar.

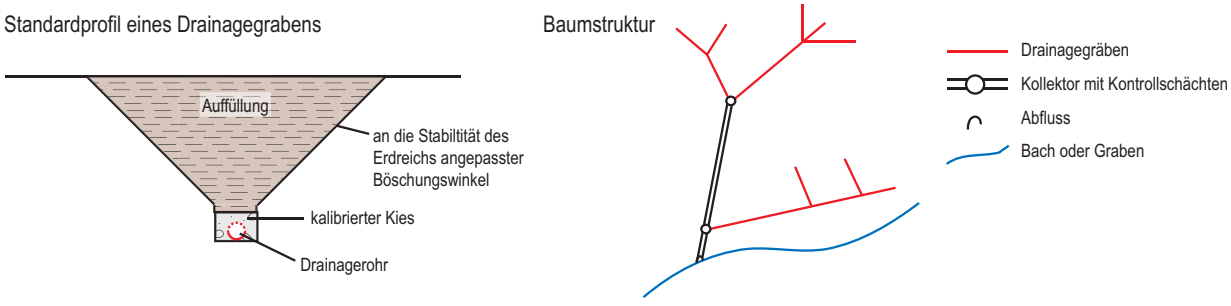
Art und Wirkung der Massnahme

Wie die Drainagen zu landwirtschaftlichen Zwecken in Sumpfgebieten werden die Drainageröhren in Gräben von 1 bis 2 m Tiefe verlegt. Die Gräben werden anschliessend mit Kies verfüllt, und der Boden wird wieder aufgetragen (Abb. 27). Wenn kein Filtermaterial verwendet werden kann und es sich um feinkörniges Erdreich handelt, so empfiehlt es sich, rund um die Drainageröhren ein Geotextil mit feinen Maschen (< 1 mm) zu platzieren. Ebenso kann ein nichtgewobenes Geotextil zwischen den Filterkies und die Bodenauffüllung verlegt werden, um die Verschlammung des Filters zu verhindern. Die verästelte Form des Drainagenetzes ist derjenigen der offenen Gräben sehr ähnlich (Abb. 25A). Man vermeide den Bau von senkrecht zur Hangneigung verlaufenden Abschnitten, um das Instabilitätsrisiko bergseitig und das Risiko der Wiederversickerung von Wasser in das Erdreich zu verhindern; eine Anlage in Y-Form ist vorzuziehen.

Der Bau eines Drainagenetzes bewirkt die Sammlung von Sickerwasser und die Absenkung des Grundwasserspiegels dort, wo er sehr nahe an der Oberfläche liegt. Dies ist vor allem in Quellgebieten der Fall.

Abb. 27 > Schema eines Drainagegrabens (im Profil und Verlegung im Grundriss)

Wenn die Tiefe der Drainage sehr gering und das Erdreich genügend stabil bzw. stabilisiert ist, können die Wände des Grabens senkrecht sein.



Siehe auch Anhang A5

In Quellzonen erlaubt dieser Drainagetyp nicht, Trinkwasser zu fassen, da das Wasser zu oberflächennah gefasst wird und das Grundwasser nicht vom Oberflächenwasser getrennt ist.

Man vergleicht oft die Vor- und Nachteile von Drainagegräben und offenen Gräben. Bei gleicher Tiefe ist der Drainagegraben nicht effizienter als offene Gräben, und er ist wesentlich teurer. Er kann als Alternative in Bereichen in Frage kommen, in welchen die Nutzung des Geländes die Wartung von nicht abgedeckten offenen Gräben nicht zulässt (also in einem Baugebiet oder einer als Weide genutzten Fläche). Für Drainagegräben spricht ferner, dass bei ihnen keine durch Perkolationskräfte bedingten Uferinstabilitäten auftreten.

In einigen Fällen (Klima mit langen Trockenperioden, tonhaltiges Material mit ziemlich hoher Kohäsion) ist es auch möglich, Drainagegräben in einer Tiefe von 5 bis 7 m zu erstellen. Diese häufig in Italien in grossen Rutschungen mit seltenen Reaktivierungsphasen angewandte Technik ist jedoch in der Schweiz, angesichts der Sicherheitsanforderungen bei der Grabung und der hohen Kosten für die Terrassierungsarbeiten dieses Typs, schwierig umzusetzen.

Zu erstellende Bauten

Die in die Gräben verlegten, perforierten Drainagerohre müssen aus stark verformbarem Plastikmaterial bestehen, damit sie sich den Bewegungen des Geländes anpassen können. Ihre transversale Festigkeit muss gleichzeitig hoch genug sein, um das Komprimieren des Rohrs zu vermeiden. Der Filterkies besteht aus einfachem, grobem, gewaschenem Kies (Steine). In schwer zugänglichen Zonen kann auch zu alten Drainagetechniken gegriffen werden, indem Stroh oder Äste oder vor Ort entnommene Steine rund um die perforierten Rohre gelegt werden. Drainagegräben münden in nicht gelöcherte Leitungen aus PVC oder PE mit grösserem Durchmesser (Kollektor). Es müssen regelmässig Sammelkammern ins Netz eingebaut werden, für die Abflusskontrolle und um einen Zugang für allfällige Spülungen zu haben (Abb. 27). Die Wartung dieser Kammern ist jedoch in aktiven Rutschungen schwer sicherzustellen, und ihre Zahl muss aus Kostengründen begrenzt bleiben. Am Ende des Hauptsammlers wird das Wasser in ein Oberflächengewässer eingeleitet.

Je nach örtlichen Verhältnissen können auch Drainage- und Filtermatten verlegt werden, um horizontale Strömungen abzufangen und das so gesammelte Wasser in die Hauptdrainage zu leiten. Es ist darauf zu achten, dass der auf diese Art entstehende Drainageschirm nicht kompaktiert wird.

Bauweise

Diese Arbeiten werden mit den gleichen Geräten vorgenommen, wie sie zur Erstellung der offenen Gräben benötigt werden (Schreitbagger). Die Anlieferung der Rohre und vor allem des Filterkieses erfordert bedeutende Materialtransporte, welche in diesen Gebieten oft schwierig sind. Für diese Arbeiten werden Raupenkipper eingesetzt. Die Tiefe der Gräben ohne Abstützung ist durch die Stabilitätsverhältnisse der Seitenwände begrenzt (im Prinzip 1,5 m gemäss Suva). Grössere Tiefen sind möglich, wenn das Grabgerät eine mobile Abstützung sicherstellt oder wenn geneigte Böschungen erstellt werden.

Betriebsweise

Der Fluss des Wassers erfolgt in den Drainagegräben rein gravitativ.

Drainagegräben eignen sich für Bereiche, in denen der Grundwasserleiter oberflächennah ist. Dies gilt vor allem in Quellzonen, aber auch in Bereichen, in welchen sich das Oberflächenwasser, insbesondere bei der Schneeschmelze, konzentriert.

Hydrogeologischer Kontext, für den sich die Technik eignet

Die geringe Durchlässigkeit des Erdreichs in Rutschungen erfordert eine hohe Dichte an Drainagegräben, um den beschränkten Wirkungsbereich auszugleichen. In der Praxis ist es deshalb üblich, die Gräben in einem Abstand von 10 m nebeneinander zu platzieren. Es ist möglich, diese Arbeiten in zwei Etappen auszuführen: zuerst mit einer geringen Leitungsdichte, dann in den Zonen, in denen die Drainage ungenügend ist, durch eine Verdichtung mit zusätzlichen Leitungen.

Wirksamkeit, Wirkungsbereich

Die Drainagetechnik ist relativ schnell anwendbar. Sie ist allerdings zeitintensiver als das Fassen von Wasser mittels offener Gräben.

Vorlaufzeit für die Umsetzung

Drainagegräben sind dauerhafter als offene Gräben; einerseits entstehen keine Böschungen, welche das Risiko kleiner Rutschungen bergen und die den Wasserfluss unterbrechen können; andererseits sind Drainagegräben nicht der Verstopfung ausgesetzt, welche oft die Wirkung der Gräben beeinträchtigt (Vegetation, Holzabfälle, Geschiebe usw.). Sie neigen allerdings dazu, durch eingeschwemmtes feines Material zu verstopfen, vor allem dann, wenn keine Geotextilien verwendet werden. Die Qualität der Filterschicht ist dabei entscheidend. Die Bewegungen der Rutschung können zu Zerdrücken, Abscheren oder Zerreissen der Drainageröhren führen. Da diese eingegraben sind, kann eine Kontrolle nur in den Sammelkammern oder durch eine Kamera erfolgen.

Dauerhaftigkeit

Drainagegräben sind teurer als die offenen Gräben, aber billiger als die Tiefendrainage. Es ist mit Kosten von rund 100 Franken pro Laufmeter Rohr in einer Tiefe von 1,5 m zu rechnen.

Baukosten

Drainagegräben erzeugen tiefe Unterhaltskosten (Reparaturen in den durch Bewegungen beschädigten Bereichen).

Betriebskosten

Fallbeispiele werden in den Anhängen A3 und A5 vorgestellt.

Fallbeispiele

5.4 Tiefendrainage

Das Fassen von Wasser an der Oberfläche oder durch Drainageröhren in geringer Tiefe vermag den hydraulischen Druck in Rutschungen nicht in bedeutender Weise zu senken. Will man stärker auf den Porendruck im sich in Bewegung befindenden Material oder sogar im stabilen Untergrund der Rutschung einwirken, drängt sich die Tiefendrainage auf. Mehrere Techniken kommen in Frage.

5.4.1 Subhorizontale Drainagebohrungen

Von ausgewählten Stellen, wenn möglich von den Rändern der Rutschung und sogar von unterhalb der Rutschung (um die Dauerhaftigkeit des Wassersammelsystems

Art und Wirkung der Massnahme

sicherzustellen), werden in und unter die Gleitmasse Drainagen gebohrt. Um von einem zentralen Punkt aus auf ein möglichst grosses Volumen einzuwirken, werden sie strahlenförmig und mit unterschiedlichem Gefälle angeordnet (Abb. 25B). Das Wasser fliesst in der Regel durch die Schwerkraft in die Bohrkammer, die wiederum durch ein Abflussrohr entwässert wird. Die Absenkung des Wassers in nach unten führenden Röhren kann durch Saugheber oder Pumpen verbessert werden.

Zu erstellende Bauten

Die Drainagen werden üblicherweise von einer untief liegenden Bohrkammer aus gebohrt. Diese wird in der Regel, je nach Länge und Durchmesser der Drainagebohrungen (Auswirkungen auf die Leistung der Bohrmaschine), als Eisenbetonschacht mit einem Durchmesser von 4 bis 7 m ausgeführt. Provisorische Kammern mit Abstützung durch Holz oder Stahl (Bogengerüst) können auch in Frage kommen. Bei wenig aktiven und mitteltiefen Bewegungen (< 10 m) kann die Kammer am Fuss der Rutschung gegraben werden, um ein Bohrniveau unter der Basisgleitfläche der Rutschung zu erreichen.

Die Bohrmaschine wird in die Kammer abgesenkt. Sie ermöglicht das Bohren von Drainagen in alle gewünschten Richtungen mit einem Gefälle von +10 bis –20°. Die Länge der Drainagebohrungen variiert zwischen einem Dutzend und rund 50 m. Manchmal können sie auch noch länger sein. Allerdings sind die Realisierbarkeit und die Orientierung solch langer Bohrungen schwieriger. Das in der Kammer gesammelte Wasser aus den Bohrlöchern wird, wenn möglich, unter Einwirkung der Schwerkraft durch eine in einen Graben verlegte Leitung oder durch eine talwärts geführte Bohrung abgeführt.

Bauweise

Kleine, wenig tiefe Bohrkammern werden ausgehoben und betoniert, allenfalls in mehreren Phasen. Sobald Fels erreicht wird, genügt eine summarische Abstützung. Für tiefere Schächte in Lockergestein kommt das Senkschachtverfahren zum Einsatz.

Die Bohrungen werden, wenn der Wassereintrag gering ist, als Schlagbohrungen ausgeführt. Dies meistens mit einem Imlochhammer mit einem Durchmesser von rund 100 mm. Die Bohrungen werden mit perforierten Rohren aus Kunststoff oder Stahl ausgelegt. Um übermässige Abweichungen der Bohrungen zu vermeiden, ist es empfehlenswert, mit nicht allzu kurzen Bohrstangen zu arbeiten; dies bedingt jedoch eine Bohrkammer mit grossem Durchmesser. Mit Hydraulikpressen eingebaute Drainagen sind in Rutschungen nicht zu empfehlen, weil in der Masse viele Felsblöcke enthalten sein können.

Betriebsweise

Das Abfliessen des Wassers ist in der Regel durch die Schwerkraft gewährleistet. Der Unterhalt ist also minimal. Bei Saughebern muss kontrolliert werden, dass sie gefüllt bleiben, oder es müssen, vor allem bei Saughebern mit kleinem Durchmesser, Systeme mit automatischer Nachfüllung vorgesehen werden (Clark et al. 2007). Wenn die Drainagen mit Pumpen ausgerüstet werden, ist der Unterhalt bedeutend aufwendiger. Zu beachten ist, dass sich Bohrpumpen in subhorizontaler Lage in der Regel schneller abnützen.

Hydrogeologischer Kontext, für den sich die Technik eignet

Die Drainage mittels subhorizontaler Drainagebohrungen eignet sich für relativ schmale Rutschungen, weil hier die Bohrkammern am Rand bleiben können (Abb. 25B). Mit einer am Fuss der Anrissnische platzierten Bohrkammer kann der Anrissbereich gut drainiert und eine entsprechend wirksame Druckabsenkung für diesen Bereich erreicht werden. Allerdings ist es heikler, die Stabilität zu garantieren. Für den Betrieb per

Schwerkraft eignen sich steile Rutschungen besonders. Die subhorizontalen Bohrungen entwässern die Gleitmasse; mit abwärts gerichteten Bohrungen kann, wenn die Rutschung nicht allzu mächtig ist, auch der Porendruck im Liegenden der Rutschmasse gesenkt werden.

Wirksamkeit, Wirkungsbereich

Wenn die Kammer einmal gebaut ist, kann mit diesem System die Zahl der entwässernden Bohrungen zu angemessenen Kosten vervielfacht werden. Diese Flexibilität garantiert eine ausgezeichnete Entwässerung der Masse. In mächtigen Rutschungen können jedoch die tieferen Bereiche nicht erreicht werden, da die Bohrungen sonst zu lang werden. Hier ist eine Technik mit vertikalen Schächten oder Stollen vorzuziehen.

Vorlaufzeit der Umsetzung

Wenn die Bohrkammer nicht allzu gross erstellt werden muss, können die Arbeiten in wenigen Wochen abgeschlossen werden.

Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit von Drainagebohrungen ist für diejenigen Bereiche einer Rutschung gut, welche wenig Bewegung erfahren, oder wenn unter der Rutschmasse gebohrt wird. In den Bereichen mit schnelleren Bewegungen muss die Wirksamkeit rasch eintreten, damit das System vor einer irreversiblen Abscherung der Drainagen seine Wirkung entfalten kann.

Baukosten

Bei subhorizontalen Drainagebohrungen ist mit mittelhohen Baukosten zu rechnen.

Betriebskosten

Im Betrieb entstehen nur geringe Kosten.

Fallbeispiel

Ein Fallbeispiel wird in Anhang A6 präsentiert.

5.4.2 Schirm aus vertikalen Filterbrunnen

Soll für die Entwässerung tiefgründiger auf die Gleitmasse eingewirkt werden, genügen subhorizontale Bohrungen nicht, und es müssen vertikale Filterbrunnen oder, wenn kleinere Durchmesser genügen, vertikale Bohrungen erstellt werden.

Art und Wirkung der Massnahme

Vertikale Filterbrunnen oder Bohrungen werden von der Oberfläche her in die instabile Masse abgeteuft (Abb. 25C). Sie können bis in den stabilen Untergrund reichen, um die Basis der Rutschung zu entwässern. Die Drainage erfolgt durch Pumpen des in den verschiedenen wasserführenden Schichten zirkulierenden Grundwassers. Dies ermöglicht eine bedeutende Senkung des Porenwasserdrucks im Umfeld der Drainage. Wenn es die lokale Hydrogeologie zulässt, das heisst, wenn der stabile Untergrund der Rutschung ungesättigt und durchlässig ist, können Sickerbrunnen gebaut werden, in welchen das Wasser aus der abgleitenden Masse am Grund des Schachts versickert. Für die Realisierung muss jedoch zuerst die Versickerungsfähigkeit des Untergrundes abgeklärt werden und ob dieser selbst bei extremen hydrogeologischen Verhältnissen ungesättigt bleibt.

Zu erstellende Bauten

Vertikale Drainagen sind Bohrungen (Durchmesser < 300 mm) oder Filterbrunnen (Durchmesser < 1500 mm). Sie werden mit perforierten Rohren aus Stahl versehen, um eine genügende Widerstandskraft des Lochs gegenüber den Bewegungen des Geländes sicherzustellen. Für Schächte mit grösserem Durchmesser können diese aus Eisenbeton erstellt werden. Dies ist vor allem nötig, wenn vertikale und horizontale Drainagen kombiniert werden sollen. Das gepumpte Wasser der Bohrlöcher wird in Vorfluter an der Oberfläche geleitet.

Der Abstand zwischen den Schächten richtet sich nach dem Wirkungsbereich jeder Baute sowie der Heterogenität und der Durchlässigkeit.

Bauweise

Die Bohrungen werden als Schlagbohrung mit einem relativ kleinen, auch bei schwierigen topografischen Verhältnissen leicht zu installierenden Bohrgerät ausgeführt. Ihre Tiefen können 100 m erreichen. Die Schächte werden verrohrt (Benoto-Methode oder grosser Pfahlbohrer) oder als grosskalibrige Rotationsspülbohrung erstellt. Die Grösse dieser Maschinen schränkt ihr Einsatzgebiet auf leicht zugängliches Gelände ein. Die Schächte aus Eisenbeton werden in der Regel mit dem Senkschachtverfahren oder in Deckelbauweise ausgehoben.

Wellpoint-Anlagen stellen einen Spezialfall für vertikale Bohrungen bis in geringe Tiefen (rund 10 m) dar. Ihre Platzierung mithilfe von Wasserspülung bedingt, dass das Erdreich locker sowie von feiner Körnigkeit und schwacher Kohäsion ist. Das gefasste Wasser wird in eine mit einer Vakuumpumpe (Abb. 28) verbundenen Sammelröhre abgeleitet. Die resultierende Absenkung ist wenig bedeutend (einige Meter). Man kann bedeutendere Absenkungen durch mehrere Installationen in unterschiedlichen Tiefen erreichen. Dieses System eignet sich gut für dringliche Massnahmen.

Abb. 28 > Beispiel einer Anwendung einer Wellpoint-Anlage

Die wasserführenden Sande der glazilimnischen Terrasse von Ecublens (VD), auf welcher sich die EPFL befindet, werden durch den Fluss im unteren Teil eines Mäanders erodiert. Dadurch wurden die Geleise der Metro M1 trotz einer Stützmauer verschoben. Für die Zeit, die es brauchte, um die Sorge zu verlegen, wurde die Bahnlinie mit einem Schirm von Wellpoints gesichert, welcher das Grundwasser am Rand des Flusses absenkte, was die Rutschung verlangsamte.

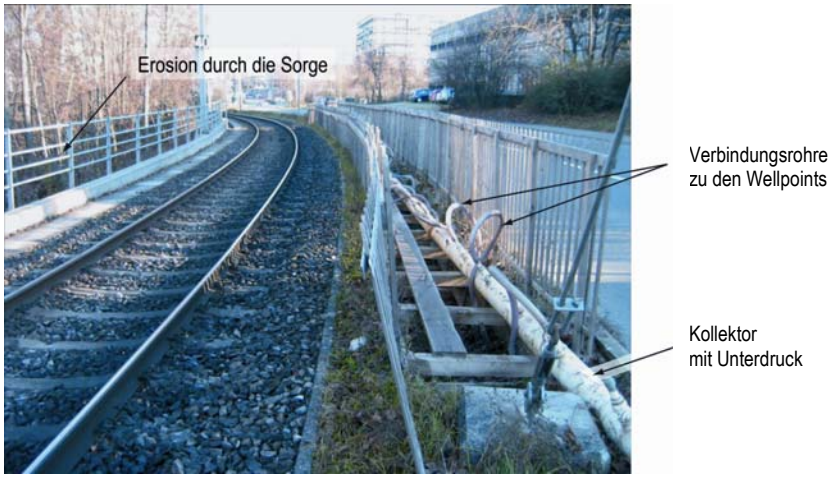


Foto A. Parriaux

Betriebsweise

Die Absenkung des Wassers in den Schächten erfolgt durch eine Unterwasserpumpe, die so tief wie möglich platziert wird. Der Mindestdurchmesser solcher Pumpen (95 mm) erfordert einen minimalen Rohrdurchmesser von 100 mm. Die abzuführenden Wassermengen sind gering. Daher wird, gesteuert durch einen Pegelschalter (max/min), intermittierend gepumpt. Die elektromechanischen Bestandteile erfordern aufgrund von Krustenbildungen oder Korrosionserscheinungen an den Pumpen einige Wartung.

Wenn kein Strom zur Verfügung steht, können selbstfüllende Saugheber verwendet werden, die eine Absenkung des Wasserspiegels in den Schächten von etwa 7 bis 8 m ermöglichen. Die langfristige Zuverlässigkeit dieser Systeme muss erst noch getestet werden.

Bei einem genügend steilen Hang kann auf das Pumpen verzichtet werden, wenn durch Leitungen verbundene Schächte erstellt werden. Damit eine Bohrmaschine am Schachtgrund die Verbindungen bohren kann, müssen die Schächte hierzu jedoch einige Meter Durchmesser aufweisen. Die Entwässerung des Systems erfolgt aus dem tiefstgelegenen Schacht durch eine leicht abwärtsführende Leitung an die Oberfläche. Diese Einrichtung ist sehr kostspielig im Bau, aber wirtschaftlich im Betrieb.

Hydrogeologischer Kontext, für den sich die Technik eignet

Die Tiefendrainage durch Bohrungen oder Filterbrunnen wird bei mächtigen Rutschungen angewandt. Sie ist eine Alternative zum Stollen, der im Bau teurer ist.

Wirksamkeit, Wirkungsbereich

Aufgrund der geringen Durchlässigkeit des in Rutschungen enthaltenen Erdreichs ist der Wirkungsbereich jedes Brunnens begrenzt. Deshalb müssen diese ziemlich eng gestaffelt errichtet werden, damit eine effiziente Absenkung des Grundwasserspiegels über einen grösseren Bereich und nicht nur in der unmittelbaren Umgebung des Brunnens garantiert werden kann. Der Wirkungsbereich in Rutschungen mit Material aus Flysch liegt zum Beispiel in der Grössenordnung von einem Dutzend Metern. Da es wirtschaftlich undenkbar ist, eine ganze Rutschung mit einer solchen Dichte von Bohrungen zu versehen, geht man dazu über, Bohrungen in Gruppen oder Brunnen in Reihe zu erstellen, welche die Rutschmasse entlang einer für die zu schützenden Objekte möglichst geeigneten Transversale stabilisieren. Mit dieser stabilisierten Linie neigt auch die ganze Rutschung dazu, sich zu stabilisieren.

Vorlaufzeit für die Umsetzung

Ein Schirm von Filterbrunnen oder Bohrungen ist sehr schnell eingerichtet, wenn der Zugang nicht allzu schwierig ist. Ein Brunnen oder eine Bohrung von einigen Dutzend Metern ist in wenigen Tagen abgeteuft und ausgerüstet. Diese Technik kann also als eine mögliche Notmassnahme in Betracht gezogen werden.

Dauerhaftigkeit

Da die Filterbrunnen die Rutschung durchqueren, übrigens oft die aktivsten Bereiche nahe der Oberfläche, laufen sie Gefahr, abgeschert zu werden, wenn die Stabilisierung nicht schnell genug einsetzt. Die Installation der Pumpen und ihre Inbetriebnahme muss demzufolge unmittelbar nach dem Bau des Brunnens erfolgen. Die Lebensdauer der vertikalen Drainagen hängt also in erster Linie von den Differenzialgeschwindigkeiten der durchquerten Schichten ab, aber auch vom Durchmesser und der Widerstandsfestigkeit der Brunneneinrichtung. Die Pumpen haben je nach der physikalisch-chemischen Zusammensetzung des Wassers und dessen Trübung sowie der Konzeption und Herstellungsweise der Pumpen eine begrenzte Lebensdauer.

Baukosten

Für einen Schirm aus vertikalen Filterbrunnen entstehen mittelhohe Baukosten. Eine ausgerüstete Bohrung von 300 mm Durchmesser und 50 m Tiefe kostet zum Beispiel rund 20 000 Franken (ohne elektromechanische Ausrüstung). Ein Filterbrunnen gleicher Tiefe mit 800 mm Durchmesser kommt auf rund 100 000 Franken zu stehen.

Betriebskosten

Die Überwachungs- und Unterhaltskosten der Pumpen, der Stromverbrauch und der Ersatz von zerstörten Bauten kann diese Technik ziemlich teuer machen. Ohne allfällige zusätzliche Brunnen einzuberechnen, bleiben die Kosten dennoch sehr angemessen. In Arveyes (Anhang A7) beliefen sich die durchschnittlichen Kosten für den Strom-

verbrauch und den Ersatz von einigen Pumpen über 10 Jahre gerechnet auf rund 10 000 Franken pro Jahr. Wenn man die Kosten für das Personal für den Unterhalt der Installationen mit einrechnet, sind die Kosten deutlich höher. In La Frasse zum Beispiel (Abb. 32) hat der Gesamtunterhalt des Schachtschirms (Filterbrunnen mit Pumpen) einschliesslich Abklärung 80 000 Franken jährlich gekostet.

Fallbeispiele

In den Anhängen A6 und A7 werden Fallbeispiele für Sanierungen mittels vertikaler Filterbrunnen vorgestellt.

5.4.3 Stollen mit strahlenförmig angelegten Drainagebohrungen

Soll das Wasser in der Tiefe drainiert werden und per Schwerkraft ohne Schadenrisiko für die Bauten abfliessen können, müssen in der Regel ein oder mehrere Stollen gebaut werden. Zusammen mit den tief gebohrten Drainagen ist diese Drainagetechnik praktisch die einzige, bei der man hoffen kann, angesichts der Tiefe der Bauten Synergien mit der Trinkwassergewinnung zu schaffen. Dennoch wird diese Gelegenheit selten ergriffen, weil die von einem Stollen aus errichteten Drainagebohrungen bis nahe an die Oberfläche gelangen und durch Risse in der sich bewegenden Rutschmasse Oberflächenwasser in diese einfliessen können. Konkretere Möglichkeiten ergeben sich bei direkten Stollenzuflüssen. Dann sind die Vorkehrungen für Trinkwasserfassungen zu treffen.

Art und Wirkung der Massnahme

Ein Stollen oder ein Netz von Stollen, die unter die Gleitmasse getrieben werden, macht es möglich, wirksam auf die Senkung des Wasserstands in dieser Masse und auch im stabilen Untergrund einzuwirken. Der Stollen selber übt zwar eine Drainagefunktion aus, diese ist aber limitiert. Da die Baute in anstehendem Gestein ausgeführt wird, damit der Bau einfacher und die Dauerhaftigkeit höher ist, kann es vorkommen, dass sie nur teilweise auf die überlagernden Schichten einwirkt. Die Gleitflächen sind häufig tonig und können die Hydrogeologie des Untergrundes komplett von derjenigen der Rutschung abkoppeln. Deshalb wird die Drainage hauptsächlich durch strahlenförmige Bohrungen vom Stollen aus vorgenommen. Dieser hat also zwei Hauptfunktionen: Er ermöglicht erstens den Zugang für eine Bohrmaschine und zweitens den Abfluss des Wassers durch die Schwerkraft. Der Eingang des Stollens muss ausserhalb der Rutschung liegen (Abb. 25D).

Stollen mit Drainagebohrungen sind eine derart effiziente Drainagemethode, dass sie irreversible Schäden an Quellen oder schutzwürdigen Feuchtgebieten, aber auch Senkungen an der Oberfläche verursachen können. Die Abklärung möglicher Auswirkungen ist daher unerlässlich. Wenn es die hydrogeologischen Verhältnisse zulassen, kann eine Trinkwassernutzung gewisser Drainagen in Betracht gezogen werden.

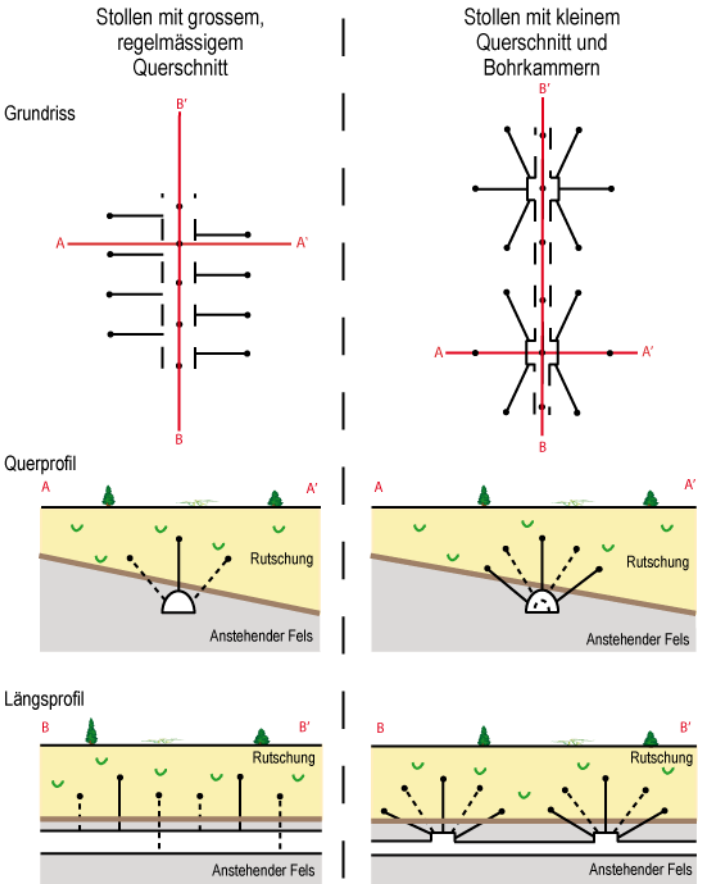
Zu erstellende Bauten

Stollen sind sehr teure Bauten. Um die Baukosten möglichst tief zu halten, muss ihr Durchmesser gerade gross genug sein, dass ein bequemer Aushub mit Maschinen möglich ist und eine Bohrmaschine für die Drainagebohrungen eingesetzt werden kann. Der optimale Durchmesser liegt zwischen 3 und 4 m. Allerdings können die Drainagebohrungen bei dieser geringen Grösse kaum auf schnelle und effiziente Weise gebohrt werden. Dafür bräuchte es rund 5 m Durchmesser. Ist eine hohe Dichte an Bohrungen vorgesehen, drängt sich dieser Durchmesser über die ganze Länge auf. Wenn hingegen die Bohrungen etwas weiter auseinanderliegen können, dürfte ein geringerer Durchmesser genügen, und es kann in Verbreiterungen gebohrt werden

(Bohrkammern, Abb. 29). Die Bohrungen erfolgen senkrecht oder rechtwinklig zur Gleitfläche und enden in der Gleitmasse, ohne die Oberfläche zu erreichen. Weitere Bohrungen können schräg ausgeführt werden, um die entwässerte Masse zu vergrössern. Die Bohrungen werden mit Plastik- oder Metallrohren ausgelegt. Sie leiten das Wasser in eine betonierte Rinne in der Sohle des Stollens.

Abb. 29 > Zwei Varianten von Entwässerungsstollen mit Drainagebohrungen: Stollen mit grossem Querschnitt sowie Stollen mit kleinem Querschnitt und Bohrkammern

Schematisches Beispiel eines Stollens, der horizontal unter einer Rutschung durchführt.



geändert nach Parriaux 2009

Das Gefälle der Stollen muss aus Gründen der praktischen Bauausführung unter 20 % liegen. Wenn nötig, kann am Ende des Tunnels ein Lüftungsschacht erstellt werden, um eine natürliche Luftzirkulation zu gewährleisten.

Bauweise

Stollen unter Rutschungen werden mit konventionellen Methoden gebohrt. Die Verwendung von Vollschnitt-Tunnelbohrmaschinen ist nicht empfehlenswert, weil der Kontakt Fels/Lockergestein nicht immer bekannt ist und eine Tunnelbohrmaschine leicht durch die Konvergenzen blockiert werden kann. Die Verwendung von Spritzbeton, Ankerausbau und weiteren Einbauten erlauben es, die heikelsten Zonen zu befestigen. Das Vorkommen von korrosivem Wasser muss erkannt werden. Die strahlenför-

migen Bohrungen werden als Schlagbohrung mit Durchmessern von rund 100 mm ausgeführt. Wie bei Bohrungen, welche von der Oberfläche aus erstellt werden, müssen die Drainagen schnell gebaut werden, um das Risiko einer Abscherung zu reduzieren, wenn einmal die Bohrphase begonnen hat.

Betriebsweise

Das gesammelte Wasser im Sohlengerinne wird in das Wassernetz an der Oberfläche ausserhalb der Rutschung geführt. Dass keine Pumpen zum Einsatz kommen, macht die Wartung der Einrichtung besonders einfach.

Hydrogeologischer Kontext, für den die Technik geeignet ist

Diese Sanierungstechnik eignet sich für mächtige und grosse Rutschungen, bei denen der stabile Untergrund felsig ist. Wenn dieser aus Lockergestein besteht (Moräne, alte stabilisierte Rutschung usw.), kann sich der Stollen aufgrund der Länge der Bohrstrecken durch die geringdurchlässigen Lockergesteinspartien bis zur Gleitmasse als wenig wirksam erweisen.

Wirksamkeit, Wirkungsbereich

Die Wirksamkeit einer Stollendrainage im felsigen Untergrund ist bei genügender Klüftigkeit des Gesteins gut. Entsprechend gross ist der Wirkungsbereich unterhalb der abgleitenden Masse. In der Rutschung selber ist der Wirkungsbereich hingegen sehr beschränkt, was eine Verdichtung der Zahl der Bohrungen nötig macht. Jedoch kann die Senkung des hydraulischen Druckes unter der Gleitfläche genügen, um die instabile Masse wirksam zu stabilisieren, selbst wenn diese selber nur wenig drainiert wird. Wie bei den vertikalen Filterbrunnen kann versucht werden, einen Streifen quer durch die Rutschung zu stabilisieren, um die Bewegungen durch eine gleichzeitig hydraulisch und mechanisch wirkende «Barriere» zu stoppen; deren Wirkung kann sich weit über dieses Profil hinaus erstrecken.

Vorlaufzeit der Umsetzung

Einer der grossen Nachteile von Entwässerungsstollen ist die lange Zeitspanne bis zur Fertigstellung, bedingt durch technische, umweltbedingte und finanzielle Hürden sowie die relativ lange Bauzeit. Dies sind auch die Gründe, weshalb der Entscheid für eine Stollen-Lösung nur in Situationen mit dauerhaft hohem Risiko gerechtfertigt ist.

Dauerhaftigkeit

Wenn keine Quell- oder Kriechphänomene auftreten, widersteht ein in den standfesten Fels getriebener Stollen dem Lauf der Zeit gut. Zwar können die Bohrungen durch Bewegungen abgeschert oder durch Ausfällungen gefüllt werden. Der Stollen bietet jedoch den Vorteil, dass in Bereichen, in welchen die Drainagebohrungen ihre Wirkung verloren haben, diese mit vergleichsweise geringem Aufwand mit neuen Bohrungen vom Stollen aus ersetzt werden können.

Baukosten

Der Stollen ist sicherlich beim Bau die kostspieligste Drainagemethode. Der Laufmeter eines Stollens mit Minimaldurchmesser in felsigem, mittelschwierigem Gebirge beläuft sich zum Beispiel auf 6000 bis 10 000 Franken, ohne die Bohrungen mit einzubeziehen. Für letztere müssen zusätzlich rund 150 Franken pro Laufmeter Bohrung berechnet werden. Ein solches System kommt also nur für diejenigen Fälle in Frage, bei denen ein bedeutendes Schadenpotenzial die beträchtliche Investition rechtfertigt.

Betriebskosten

Im Gegensatz zu den Baukosten sind die Betriebskosten, solange es keine Probleme mit der Standfestigkeit des Stollens gibt, gering.

Fallbeispiel

Ein Fallbeispiel wird in Anhang A8 vorgestellt.

5.5 Wirkung des Waldes auf Rutschungen

Drainagetechniken können nicht allein auf künstliche Eingriffe beschränkt dargestellt werden. Denn Wald hat eine natürliche Drainagefähigkeit und wirkt zudem stabilisierend. Deshalb lohnt es sich, den Wald in die Betrachtung einzubeziehen.

Welche Wirkung hat die Bewaldung auf Hanginstabilitäten und insbesondere auf Rutschungen? Es gibt zahlreiche Beispiele aus den vergangenen Jahrhunderten, die eindrücklich zeigen, wie das Zurückdrängen und das Abholzen von Waldflächen nach Unwettern zu grossen Schäden durch Erosion, Rutschungen und Wildbachereignisse geführt haben. Nach der umfangreichen Wiederaufforstung ganzer Bergflanken und Stabilisierungsmassnahmen im Anriss- und Gerinnebereich konnten solche Schadenereignisse vielerorts weitgehend vermieden werden.

Der wissenschaftliche Nachweis zwischen Waldwirkung und Hanginstabilitäten wird einerseits in kleinsträumigen Versuchen einzelner Teilaspekte der Waldwirkung, wie zum Beispiel der Zugfestigkeit von Pflanzenwurzeln im Boden, untersucht. Andererseits werden nach Unwettern auch grossräumig Rutschereignisse dokumentiert und analysiert. Die Schwierigkeit bei der Beurteilung der Waldwirkung liegt darin, dass einzelne Teilaspekte erwiesen oder nahe liegend sind, es aber durch die Unkenntnis der genauen natürlichen Rahmenbedingungen (geologische und hydrogeologische Parameter) und die Wechselwirkungen der Hang- und Wasserprozesse untereinander sehr schwierig ist, gesicherte Aussagen und genaue Zahlen zur Waldwirkung zu erhalten.

Nach den Unwettern von 1997 in Sachseln (Kanton Obwalden; Rickli 2001), von 2002 im Napfgebiet (Kanton Luzern und Kanton Bern) und Appenzell (Rickli et al. 2004) sowie von 2007 in der Zentralschweiz (Raetzo & Rickli 2007) wurden umfangreiche Geländeaufnahmen realisiert und ausgewertet. Im Falle der dort aufgetretenen oberflächennahen, untiefen Rutschungen konnte unter anderem festgestellt werden, dass es im Wald stellenweise sogar zu einer höheren Anzahl von Rutschungen gekommen ist. Weil die Hangneigung im Wald – verglichen mit den angrenzenden nicht bewaldeten Gebieten – in der Regel aber deutlich steiler ist, kann für Waldgebiete eine um ca. 3 bis 5° steilere Grenzstabilität abgeleitet werden.

Im Unterschied zu oberflächennahen, untiefen Rutschungen zeigen mittel- bis tiefgründige Rutschungen in der Regel eine ganz andere Dynamik, und auch die Beeinflussung durch den Wald ist verschieden. Dies hängt damit zusammen, dass den hydrogeologischen Rahmenbedingungen eine grössere Bedeutung zukommt. Gleichzeitig sind diese «unterirdischen» Eigenschaften in einem Rutschgebiet zumeist nur wenig genau bekannt. Auch ist die genaue Bestimmung entscheidender Faktoren, wie beispielsweise der Wasserzirkulation im Untergrund, nur mit grossem Aufwand möglich und kann in vielen Fällen aus Kosten-Nutzen-Überlegungen nicht oder nur annähernd beantwortet werden.

5.5.1 Wirkungsprozesse

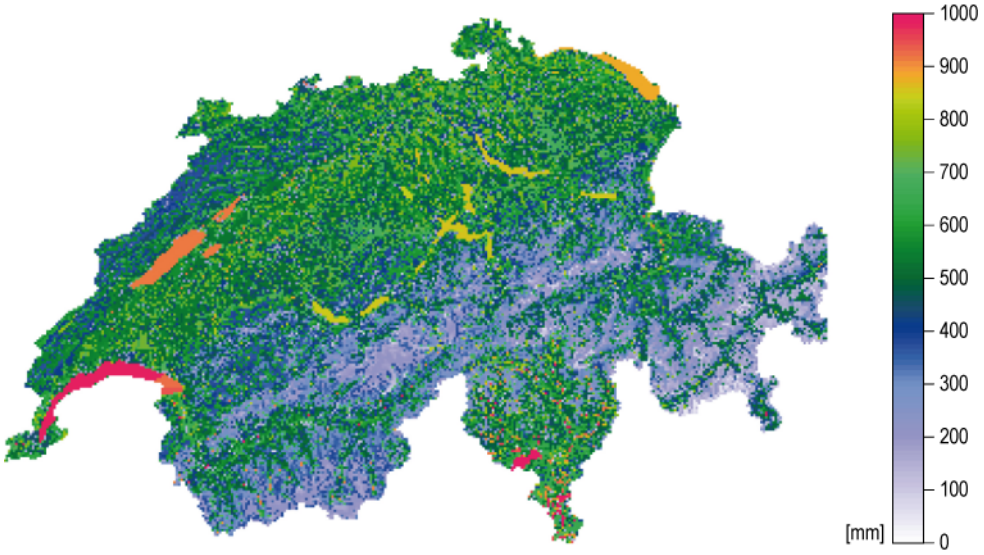
Die Wirkung des Waldes bezüglich Rutschungen ist in erster Linie in der Erhöhung der Saugspannung im Boden durch den Wasserentzug und in der armierenden Wirkung der Wurzeln begründet. Daneben sind noch die Interzeption, die bessere Infiltration, das grössere Speichervolumen im Waldboden und der Erosionsschutz von Bedeutung.

Transpiration

Durch die Transpiration bzw. Verdunstungsleistung der Bäume kommt es vor allem in den Vegetationsmonaten zu einer Erhöhung der Saugspannung im Boden. Der Wasserentzug wirkt der Wassersättigung des Untergrundes entgegen und erhöht somit seine Scherfestigkeit. Die durchschnittliche jährliche Verdunstungsleistung des Waldes in der Schweiz beträgt rund 600 mm/Jahr und variiert je nach Baumart, Bestandesdichte sowie Höhenlage (Menzel 1999; Abb. 30 und Abb. 31). Vor allem in den Wintermonaten und insbesondere im Falle der Laubbäume ist die Transpiration stark reduziert oder eingestellt.

Abb. 30 > Mittlere Jahresverdunstung des Zeitraumes 1973–1992 in der Schweiz

Pixeldarstellung der Modellierung. Die räumliche Auflösung beträgt 1 km².



geändert nach Menzel 1999

Armierung

Die armierende Wirkung des Waldes reicht in der Regel bis in eine Tiefe von 3 m und ist bei Rutschungen speziell dann relevant, wenn die Wurzeln bis unter die Gleitschicht reichen. Sie ist einerseits von den im Wald vorhandenen Baumarten und andererseits vom Substrat bzw. dem Boden und Wassergehalt abhängig. In gut durchlässigen Böden ist die Durchwurzelung generell intensiver und tiefgründiger als in dichten, nassen Böden. Dies bedeutet, dass vor allem in Rutschgebieten mit flachgründiger Gleitfläche und schlecht durchlässigem Untergrund mittels geeigneter Baumartenwahl eine stabilisierende Waldwirkung erreicht werden kann. Bei mittel- bis tiefgründiger Hauptgleitfläche ist die armierende Wirkung nur dann möglich, wenn eingelagerte, flachgründige

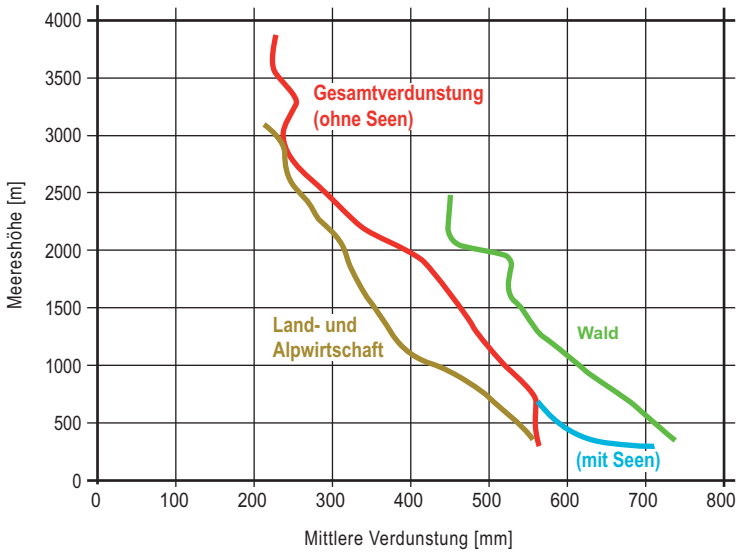
Gleitflächen stabilisiert werden und somit Rutschbewegungen im oberflächennahen Teil der Rutschung (0 bis 2 m) vermieden werden.

Interzeption

Die Wirkung der Interzeption hängt stark von der Regenmenge und der zeitlichen Verteilung ab. Das Blätterdach vermag bei einem Regenereignis je nach Bestandesdichte und Baumarten 4 bis 6 mm Regen zu binden bzw. zu verdunsten. Bei anhaltenden Regenfällen oder im Falle von Laubbäumen im Winter ist die Wirkung der Interzeption deutlich geringer. Ein Wald mit geschlossenem Kronendach vermag bis zu 25 % des Jahresniederschlages zurückzuhalten (Markart et al. 2006).

Abb. 31 > Höhenprofile der mittleren Verdunstung in der Schweiz

Die rote bzw. blaue Linie repräsentiert die Höhenabhängigkeit der Verdunstung für alle Landbedeckungsklassen (ohne bzw. mit Seen).



geändert nach Menzel 1999

Infiltration

Die Durchwurzelung und die damit verbundene lockere Struktur bzw. das grössere Porenvolumen vieler Waldböden führen dazu, dass der Untergrund durchlässiger ist und Regenwasser schneller und leichter aufnimmt. Es kann deshalb auch mehr infiltriertes Regenwasser im Boden gespeichert werden als im Vergleich zu Freilandböden. Das trägt dazu bei, dass das Wasser im Boden «gebunden» ist und nach und nach durch die Transpiration der Bäume wieder verdunstet. Ausserdem gelangt das Wasser nicht sofort in tiefere Bodenhorizonte bzw. in die Gleitschicht, sondern wird «weiter oben» im Wurzelraum gespeichert. Als negativer Aspekt des Speichervermögens in Waldböden ist die kurzfristige, durch das gespeicherte Wasser erreichte Gewichtszunahme der Rutschmasse zu nennen, welche in der Vegetationszeit durch die Transpiration wieder mehr als ausgeglichen wird.

Erosion

Das Blätterdach, die organische Bodenbedeckung und die Wurzeln bilden bei Regenfällen einen wirksamen Erosionsschutz. Im Wald kommt es deshalb weniger schnell und weniger häufig zu Erosionserscheinungen als in unbewaldeten Gebieten.

Oberflächenabfluss

Dass sich der Oberflächenabfluss im Wald nur wenig von dem im Freiland unterscheidet, ist in Fachkreisen sehr umstritten. Besonders im Winterhalbjahr, wenn die Transpiration sehr reduziert ist und auch seitens der Interzeption, vorwiegend im Laubwald, nur noch geringe Wirkung erreicht wird, fliesst das Regenwasser im Laufe lang anhaltender Regenfälle wie im Freiland auch über dem Waldboden ab. Der Oberflächenabfluss im Wald unterscheidet sich gegenüber dem Abflussverhalten in unbewaldeten Gebieten dadurch, dass das Regenwasser in den durchwurzelten, humosen obersten Waldbodenschichten vermehrt infiltrieren und im vergleichsweise grösseren Porenraum des Waldbodens gespeichert werden kann. Weil das verfügbare Porenvolumen in Waldböden wesentlich von den geologisch-hydrogeologischen Faktoren abhängt, sind der Durchwurzelung bzw. dem Porenraum diesbezüglich natürliche Grenzen gesetzt. Hingegen kann davon ausgegangen werden, dass die erosive Wirkung des abfliessenden Wassers wegen der Wurzelarmierung deutlich reduziert ist (Markart et al. 2006).

Nach dem Sturmereignis Lothar vom Dezember 1999 konnte in den folgenden Jahren in einigen bekannten, permanenten Rutschhängen eine deutliche Beschleunigung festgestellt werden. In gewissen Fällen beschleunigten sich die Rutschungen derart, dass es zum lokalen Abgleiten von Hangpartien kam. Es ist nahe liegend, dass die fehlende Interzeption und Transpiration des Waldes sowie die samt Wurzelteller umgeworfenen Bäume zu einem erhöhten und vermutlich auch beschleunigten Wassereintrag in den Untergrund beigesteuert haben.

5.5.2 Stellenwert der Waldwirkung und Synthese

Es stellt sich die Frage, welcher Stellenwert und Einfluss der Waldwirkung im Rahmen einer Rutschsanierung zugewiesen werden kann. Der Schlüssel zu einer erfolgreichen Rutschsanierung liegt in der ausreichenden Kenntnis der hydrogeologischen Rahmenbedingungen eines Rutschgebietes. Sind die wesentlichen Parameter bekannt, kann auch der potenzielle Einfluss der Waldwirkung bewertet bzw. abgeschätzt werden. Wichtige Parameter sind die Lage der Gleitfläche, der lithologische Aufbau des Untergrundes einschliesslich der Bodenschichten und die Wasserwegsamkeiten (Grundwasserleiter und -stauer, Infiltrations- und Exfiltrationszonen) sowie das Rutschverhalten (Rutschaktivität, Korrelation Niederschlag – Bewegungsrate). Die Waldwirkung ist bei gering- bis mittelgründigen Rutschungen mit relativ durchlässigem Untergrund am grössten. Sobald die Gleitfläche tiefer liegt und unterirdische Wasserzutritte dominieren, beeinflusst der Wald das Rutschverhalten meistens nur noch gering. Die positiven Effekte haben dann noch einen Einfluss auf das Vermeiden von Erosion und oberflächlichen Sekundärrutschungen. Wenn der Porenwasserdruck im Rutschgebiet gerade noch zu gering ist, um die Rutschaktivität entscheidend zu beeinflussen, können Interzeption, Evapotranspiration und Speichervermögen die Tiefeninfiltration des Niederschlagswassers ausgleichen und so eine Rutschbeschleunigung vermeiden helfen.

Im BUWAL-Bericht *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald – NaiS* (Frehner et al. 2005) sind Hinweise zur Waldwirkung bezüglich aller Naturgefahren und insbesondere auch Anforderungsprofile des Waldes im Zusammenhang mit Rutschungen aufgeführt (Tab. 1).

Tab. 1 > Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Rutschungen, Erosion und Murgängen, nach *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald – NaiS*

Potenzieller Beitrag des Waldes	Anforderungen aufgrund der Naturgefahr / minimal	Anforderungen aufgrund der Naturgefahr / ideal
im Entstehungsgebiet:		
Gross Bei flachgründigen Rutschungen (Rutschhorizont bis 2 m tief) und bei Oberflächenerosion	Gefüge horizontal • Lückengrösse max. 6 Are, bei gesicherter Verjüngung max. 12 Are Gefüge horizontal • Deckungsgrad dauernd ≥ 40 % • Minimale Anforderungen aufgrund des Standortstyps erfüllt Mischung • Bei Übergängen im Standortstyp ist die Baumarten-Zusammensetzung des feuchteren / stärker vernässten Typs anzustreben.	Gefüge horizontal • Lückengrösse max. 4 Are, bei gesicherter Verjüngung max. 8 Are Gefüge horizontal • Deckungsgrad dauernd und kleinflächig ≥ 60 % • Ideale Anforderungen aufgrund des Standortstyps erfüllt Mischung • Bei Übergängen im Standortstyp ist die Baumarten-Zusammensetzung des feuchteren / stärker vernässten Typs anzustreben. Stabilitätsträger • Keine schweren und wurfgefährdeten Bäume
im Infiltrationsgebiet:		
Mittel Bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen (Rutschhorizont tiefer als 2 m), wenn der Wasserhaushalt im Bereich des Rutschhorizonts beeinflusst werden kann	Gefüge horizontal • Deckungsgrad dauernd ≥ 30 % • Minimale Anforderungen aufgrund des Standortstyps erfüllt	Gefüge horizontal • Deckungsgrad dauernd ≥ 50 % • Ideale Anforderungen aufgrund des Standortstyps erfüllt
Gering Bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen (Rutschhorizont tiefer als 2 m), wenn der Wasserhaushalt im Bereich des Rutschhorizonts nur wenig beeinflusst werden kann	Verjüngung • Nachhaltige Verjüngung gesichert	Verjüngung • Nachhaltige Verjüngung gesichert • Anforderungen aufgrund des Standortstyps ideal erfüllt

Ergänzungen und Erläuterungen: siehe Frehner et al. 2005.

5.6 Zusammenfassung der Sanierungstechniken

Die Beschreibung der verschiedenen technischen Möglichkeiten hat es aufgezeigt: Die Palette an Möglichkeiten, in das hydrogeologische System von Rutschungen einzugreifen, ist breit und variantenreich. Dies betrifft sowohl den Umfang der Bauarbeiten, die Wirksamkeit, die Einfachheit einer Umsetzung, die Wirkung auf die Umwelt und schliesslich die Bau- und Betriebskosten der Massnahmen. Der Planer der Sanierungsmassnahme muss in Zusammenarbeit mit dem Bauherren und den zuständigen Behörden feststellen, welche – gemessen am Risiko – die am besten geeignete Massnahme darstellt. Um diese Wahl zu erleichtern, listet die Tab. 2 die wichtigsten Techniken zusammenfassend mit den Vorteilen, den Nachteilen und der Anwendbarkeit auf.

Tab. 2 > Vor- und Nachteile der wichtigsten Drainagemassnahmen oder -techniken (gemäss Abb. 25 A bis D) mit Angabe des günstigsten Kontexts, in dem sie eingesetzt werden können

Methoden	Vorteile	Nachteile	Fälle, für welche die Methode anwendbar ist
Offene Sammelgräben für das Oberflächenwasser	• Erlaubt auf einfache Weise die Verhinderung von starkem Wassereintrag in die Rutschungen. • Kostengünstig. • Einfach im Unterhalt. • Geeignet für nicht spezialisiertes Unternehmen.	• Unverzichtbar, aber allein ungenügend. • Keine oder wenig Auswirkungen auf die hydraulischen Drücke unter der sich bewegenden Masse.	Alle Arten von Hangbewegungen; am wirksamsten in oberflächennahen Bewegungen.
Subhorizontale Drainagebohrungen	• Mittelhohe Baukosten, tiefe Unterhaltskosten. • Sehr wirksam in der angebohrten Masse. • Schnelle Ausführung. • Grosse Flexibilität in der Wahl der Geometrie. • Erlaubt die lokale Behandlung der Wasserdrücke unter der Rutschung sowie derjenigen der Gleitmasse selbst.	• Wirkungsbereich in grossen Rutschungen schwach (Zugang hauptsächlich von den Rändern her). • Drainagerohre können kurzlebig sein durch Abscherung und Tuffablagerung. • Gefahr von Setzungen an der Oberfläche.	Rutschungen mit grossen Höhenunterschieden (Entleerung durch Schwerkraft), schmal und wenig tief.
Schirm aus vertikalen Filterbrunnen	• Relativ kostengünstig. • Sehr wirksam bei starken Unterdrücken unter der Rutschung. • Schnell umgesetzt. • Geeignet für mächtige Rutschungen. • Erlaubt auch die Drainage der Gleitmasse. • Installation von Saughebern bei wenig tiefen Rutschungen.	• Kann kostspielig werden beim Betrieb (Pumpenergie, Unterhalt und Kontrolle der Pumpen). • Wenig langlebige Bauwerke, wenn die Bewegung nicht genügend gebremst wird. • Begrenzter Wirkungsbereich, wenn die Durchlässigkeit schwach ist. • Gefahr von Setzungen an der Oberfläche.	Wenig aktive, mächtige Rutschungen.
Stollen mit strahlenförmig angelegten Drainagebohrungen	• Wirksamstes Mittel wegen der Zugangsflexibilität in und unter der abgleitenden Masse. • Allgemeine Senkung der hydraulischen Drücke. • Gute geologische Beobachtung. • Kostengünstiger Unterhalt. • Einzige Lösung für grosse Rutschungen.	• Sehr hohe Baukosten. • Lange Vorlaufzeit. • Kann das Versiegen von Trinkwasserquellen verursachen. • Kann allgemeine Geländesetzungen an der Oberfläche und bedeutende differenzielle Setzungen zur Folge haben.	Grosse, tiefe Rutschungen.

6 > Planung von Sanierungsprojekten

Ein Sanierungsprojekt wird – wie jedes Vorhaben einer gewissen Grösse – im Rahmen eines Prozesses durchgeführt, der die optimale Lösung zum Ziel hat. In den dafür nötigen Schritten muss einerseits das angestrebte Ziel definiert und andererseits aufgezeigt werden, mit welcher Methode dieses Ziel mit möglichst geringen Kosten erreicht werden kann. Gleichzeitig muss auf eine maximale Wirksamkeit und auf minimale Auswirkungen auf die Umwelt geachtet werden. Bei den einzelnen Etappen ist zugleich die Finanzierung der Arbeiten unter Einhaltung der geltenden Vorschriften im Auge zu behalten.

Die Durchführung einer Rutschungssanierung verlangt einige organisatorische und administrative Grundlagen. Das vorliegende Kapitel ist eine Ergänzung zu den vorhergehenden, eher wissenschaftlicheren und technischeren Kapiteln, und zeigt in groben Zügen das planerische Vorgehen auf.

6.1 Ablauf eines Sanierungsprojekts

Die wichtigsten Schritte, die zu einem Sanierungsprojekt führen, sind, in chronologischer Reihenfolge (siehe auch BAFU 2010):

- Identifizierung und Verstehen der Prozesse (Analyse der Instabilitäten, Zustandsbeurteilung, Monitoring, Gefahrenbeurteilung);
- Erhebung des Schadenpotenzials; Risikoanalyse; Festlegen der Schutzziele und des akzeptablen Restrisikos;
- Studium der möglichen Varianten, welche zum Ziel führen; vergleichende Abwägung von Varianten (Reduktion des Risikos, Kosten-Nutzen-Verhältnis);
- Ausarbeitung eines Ausführungsprojekts; Finanzierung; Ausschreiben der Arbeiten; Einholen von Offerten;
- Ausführung;
- Monitoring mit Kontrolle der prognostizierten Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit; Wartung.

Die in erster Linie von der Ausarbeitung und Realisierung eines Sanierungsprojekts betroffenen Partner sind in der Regel der Bauherr (Kanton, Gemeinden, Mehrzweckgenossenschaften/Körperschaften, Private), die beauftragten Spezialisten (Ingenieurbüro in Zusammenarbeit mit dem Geologen/Hydrogeologen), Finanzierungsorgane (Bund, Kanton, Gemeinden, Privatpersonen), das beauftragte Unternehmen, die Grundeigentümer und die Nutzniesser der Massnahmen.

Die folgenden gesetzlichen Grundlagen und Referenzwerke regeln das Vorgehen sowie die Verantwortlichkeiten und die Übernahme der Kosten:

- SIA-Norm 103: Ordnung für Leistungen und Honorare der Bauingenieure und Bauingenieurinnen;
- SIA-Norm 118: Allgemeine Bedingungen für Bauarbeiten;
- Bundesgesetz vom 5. Oktober 1990 über Finanzhilfen und Abgeltungen (Subventionsgesetz, SuG; SR 616.1, Art. 11 bis 22);
- Bundesgesetz vom 4. Oktober 1991 über den Wald (Waldgesetz, WaG; RS 921.0, Art. 35 und 36);
- Verordnung vom 30. November 1992 über den Wald (Waldverordnung, WAV; SR 921.01, Art. 38 bis 39 und 46 bis 50);
- Handbuch NFA[1] im Umweltbereich (BAFU 2008, insbesondere Kapitel 5, mit Anhängen).

Die Projekte, für die um Subvention durch den Bund nachgesucht wird, müssen gewisse Minimalanforderungen erfüllen, sowohl in der Phase der Vorstudie wie des Vorprojekts (siehe Handbuch NFA [BAFU 2008] und die spezielle Dokumentation[2]).

6.2 Beurteilung der Prozesse

Jedes Sanierungsprojekt muss auf einer vorgängigen gründlichen Analyse der Situation beruhen (Zustandsbeurteilung). Die Methode in Bezug auf die Beurteilung von Massenbewegungen ist in der Vollzugshilfe des Bundes (BAFU 2010) detailliert festgehalten. Im Rahmen der Vorstudie geht es vor allem darum, folgende Schritte vorzunehmen:

- Identifikation der massgebenden Prozesse (einschliesslich Instabilitätskarte);
- Verstehen der Bruchmechanismen und der Ursachen für die Bewegung;
- Abschätzen der betroffenen Fläche bzw. des Volumens;
- Beurteilen der Gefahren (Festlegen von Szenarien, allenfalls Modellierung, Intensitätskarten, Gefahrenkarte).

6.3 Risikoanalyse und Schutzziele

Bei allen Objekten, die von der Rutschung betroffen sind, wird vor der Durchführung der Massnahmen eine Risikoanalyse aufgrund der in der vorherigen Etappe erstellten Gefahrenbeurteilung vorgenommen (z. B. BUWAL 1999). Parallel zu dieser Analyse werden auf der Basis eines Dialogs zwischen allen beteiligten Akteuren die Schutzziele für den ausgesuchten Sektor festgelegt (BUWAL 1999, ARE et al. 2005, PLANAT 2009). Diese im Rahmen der Vorstudie realisierte Etappe ist für die Verfolgung des Planungsverfahrens massgebend.

Wenn die Analyse ein Schutzdefizit aufzeigt und die Risiken als inakzeptabel eingestuft werden, müssen Massnahmen ergriffen werden. Dabei kann es sich um raumpla-

[1] NFA: Neugestaltung des Finanzausgleichs und der Aufgabenteilung zwischen Bund und Kantonen.
[2] www.bafu.admin.ch/naturgefahren/03782/index.html?lang=de.

nerische Massnahmen (ARE et al. 2005), Schutzmassnahmen oder organisatorische Massnahmen handeln. Der vorliegende Leitfaden befasst sich nur mit den Sanierungsmassnahmen. Um das Schutzziel zu erreichen, muss für ein Objekt einer bestimmten Kategorie das bestehende Risiko mit der Ausführung der Massnahme auf ein akzeptables Restrisiko reduziert werden (BUWAL 1999, Bonnard und Vulliet 2006, PLANAT 2009).

6.4 Untersuchung und vergleichende Prüfung der Varianten

Der Eingriff in die hydrogeologischen Verhältnisse gehört zu den möglichen Massnahmen zur Stabilisierung einer Rutschung. In einigen Fällen können sich jedoch technische Massnahmen im Verhältnis zum Wert des Objekts als unverhältnismässig erweisen. Dann wäre es sinnvoller, dieses zu entfernen oder zu verschieben, statt es um jeden Preis schützen zu wollen. Das Variantenstudium ist ein wesentlicher Teil der Vorstudie; die gewählte Variante wird danach im Rahmen des Vorprojekts entwickelt.

Das beauftragte Büro hat die Instabilität nach den in diesem Leitfaden beschriebenen Empfehlungen entsprechend der Tab. 2 zu untersuchen und verschiedene Lösungen vorzuschlagen, welche die Erreichung des festgelegten Ziels ermöglichen. Jede Variante ist einer Prüfung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses zu unterziehen. Der Bauherr nimmt eine vergleichende Prüfung der Varianten (Abb. 32) auf der Basis von Empfehlungen des Auftragnehmers vor, indem er eine Abwägung der technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekte tätigt. Bei der wirtschaftlichen Analyse geht es darum, die Massnahmen in Bezug auf den Bau und den Unterhalt auf kurze, mittlere und lange Frist hin zu prüfen. Zum Beispiel liess der Bau eines Entwässerungsstollens in La Frasse (Abb. 32; Investition von 12 Mio. Franken) die Unterhaltskosten der Strasse sinken, welche sich vor der Sanierung im Durchschnitt auf über 500 000 Franken pro Jahr beliefen. Diese unterschiedlichen Aspekte können mit den durch das BAFU zur Verfügung gestellten Tools evaluiert werden (BUWAL 1999; Programm EconoMe[3]).

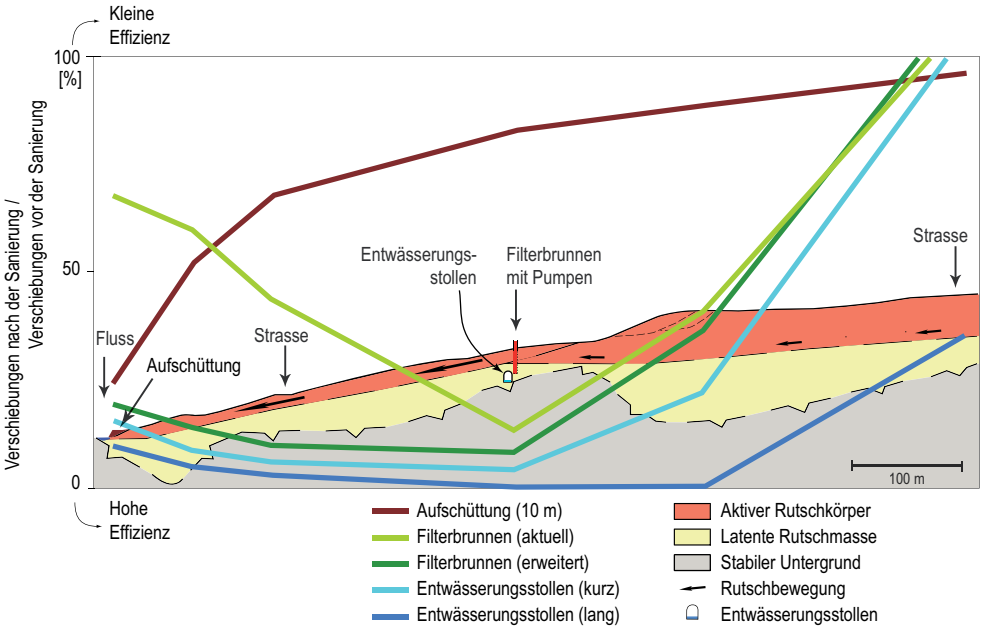
Die Kapazitäten des Bauherrn in Bezug auf die Bewältigung des Unterhalts und der Untersuchung sind ebenfalls zu berücksichtigen. Der Bauherr achte auch darauf, die verschiedenen betroffenen Dienste auf Ebene Bund, Kanton und Gemeinde in breiter Vernehmlassung mit einzubeziehen. Die Umwelt- und Naturschutzvereinigungen sind ebenfalls zu informieren.

Gewisse Varianten können in Untervarianten aufgeteilt werden, was einer Etappierung beim Bau entspricht. Man kann nämlich einen ersten Teil der Sanierung (z. B. einen kurzen Stollen) planen, die Wirksamkeit prüfen und nur wenn nötig eine zweite Bauetappe angehen (z. B. Verlängerung des Stollens; siehe Abb. 32). Diese Strategie ist in einigen Fällen allerdings riskant, vor allem, wenn die bei der ersten Etappe ausgeführten Drainagebauten (subhorizontale Drainagebohrungen, Filterbrunnen usw.) durch nicht ausreichend gebremste Bewegungen beschädigt werden können.

[3] www.econome.admin.ch

Abb. 32 > Rutschung La Frasse (Kanton Waadt): geologisches Profil im unteren Teil der Rutschung und Vergleich der Wirksamkeit von mehreren Massnahmenvarianten

Die Wirksamkeit wird ausgedrückt als Funktion der Beziehung zwischen den erwarteten Verschiebungen nach der Sanierung und den gemessenen Verschiebungen vor der Sanierung. Die modellierte Aufschüttung liegt auf der Ebene der Grande Eau am Fuss der Rutschung. Es wurde entschieden, einen Stollen mit strahlenförmig angelegten Drainagebohrungen (kurze Variante) zu bauen. Der Stollen ist seit 2009 in Betrieb und ergänzt den Schirm bestehend aus 22 vertikalen Filterbrunnen mit Pumpen; dieser wurde 1994 gebaut und hatte zu einer Verlangsamung in der aktivsten Zone geführt.



geändert nach Commend et al. 2006

6.5 Bereinigung des Bauprojekts, öffentliche Auflage

Im Bauprojekt gemäss SIA-Norm 112 werden die Arbeiten im Detail beschrieben und die Bauten dimensioniert. Das Projekt dient als Basis für das Einholen von Offerten und die öffentliche Auflage. In dieser Phase müssen die Baukosten und ihre Aufteilung zwischen den verschiedenen betroffenen Akteuren endgültig festgelegt werden. Die Modalitäten für die Übernahme der Verantwortung von allfälligen Kostenüberschreitungen müssen festgehalten werden. Schliesslich wird ein Unterhaltsprogramm verbindlich festgelegt, welches die Verantwortlichkeiten und die Übernahme der Kosten präzisiert (Vereinbarung, Dienstbarkeit usw.).

6.6 Bauarbeiten

Es muss eine Bestandesaufnahme der bestehenden Situation vor den Arbeiten gemacht werden; im Besonderen handelt es sich darum, Folgendes zu erstellen:

- einen Quellenkataster wegen des Risikos, dass die Schüttungsrate von Quellen zurückgeht oder eine Quelle ganz versiegt;
- einen Katalog der Schäden an Bauten wegen des Risikos von Geländesetzungen durch die Absenkung des Grundwasserspiegels.

Das Pflichtenheft des die Arbeiten begleitenden Geologiebüros muss genügend detailliert sein, damit sichergestellt ist, dass eine Aufnahme des effektiv angetroffenen Kontextes und der Entwicklung der hydrogeologischen Verhältnisse vor und dann während der Ausführung der Arbeiten gemacht wird. Je nachdem, was dabei festgestellt wird, können Anpassungen des Projekts unter Vorbehalt der Zustimmung durch die betroffenen Parteien vorgenommen werden. Die geologischen und hydrogeologischen Modelle können ebenfalls aufgrund von neu ermittelten Daten aktualisiert werden. Die Aufnahmen und Pläne in Bezug auf den Bau werden in der Geologischen Informationsstelle (Swisstopo, Wabern) deponiert.

6.7 Monitoring nach Ausführung, Wirksamkeitskontrolle, Unterhalt

Das Monitoring der Auswirkungen der ausgeführten Arbeiten ist unerlässlich. Dabei ist vor allem zu verifizieren, ob die Ziele der Sanierung erreicht wurden, dies bereits auf der Ebene der hydrogeologischen Charakteristiken (Absenkungen im Erdreich), aber auch der Bewegungen. Es wird dringend empfohlen zu messen, mit welcher Geschwindigkeit sich die neuen Gleichgewichtsverhältnisse einstellen. Eine solche Kontrolle bedingt den Unterhalt eines Beobachtungsnetzes, welches Schritt für Schritt zurückgebaut werden kann. Nach einigen Jahren verbleibt lediglich eine beschränkte regelmässige, auch kostengünstige Überwachung der Rutschung, die gleichzeitig mit der Kontrolle der Sanierungsmassnahmen und -einrichtungen stattfinden kann. Aufgrund der Daten der Zustandsbeurteilung und ihrer Interpretation erstellt der Auftragnehmer periodisch einen Bericht über die Entwicklung der Situation. Diese Berichte werden den entsprechenden Instanzen (einschliesslich BAFU im Fall subventionierter Projekte) sowie an die Anwohner in der Nachbarschaft weitergeleitet, letzteren, damit sie sich der Verbesserungen und des Restrisikos bewusst werden. Die Alterung der technischen Installationen muss aufmerksam beobachtet werden. Dies betrifft vor allem die Zuverlässigkeit der Drainageabschnitte (Verformungen, Verstopfungen usw.). Die Unterhaltsarbeiten, die durch die normale Alterung der Installationen oder durch besondere Vorkommnisse nötig werden, werden gemäss den im Rahmen des Bauprojekts festgelegten Modalitäten (Absatz 6.5) ausgeführt.

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis wird erfasst und mit den Voraussagen verglichen. Die Erfahrungen aus dem konkreten Fall werden wenn möglich publiziert, um zur Verbesserung der Kenntnisse über die Stabilisierung von Hangrutschungen beizutragen.

6.8 Schlussfolgerungen Planung

Das Vorgehen für die Sanierung einer Hangrutschung entspricht weitgehend demjenigen, das für Arbeiten in Zusammenhang mit Infrastrukturen von öffentlichem Interesse Anwendung findet. Die Besonderheiten liegen in der anhaltenden Aufmerksamkeit und der langen Dauer, welche die geologischen und hydrogeologischen Beobachtungen erfordern, sowie in einer guten Anpassungsfähigkeit der Ingenieurbauten an die effektiv angetroffenen Verhältnisse.

In Krisensituationen kann das normale Prozedere durch Sofortmassnahmen ersetzt werden, mit dem Ziel, die öffentliche Sicherheit zu garantieren, und zwar sofort und unter möglichst guten Bedingungen. Dabei sind die zuständigen kantonalen Amtsstellen, die den Interventionsrahmen und die zu respektierenden Bedingungen festlegen, so rasch als möglich mit einzubeziehen. In einer Notfallsituation behalten die Grundsätze, welche der Gesamtheit des Planungsverfahrens zugrunde liegen, ihre Gültigkeit: Art und Charakteristik des Prozesses, Art des Schadenpotenzials, Beurteilung der Gefahren und Risiken, Schutzdefizit, Studie und Auswahl der Variante (die das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis bietet) usw. Ein Projekt, das den normalen Anforderungen einer Vorstudie und eines Vorprojekts entspricht, kann hinterher ausgearbeitet werden.

> Literatur

ARE, BWG, BUWAL 2005: Empfehlungen – Raumplanung und Naturgefahren. Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL: 48 S.

BAFU 2008: Handbuch NFA im Umweltbereich. Umwelt-Vollzug. Bundesamt für Umwelt BAFU, 283 S.

BAFU 2010: Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe. Bundesamt für Umwelt BAFU (in Vorbereitung).

Bayard D. 2003: The effect of seasonal soil frost on the alpine groundwater recharge including climate change aspects. Thèse EPFL n° 2709, Lausanne.

Bonnard Ch. 1996: Grundsätze für die Zustandserfassung von auf instabilem Untergrund ausgeführten Strassenbauwerken. Bundesamt für Strassen. Bericht Nr. 384.

Bonnard Ch. 2006a: Evaluation et prédiction des mouvements des grands phénomènes d'instabilité de pente. Bull. angew. Geol. 11(2): 89–100.

Bonnard Ch. 2006b: Identification des mécanismes de glissement, auscultation et modélisation de l'effet des ouvrages d'assainissement. Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches 153: 43–52.

Bonnard Ch., Engel Th., Steinmann G. 1989: Mesures continues du mouvement des glissements de terrain en montagne. Proc. XIIth Int. Conf. for soil mech. and found. engrg. Rio de Janeiro (3): 1543–1548.

Bonnard Ch., Vulliet L. 2006: Management of risks from large landslides: The problems of acceptable and residual risks. In: Ammann W.J., Dannenmann S., Vulliet L. (Ed.) 2006: RISK 21 – Coping with risks due to natural hazards in the 21st Century. Taylor & Francis Group, London: 191–200.

BRP, BWW, BUWAL 1997: Empfehlungen zur Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Raumplanung BRP, Bundesamt für Wasserwirtschaft BWW, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. Reihe Naturgefahren: 42 S.

BUWAL 1999: Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. Umwelt-Materialien Nr. 107/I Methode: 115 S., Nr. 197/II Fallbeispiele: 129 S.

Cassan M. 2005: Les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ENPC.

Clark A.R., Fort D.S., Holliday J.K., Gillarduzzi A. 2007: Allowing for climate change; an innovative solution to landslide stabilization in an environmentally sensitive area on the Isle of Wight. In: McInnes R., Jakeways J., Fairbank H., Matthie E. (Ed.) 2007: Landslides and Climate Change.Taylor & Francis Group, London: 443–451.

Commend S., Geiser F., Tacher L. 2006: 3D numerical modelling of a landslide in Switzerland. In: Zimmermann T. (Ed.) 2006: Numerics in geotechnics and structures. Elmepress International: 103–113.

Cruden D.M. 1991: A Simple Definition of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology 43: 27–29.

Cruden D.M., Varnes D.J. 1996: Landslide types and processes. In: Turner K.A., Schuster R.L. (Ed.) 1996: Landslide investigation and mitigation. Transportation Research Board, special report 247. National Academy Press, Washington: 36–75.

Dunnicliff J. 1988: Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & Sons, New York.

Engel T. 1986: Nouvelles méthodes de mesure et d'analyse pour l'étude des mouvements du sol en terrains instables. Thèse EPFL n° 601, Lausanne.

Etcheverry D., Parriaux A. 1998: Les méthodes isotopiques dans la pratique de l'Hydrogeologie. Gas Wasser Abwasser 78(1): 10–17.

Etcheverry D., Vennemann T. 2009: Isotope im Grundwasser. Methoden zur Anwendung in der hydrogeologischen Praxis. Bundesamt für Umwelt BAFU. Umwelt-Wissen Nr. 0930: 121 S.

Fang J., Tacher L. 2003: An efficient and accurate algorithm for generating spatially-correlated random fields. Communications in Numerical Methods in Engineering 19(10): 801–808.

Frehner M., Wasser B., Schwitter R. 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS). Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.

Geiser F. 1999: Comportement mécanique d'un limon non saturé: étude expérimentale et modélisation constitutive. Thèse EPFL n° 1942, Lausanne.

Harr M.E. 1981: Mécanique des milieux formés de particules. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes PPUR.

Holtz R.D., Schuster R.L.1996: Stabilization of soil slope. In: Turner K.A., Schuster R.L. (Ed.) 1996: Landslide investigation and mitigation. Transportation Research Board, special report 247. National Academy Press, Washington: 439–473.

Jansson P.E. 2003: Physical Processes. In: Bendi D.K., Nieder R. (Ed.) 2003: Handbook of processes and modeling in the soil-plant-system. Haworth Press, New York: 5–26.

Kilchmann S. 2001: Typology of recent groundwaters from different aquifer environments based on geogenic tracer elements, Thèse EPFL n° 2411, Lausanne.

Lencastre A. 1996: Hydraulique générale. Editions Eyrolles.

Markart G., Kohl B., Perzl F. 2006: Der Bergwald und seine hydrologische Wirkung – eine unterschätzte Größe? Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF. Wissen 55: 34–43.

Menzel L. 1999: Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam.

Noverraz F., Bonnard Ch. 1986: Rapport d'étude DUTI, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Glissement d'Arveyes, mesures inclinométriques, mars 1986. Unveröffentlicht.

Noverraz F., Bonnard Ch.1990: Mapping methodology of landslides and rockfalls in Switzerland. ALPS 90 – Alpine Landslide Practical Seminar, Sixth International Conference and Field Workshop on Landslides, Università degli Studi, Milano: 43–53.

Noverraz F., Bonnard Ch., Dupraz H., Huguenin L. 1998: Grands glissements de terrain et climat, VERSINCLIM – Comportement passé, présent et futur des grands versants instables subactifs en fonction de l'évolution climatique, et évolution en continu des mouvements en profondeur. Rapport final PNR31. Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: 314 S.

Oswald D. 2003: Analyse de l'activité de glissements de terrain et relation avec les conditions climatiques: exemples dans les Préalpes fribourgeoises (Suisse). Département de Géosciences, Université de Fribourg, GeoFocus 8.

Parriaux A. 2009: Géologie – Bases pour l'ingénieur. 2e édition. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes PPUR. Auch in englischer Sprache erhältlich: Geology: Basics for Engineers, CRC Press, Taylor & Francis Group, London, 2009.

Parriaux A., Lizskay M., Mueller I., Della Valle G. 1988: Guide pratique pour l'usage des traceurs artificiels en hydrogéologie. GEOLEP-REPORT-1988-001. Publication du Groupe Suisse des Hydrogéologues.

Parriaux A., Etcheverry D., Vaudan J. 2001: Isotope im Wasserkreislauf. In : Hydrologischer Atlas der Schweiz, 2001, Tafel Nr. 6.2. Landeshydrologie, Bern.

PLANAT 2009: Risikokonzept für Naturgefahren – Leitfaden. Strategie Naturgefahren Schweiz – Umsetzung des Aktionsplans PLANAT 2005–2008. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT.

Raetzo H. 1997: Massenbewegungen im Gurnigelflysch und Einfluss der Klimaänderung. Arbeitsbericht NFP 31. Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: 256 S.

Raetzo H., Rickli Ch. 2007: Rutschungen. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707: 215 S.

Rickli Ch. 2001: Vegetationswirkungen und Rutschungen – Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL: 97 S.

Rickli Ch., Bucher H., Böll A., Raetzo H. 2004: Untersuchungen zu oberflächennahen Rutschungen des Jahres 2002 im Napfgebiet und in der Region Appenzell. Bull. angew. Geol. 9(1): 37–50.

Schudel B., Biaggi D., Dervey T., Kozel R., Müller I., Ross J.H., Schindler U. 2002: Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie. Praxishilfe. Bericht des Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG, Reihe Geologie Nr. 3: 75 S.

Tacher L., Bonnard Ch., Laloui L., Parriaux A. 2005: Modelling the behaviour of a large landslide with respect to hydrogeological and geomechanical parameter heterogeneity. Landslides 2(1): 3–14. Springer Berlin / Heidelberg.

Tullen P., Turberg P., Parriaux A. 2006: Radiomagnetotelluric mapping, groundwater numerical modelling and 18-oxygen isotopic data as combined tools to determine the hydrogeological system of a landslide prone area. Engineering Geology 87: 195–204.

Turner K.A., Schuster R.L. 1996: Landslide investigation and mitigation. Transportation Research Board, special report 247. National Academy Press, Washington: 673 S.

USGS 2004: Landslide Types and Processes. United States Geological Survey. Fact sheet 2004 3072.

Veder C. 1981: Landslides and their stabilization. Springer, New York.

VSS 2000: Überwachung von Bauwerken in nicht stabilem Gelände. Norm SN 670 305. Vereinigung Schweizerische Strassenfachleute VSS: 16 S.

Vulliet L. 2000: Natural slopes in slow movement. In: Zaman M., Gioda G., Booker J. (Ed.) 2000: Modeling in geomechanics. John Wiley & Sons, New York: 654–676.

Vulliet L., Bonnard Ch. 1996: The Chlöwena landslide: Prediction with a viscous model. In: Senneset K. (Ed.) 1996: Landslides – Glissements de terrain. Balkema, Rotterdam (1): 397–402.

Vulliet L., Dewarrat X. 2001: Nouveautés dans l'analyse des mouvements de terrain. Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches 143: 45–54.

Zeh H. 2007: Ingenieurbiologie – Handbuch Bautypen. Verein für Ingenieurbiologie, Europäische Föderation für Ingenieurbiologie. Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: 441 S.

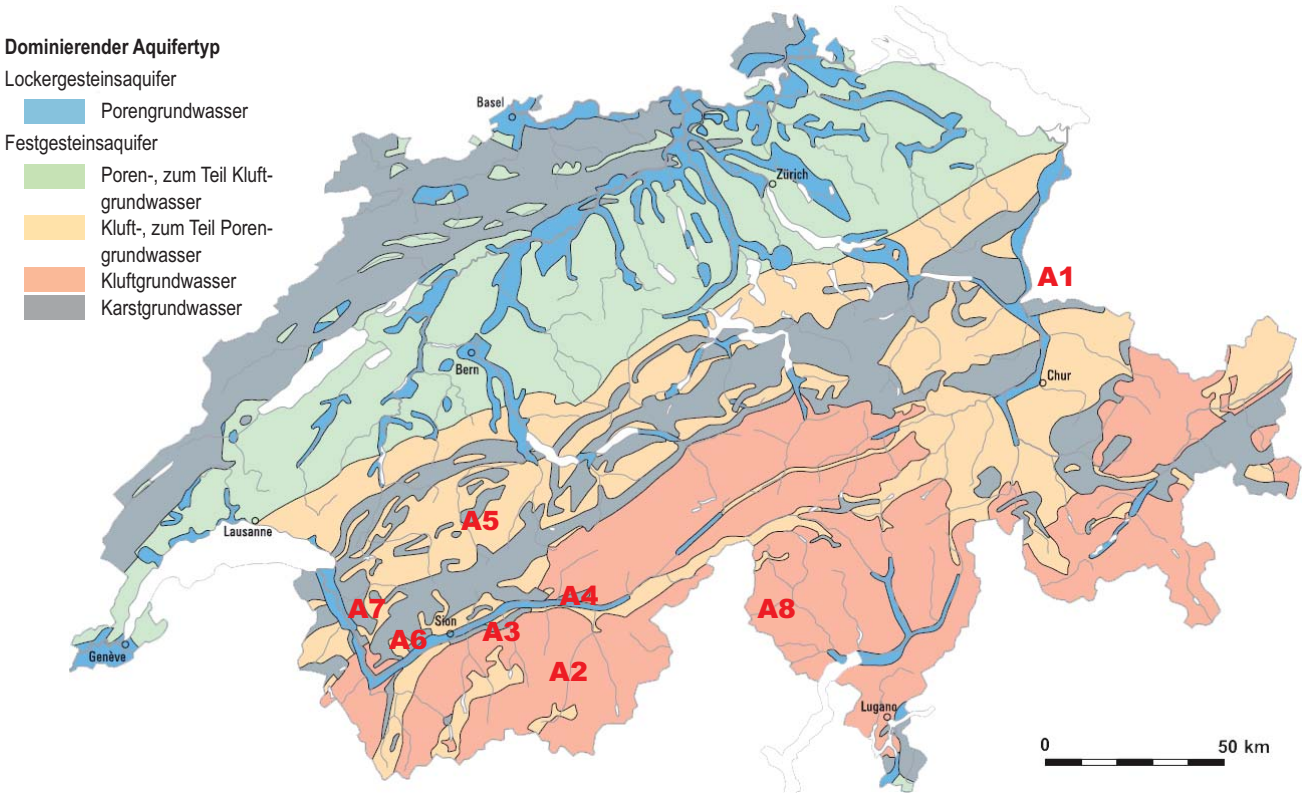
Zeh H. 2010: Ingenieurbiologische Bauweisen im naturnahen Wasserbau. Praxishilfe. Umwelt-Wissen Nr. 1004. Bundesamt für Umwelt BAFU: 59 S.

> Anhang

Die acht im Anhang vorgestellten Fallstudien (Abb. 33) zeigen die Vielfalt der Situationen, welchen der Geologe oder Hydrogeologe in Bezug auf die geologischen Prozesse oder die hydrogeologischen Rahmenbedingungen gegenüberstehen kann.

Abb. 33 > Hydrogeologische Skizze der Schweiz, mit Lokalisierung der Fallstudien

A1: Rutschung Triesenberg (FL); A2: Felsrutschung Medji, St. Niklaus (VS); A3: Rutschung Les Peillettes (VS); A4: Spontanrutschung und Hangmure Binu, Hohtenn (VS); A5: Rutschung Walkere, St. Stephan (BE); A6: Rutschung Montagnon (VS); A7: Rutschung Arveyes (VD); A8: Rutschung Campo Vallemaggia (TI).



© BAFU 2008

Die vorangehenden Kapitel setzten den Akzent auf die Notwendigkeit, die geologischen und hydrogeologischen Merkmale einer Rutschung so detailliert wie möglich zu verstehen, um diese mittels Drainagemassnahmen sanieren zu können. Die im Folgenden präsentierten Fallstudien entsprechen jedoch nicht alle diesem hydrogeologischen Ansatz. Die historischen oder praktischen Rahmenbedingungen hatten dies nicht immer erlaubt. Dennoch sind die Beispiele nützlich, um die wichtige Rolle aufzuzeigen, welche das Wasser in Rutschungen spielt. Für die Sanierung in der Praxis soll allerdings in Zukunft der in diesem Leitfaden entwickelte Ansatz als Empfehlung dienen, wie auch immer die Herausforderung aussehen mag.

A1

Rutschung Triesenberg (FL): Monitoring der hydrogeologischen Parameter, Instrumentierung und Modellierung

Riccardo Bernasconi, Laurent Tacher



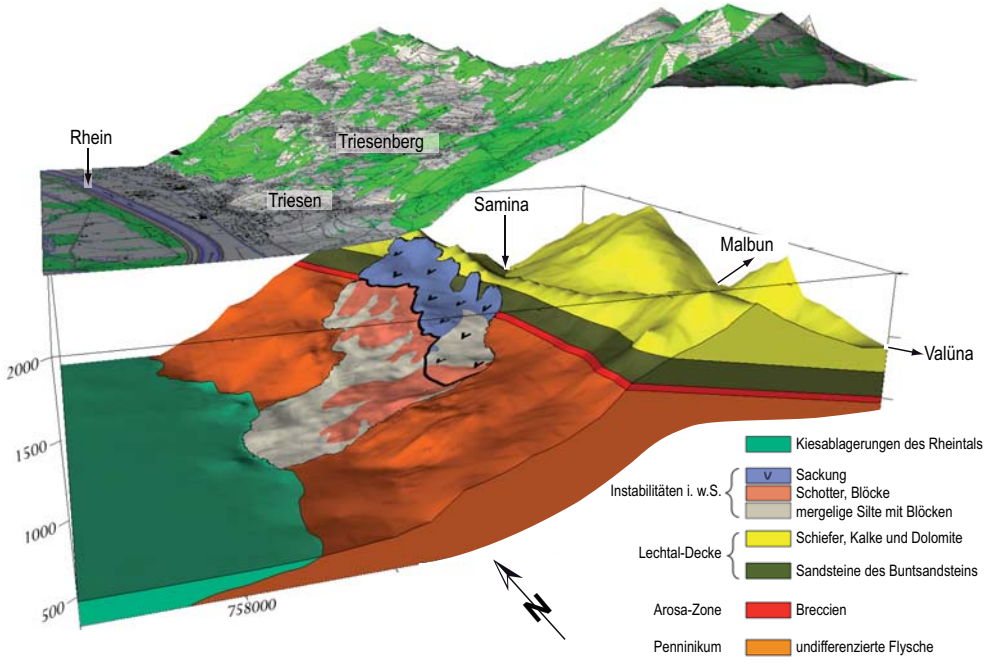
Allgemeine Lage, Problemstellung, Bauherrschaft

Ort:	Rutschung Triesenberg (FL)
Koordinaten:	760 000/221 000
Höhenlage:	zwischen 460 und 1350 m
Fläche:	rund 5 km²
Mächtigkeit der aktiven Zone:	rund 10 bis 15 m, stellenweise bis 20 m
Gesamtvolumen:	rund 400 Mio. m³

Es handelt sich um eine langsame Rutschung, die zwischen Balzers und Vaduz im Fürstentum Liechtenstein auf der rechten Talseite der Rheintals liegt. Sie tangiert zum einen das auf der Rutschung gelegene Dorf Triesenberg (rund 2600 Einwohner) und zum anderen teilweise das Dorf Triesen am Fuss der Gleitmasse am Rheinufer (Abb. 34). Es ist eine sehr alte Rutschung: Die Bewegungen begannen vor mindestens 8500 Jahren (Datierung ^{14}C) sind jedoch höchstens seit 12 000 Jahren aktiv.

Abb. 34 > Die Triesenberg-Flanke mit geologischem Modell und den Abgrenzungen der aktiven Rutschung sowie der Sackung im oberen Teil der Rutschung

Hinter dem Gratrücken ist das Hochtal von Samina zu erkennen.



DHM25 und PK25 © swisstopo, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo [BA091592]

Die Bewegungen der Rutschung werden seit Ende der 1970er-Jahre periodisch überwacht (Geodäsie und Inklinometrie). Ein 1991 ausgearbeitetes, grossmassstäbliches Sanierungskonzept sah ein Drainagesystem von rund 8 km Länge vor, um das Wasser

in geringer Tiefe zu fassen. Das Amt für Brücken und Strassen des Fürstentums Liechtenstein (TBA FL) äusserte als Bauherr Vorbehalte gegenüber der langfristigen Zweckmässigkeit und Wirksamkeit der vorgeschlagenen Massnahmen, weil sie den hydrogeologischen Kontext der Rutschung nicht genügend berücksichtigen würden. 1998 beauftragte das TBA das Büro Dr. Riccardo Bernasconi in Sargans damit, in einem als besonders kritisch beurteilten Sektor unmittelbar oberhalb des Dorfs Triesenberg eine detaillierte hydrogeologische Studie auszuarbeiten.

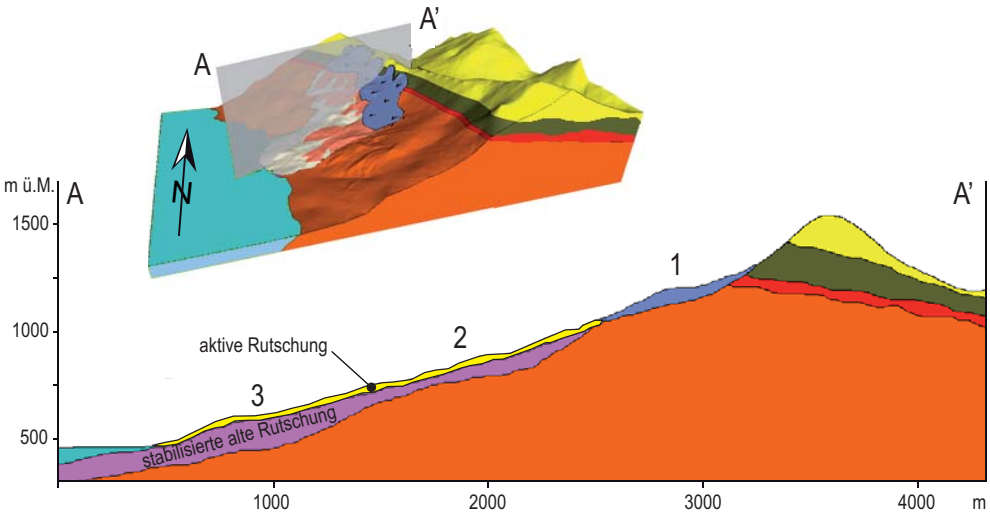
Charakterisierung der Rutschung

Geologie

Die Gleitmasse weist eine komplexe, in drei Hauptsektoren aufgeteilte Struktur auf. Der obere Bereich entspricht einer Sackung, welche hauptsächlich die harten Felsformationen des Trias (Buntsandstein und Muschelkalk) erfasst hat und sich von Nord nach Süd stufenartig absenkt. Der mittlere Sektor der Rutschung wird durch Schuttströme geprägt, welche ihren Ursprung an der felsigen Front der abgesackten Masse haben und von der Zersetzung dieser Massen gespiesen werden. Das grobe Lockergestein der Rinnen besteht aus Kies, Sandsteinblöcken und Dolomit; sie ziehen sich über einige hundert Meter talabwärts. In der Regel sind sie lateral durch stark ton- und lehmhaltige Schichten voneinander getrennt, welche durch Umarbeitung und Verwitterung des aus Mergeln und Flysch bestehenden felsigen Untergrundes entstanden (Abb. 35). Der untere Teil der Rutschung besteht im Wesentlichen aus einer Mischung von verwitterten Mergeln und Flyschen mit eingebetteten Elementen aus Sandsteinen und triadischen Dolomiten. Die durchschnittliche Mächtigkeit der gesamten Gleitmasse liegt bei rund 80 m; in einigen Partien, vor allem gegen den Fuss der Rutschung hin, übersteigt sie 100 m. Im gegenwärtigen Zustand sind nur die obersten 10 bis 15 m aktiv (gelbe Zone in der Abb. 35) (Allemann 1985).

Abb. 35 > Geologischer Querschnitt durch die Rutschung von Triesenberg

Die alte, heute stabile Rutschmasse erscheint nicht an der Oberfläche (Legende: siehe Abb. 34). 1: oberer Teil (Sackung), 2: mittlerer Sektor, 3: unterer Sektor.



Hydrogeologie

Das Durchlässigkeitsfeld ist sehr heterogen: Während die Sackungsmasse oben sowie die Blockströme in der mittleren Partie mittlere bis hohe Durchlässigkeiten aufweisen ($K \geq 5 \cdot 10^{-4}$ m/s), sind die tonig-lehmigen Materialien, welche zwischen den Rinnen und vor allem im unteren Teil anzutreffen sind, schwach durchlässig ($K \geq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s). Während im oberen Teil der Rutschung (Sackungsmasse und Blockströme) die Wasserzirkulation im Untergrund als freies Grundwasser stattfindet, ist der untere Teil häufig durch gespannt bis halb-gespannte Verhältnisse charakterisiert. Eine Besonderheit der Rutschung besteht darin, dass im mittleren Teil zahlreiche Quellen mit hoher Schüttrate ($Q_{Mittel} \geq 5$ l/s) vorkommen, die in der Regel am unteren Ende einer «Blockrinne» gelegen sind (Bernasconi et al. 2001).

Bewegungen

Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten variieren zwischen 2 und 5 cm pro Jahr im mittleren Teil der Rutschung und zwischen einigen mm und 2 cm in den peripheren Bereichen. In den meisten Bohrungen beobachtet man einen einzigen Gleithorizont, der in 10 bis 15 m Tiefe liegt. Obschon keine Bohrung, welche den felsigen Untergrund erreicht, mit einem Inklinometer ausgestattet wurde, ist anzunehmen, dass kein aktiver Gleithorizont in grösserer Tiefe existiert. Hinweise hierfür ergibt die Übereinstimmung zwischen den Messungen der Verschiebungen am aktiven Gleithorizont und den geodätischen Beobachtungen an der Oberfläche. Durch punktuelle in der Vergangenheit durchgeführte Messungen der Verschiebungen (alle 3 bis 6 Monate) hatte man bisher angenommen, dass die Rutschung eine ziemlich konstante Geschwindigkeit aufweist.

Konzeption des Monitoring- und Instrumentierungssystems

Mit dem Ziel, die für das Verhalten der Rutschung massgebenden Phänomene zu bestimmen, sah die Instrumentierung für das zu beobachtende Gebiet wie folgt aus:

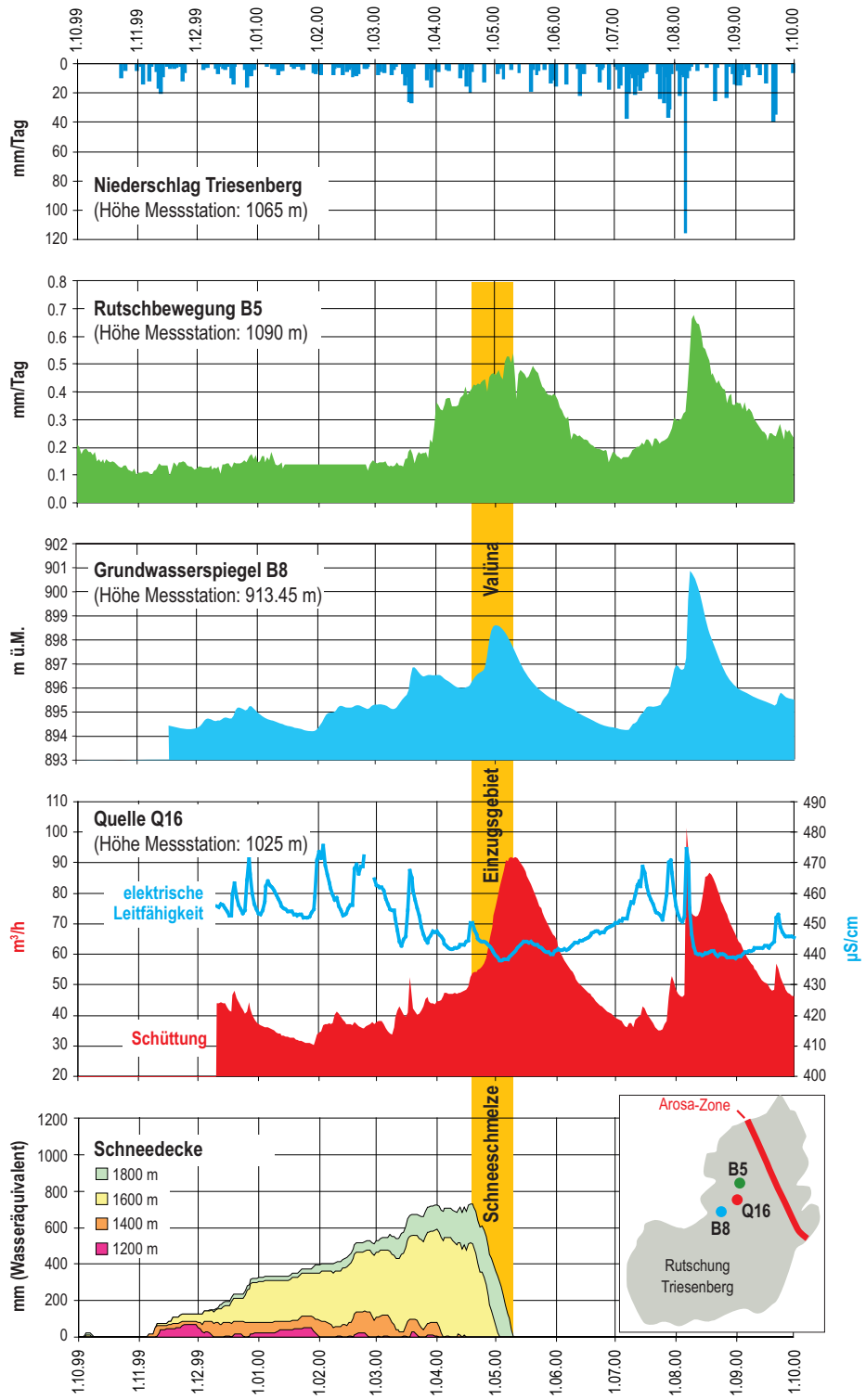
- 1 Pluviometer ungefähr in der Mitte der Rutschung;
- 5 Drucksonden in Piezometern, welche bis in die Gleitschicht reichen;
- Sonden, welche die Schüttung, die elektrische Leitfähigkeit und die Temperatur an den fünf grössten Quellen messen;
- 2 Inklinometer.

Die Messungen wurden automatisch und kontinuierlich über eine Periode von zwei Jahren (1999–2001) aufgezeichnet. Dieses Dispositiv wurde punktuell durch Piezometer- (4 Beobachtungspunkte) und Inklinometermessstellen (4 Beobachtungspunkte) sowie Messungen an Quellen (11 Beobachtungspunkte) ergänzt.

Ergebnisse

Abb. 36 gibt einen Einblick in die Ergebnisse für einen Teil der Messpunkte.

Abb. 36 > Resultate der kontinuierlichen Messungen: Inklinometer B5, Piezometer B8 und Quelle Q16 (Lokalisierung gemäss schematischer Karte unten rechts)



Die Meteodaten wurden im Rahmen des Projekts erhoben.

Dank den kontinuierlichen Messungen lässt sich erkennen, dass die Gleitmasse sich nicht mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegt und dass die Schwankung der Geschwindigkeit nicht direkt von den lokalen Niederschlägen abhängt. Die Verschiebungsgeschwindigkeit erscheint klar als Funktion der in der Gleitmasse selber gemessenen Wasserdrücke. Die Wasserdrücke und die Schüttrate der Quellen zeigen eine komplexe Reaktion in Bezug auf die meteorologischen Bedingungen. Man kann feststellen, dass Regen von kleiner bis mittlerer Intensität beschränkte und unmittelbare Reaktionen des Wasserspiegels auslöst (Q16 in Abb. 36). Starke Niederschläge (wie am 6.8.2000) lösen zuerst eine schnelle und mit einigen Tagen Verspätung eine zweite, deutlich ausgeprägtere Spitze aus. Die Messung der Leitfähigkeit im Quellwasser zeigt, dass der erste Anstieg von einer Erhöhung des Mineraliengehalts des Wassers begleitet ist, während für die zweite Spitze eine Verdünnung des Quellwassers (Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit) typisch ist. Ausserdem zeigen die Kurven der Schüttrate der Quellen (z. B. Q16) und des Wasserdrucks im Grundwasserleiter (B8) eine bedeutende Erhöhung der Werte in der Periode April–Mai 2000, in welcher gar keine Niederschläge fielen, die einen Anstieg erklären könnten. Die Schneeschmelze kann auch nicht als Erklärung beigezogen werden, denn sie war auf dieser Höhenlage bereits seit einem Monat beendet. Eine für die höheren Lagen durchgeführte Simulation zeigt, dass es die zwischen 1600 und 1800 m stattfindende Schneeschmelze war, welche mit der beobachteten, sehr akzentuierten Speisung des Wasserspiegels zusammenfiel.

Dank diesen Beobachtungen konnte man zeigen, dass das hydrogeologische Einzugsgebiet der Flanke von Triesenberg bei Weitem das topografische Einzugsgebiet übersteigt und ein anderes Einzugsgebiet einschliesst, welches auf einer Höhe von 1600 bis 1800 m gelegen einen für das Verhalten der Rutschung entscheidenden Grundwasserzufluss bewirkt. Angesichts der topografischen Situation und der geologischen Strukturen kann es sich nur um das südöstlich hinter dem Gratrücken gelegene Einzugsgebiet von Valüna handeln, dessen Hauptabfluss (Samina) sich nach Norden ergiesst (Abb. 34). Zusätzliche Untersuchungen, insbesondere ein Markierungsversuch, konnten diese Hypothese bestätigen (Bernasconi 2002).

Kosten

Die Kosten der Studie, die sich über 4 Jahre erstreckte und geophysikalische Messungen, 11 Kernsondierbohrungen, die Instrumentierung des Messnetzes, die Wartung der Geräte, den Markierungsversuch und die entsprechenden hydrogeologischen Berichte einschloss, beliefen sich auf rund 450 000 Franken. Darin sind die Kosten der hydrogeologischen (mit ungesättigter Strömung) und geomechanischen Modellierung enthalten, welche sich auf rund 180 000 Franken beliefen. Indem sie die kritischen hydrogeologischen Verhältnisse und die Empfindlichkeit der Rutschung auf klimatische Veränderungen definiert, dient diese Modellierung als nachhaltiges raumplanerisches Instrument.

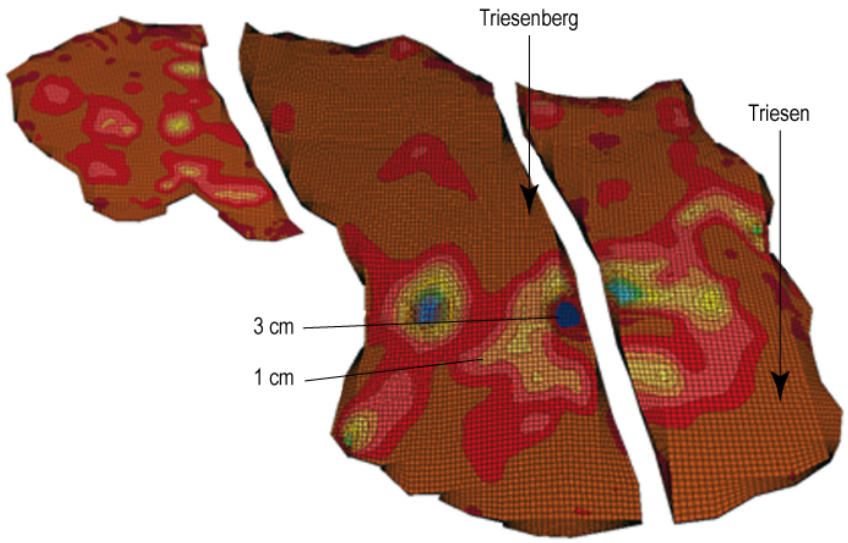
Schlussfolgerungen

Das gewählte Monitoringkonzept machte es möglich, auf detaillierte Weise den Zusammenhang zwischen der Dynamik des Grundwasserspiegels und dem Verhalten der

Rutschung zu erfassen. Vor allem die Speisung der instabilen Masse durch zwei topografische Einzugsgebiete konnte bewiesen werden. Ihre Zuflüsse wurden dank der kontinuierlichen Messung der klimatischen Parameter bestimmt, was ermöglichte, die effektive Versickerung zu quantifizieren. Wegen der guten Qualität der klimatischen Daten zusammen mit den ebenfalls kontinuierlichen inklinometrischen Messungen konnten im Übrigen relativ präzise Randbedingungen in die numerischen Modelle eingeführt und eine minutiöse Kalibrierung vorgenommen werden. Die hydrogeologischen und mechanischen Modellierungen (Abb. 37) konnten, trotz sehr ungünstiger Verhältnisse, in verlässlicher Weise die geringe Empfindlichkeit des Systems gegenüber extremen Wetterereignissen und klimatischen Veränderungen aufzeigen (François et al. 2007). Diese Trägheit wird den beiden topografischen Einzugsgebieten zugeschrieben, welche die Speisung mit Grundwasser über die Jahreszeiten verteilen und die Hochwasserspitzen dämpfen (Speicherungsfunktion des Samina-Hochtals). Leider hat diese besondere Charakteristik auch die Konsequenz, dass ein Stabilisierungsversuch auf regionaler Ebene praktisch illusorisch ist. Dennoch: Die oberflächlichen lokalen Instabilitäten, deren Verhalten viel sensibler auf intensive Infiltration reagiert, sind identifiziert.

Abb. 37 > Verschiebungsfelder übers Jahr, berechnet mit dem geomechanischen Modell

Eine Erkenntnis der kontinuierlichen Messungen war, dass sich in der Rutschung drei verschiedene Bereiche unterscheiden lassen, was eine höhere Rechenpräzision ermöglichte.



Literaturhinweise

Allemann F. 1985: Geologische Karte des Fürstentums Liechtenstein, 1 : 25 000. Regierung des Fürstentums Liechtenstein, Vaduz.

Bernasconi R. 2002: Hangsanierung Triesenberg – Hydrogeologische Überwachung – Ergebnisse der Markierversuche im Valünatal 1999/2000, Hydrogeolog. Bericht Nr.1124-04, August 2002. Tiefbauamt des Fürstentums Liechtenstein (unveröffentlicht).

Bernasconi R., Turberg P., Müller I.,Tullen P., Parriaux A. 2001: Investigation of Landslide Areas with radiomagnetotelluric Geophysics, The Case of Triesenberg (Liechtenstein). International Conference on Landslides, Davos, Switzerland: 239–248.

François B., Tacher L., Bonnard Ch., Laloui L., Triguero V. 2007: Numerical modelling of the hydrogeological und geomechanical behaviour of a large slope movement: the Triesenberg landslide (Liechtenstein). Can. Geotechnical J. (44): 840–857.

A2 Felsrutschung Medji, St. Niklaus (VS): Monitoring der hydrogeologischen Parameter, Instrumentierung und Modellierung

Hermann Rovina



Allgemeine Lage, Problemstellung, Bauherrschaft

Bezeichnung/Lokalität:	Felsrutschung Medji, Gemeinde St. Niklaus (VS)
Koordinaten:	626 740/112 940
Höhenlage:	1740 m
Geometrie:	steiler Felskopf; ca. 5000 m² im Grundriss; mit vertikalen Säulen bis 60 m hoch
Maximaler Tiefgang:	ca. 50 bis 60 m
Volumen:	130 000 m³

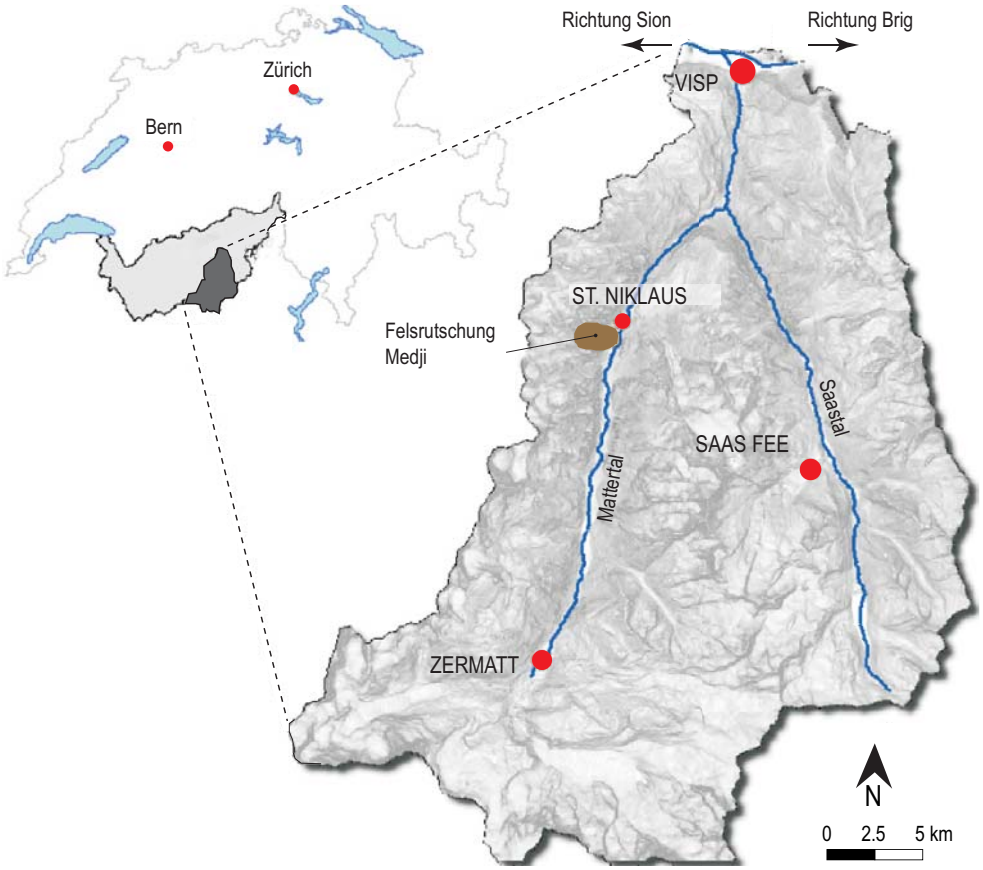
Im Sommer 2002 begann sich im Medji, oberhalb von St. Niklaus im Nikolaital (VS) eine grössere Felsmasse zu beschleunigen (Abb. 38). Die Felsrutschung endete am 21.11.2002 in einem Felssturz. Durch das umfangreiche Messdispositiv liess sich der Abbruch genau vorhersagen. Ein eilends erstellter Schutzdamm erwies sich gegen die abstürzenden Felsmassen als effizient. Von der Gefährdung unmittelbar betroffen waren ca. 120 Personen und drei Kleinwerkstätten. Diverse Nebenstrassen und auch die rege befahrene Linie der Matterhorn Gotthard Bahn waren auf einer Länge von ca. 800 m im Gefahrenbereich. Beim Abbruch kam es zu keinen Personen- oder nennenswerten Sachschäden. Als Bauherr trat die Gemeinde St. Niklaus und die Dienststelle für Wald und Landschaft des Kantons Wallis auf. Das Schutzdammprojekt wurde durch die Ingenieurbüros Forum Umwelt, Visp und R. Bumann, Naters betreut. Die geologische Beratung und messtechnische Überwachung fand durch das Geologiebüro Rovina + Partner AG, Varen statt. In der Person von Prof. A. Parriaux wurde ein externer Experte der EPFL beigezogen.

Randbedingungen und Charakterisierung der Rutschung

Geologie

Im Bereich des zur Diskussion stehenden Felsobjekts sind vor allem homogene, mittelkörnige «Augengneise von Randa» aufgeschlossen (Abb. 39). Sie werden von Quarzitgängen durchschlagen und weisen Einschaltungen von glimmerreichen, feinkörnigen Lagen auf. Der Komplex gehört der penninischen Siviez-Mischabel-Decke an. Die Lithologie begünstigt eine starke Ausprägung von Trennflächensystemen. Es treten je eine Kluftfamilie parallel und eine senkrecht zur Talachse auf, was zur Bildung von säulenartigen Bruchkörpern führt. Die Hauptschieferung fällt leicht gegen den Hang ein.

Abb. 38 > Geografische Lage des Felssturzes Medji



Hydrogeologie

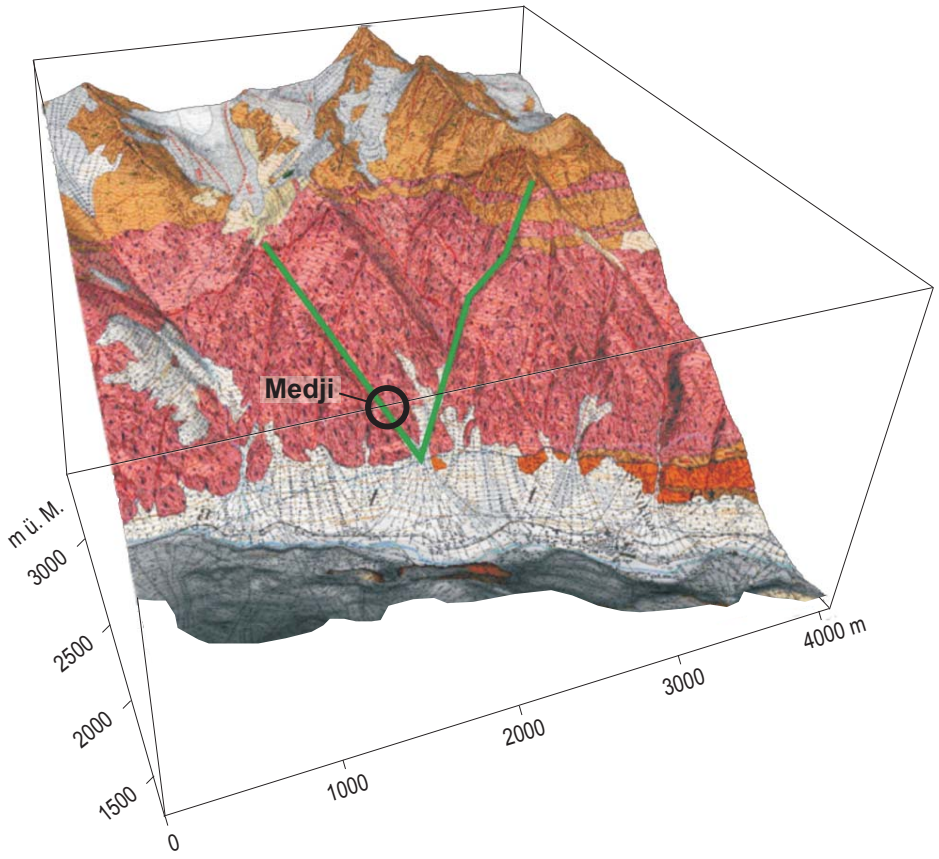
Ein Vergleich der Niederschlagswerte mit der Bewegungsdynamik weist darauf hin, dass die hydrogeologischen Verhältnisse eine signifikante Rolle bei der Auslösung des Abbruchs gespielt haben. Durch Infiltration des Niederschlags auf verschiedenen Höhenstufen – zum Teil in Form von Schnee – sind die Auswirkungen des Niederschlags allerdings zeitverzögert zum Tragen gekommen. Im stark durchtrennten Felskörper mit offenen und feinkornverfüllten Klüften müssen grosse Kluftwasserdrucke entstanden sein. Mit fortschreitender Desintegration des Gesteinsverbandes wurde die direkte Oberflächeninfiltration zunehmend begünstigt.

Bewegungen

Die Geschwindigkeiten der Kluftweitenöffnungen betrugen am Anfang der Messungen im Sommer 2002 ca. 2 mm/Tag und steigerten sich bis 12 Std. vor dem Abbruch am 21.11.2002 auf rund 420 mm/Tag. In der letzten Viertelstunde vor dem Abbruch betrugen sie umgerechnet mehr als 3 m/Tag. Die absolut gemessenen Deformationsvektoren der 60 m hohen Felswand erreichten über den Beobachtungszeitraum von 3 Monaten bis 12 Std. vor dem Abbruch ca. 800 bis 1200 mm. In diesen 3 Monaten wurden 3 Beschleunigungsphasen registriert (17.11./20.11./21.11.02), wobei sich die Bewegungsgeschwindigkeiten jeweils um einen Faktor 2 bis 4 vergrösserten und sich anschliessend auf einem höheren Niveau stabilisierten (Tab. 3).

Abb. 39 > Dreidimensionale Darstellung der Geologie im Projektbereich

Rot: grobflaserige Augengneise («von Randa»); orange: Quarzite, alternierend mit Muskowit- und Phengitschiefer der «Mulde von St. Niklaus»; grün: undurchlässige Kakirit-Zonen.



Geologie nach Bearth 1978; DHM25 und Geologischer Atlas der Schweiz 1 : 25 000 © swisstopo, reprod. mit Bewilligung von swisstopo [BA091592]

Tab. 3 > Typisches Bewegungsverhalten eines Messpunktes während der Schlussphase der Felsrutschung

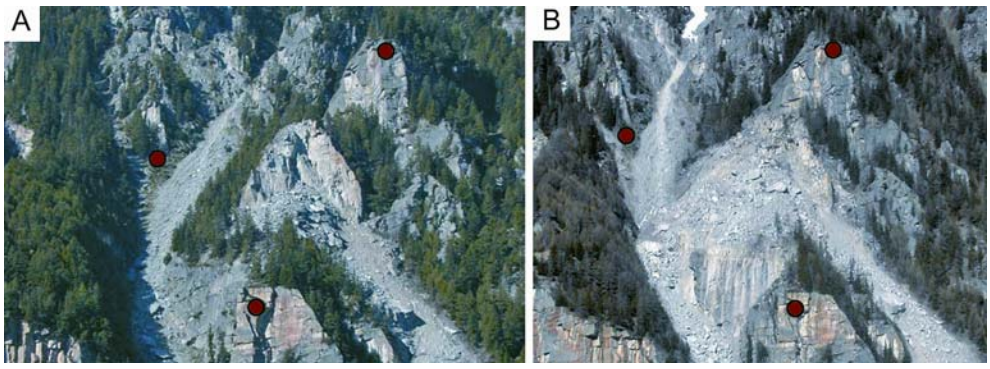
Datum/Zeit	Zeit vor Abbruch	Verschiebung [mm]	Momentane Rutschgeschwindigkeit		Niederschlagsmengen Medji [mm] vor dem Ereignis			Bemerkung
			[mm/Tag]	[mm/Std.]	Summe 24 Std.	Summe 48 Std.	Summe 7 Tage	
08.08.2002 08:00	105,3 Tage	0	–	–	–	–	–	
10.11.2002 08:20	11,3 Tage	751	8,9	0,4	3,3	3,6	18,5	
15.11.2002 08:00	6,3 Tage	814	13,0	0,5	12,6	12,6	29,6	
17.11.2002 08:15	4,3 Tage	889	75,2	3,1	26,3	46,1	72,1	Teilevakuation
19.11.2002 08:00	2,3 Tage	1081	96,0	4,0	0,0	14,6	73,3	
20.11.2002 07:50	1,2 Tage	1227	147,0	6,1	6,3	6,3	79,6	
20.11.2002 16:45	22,6 Std.	1296	211,2	8,8	0,9	7,2	80,5	Vollständige Evakuation
21.11.2002 07:30	7,8 Std.	1690	641,1	26,7	0,9	7,2	80,5	
21.11.2002 09:45	5,6 Std.	1777	928,0	38,7	0,9	7,2	80,5	
21.11.2002 13:15	2,1 Std.	2025	1700,6	70,9	0,0	0,9	76,1	
21.11.2002 15:20								Abbruch

Niederschlagsdaten: Station Grächen, MeteoSchweiz

Die Beschleunigungsphasen korrelieren sehr gut mit den Niederschlags- und den Schneeschmelzperioden. Die Bewegungsvektoren der geodätischen Reflektoren verliefen bis kurz vor dem Abbruch nahezu horizontal und in einheitlicher Richtung. Hingegen waren die Bewegungsraten sehr inhomogen. Tendenziell verschob sich der Wandkopf doppelt so schnell wie die Wandmitte, und lateral wurden grössere Geschwindigkeiten gemessen als im Zentrum. Eine einzelne, diskrete Gleitfläche konnte nicht identifiziert werden. Es lag somit eine deutliche Kippbewegung vor. Vielmehr müssen zahlreiche interne, komplexe Deformationen stattgefunden haben, abhängig vom Trennflächengefüge, lithologischen Schwächezonen und Kluftwasserdruckverhältnissen. Das Abbruchereignis ging schliesslich auf ein Versagen der säulenartigen Gneise in Form von Knicken zurück (Abb. 40).

Abb. 40 > Fotos des sich in Bewegung befindenden Felskopfes «Untere Spissplatte» vor dem Abbruch (A. August 2002) und nach dem Abbruch (B. November 2002)

Rote Punkte = Bezugspunkte.



Das Abbruchvolumen betrug ca. 130 000 m³. Zahlreiche Blöcke und Grossblöcke wurden durch den Schutzdamm aufgehalten. Das Material bildet nun einen mächtigen Lockergesteinskegel. Drei Jahre nach dem Ereignis vom 21. November 2002 bewegte sich die Lockergesteinsmasse mit ca. 70 bis 100 mm/Jahr (= tiefgründige Rutschung mit hoher Intensität), während die verbliebenen Felspartien Verschiebungen von 50 bis 60 mm/Jahr aufzeigten. Ein unmittelbar oberhalb der Rutschmasse gelegener Felskopf, der vor dem Hauptereignis stabil war, bewegt sich heute mit ca. 5 bis 10 mm/Jahr (Messungen vom 23. Juni 2008).

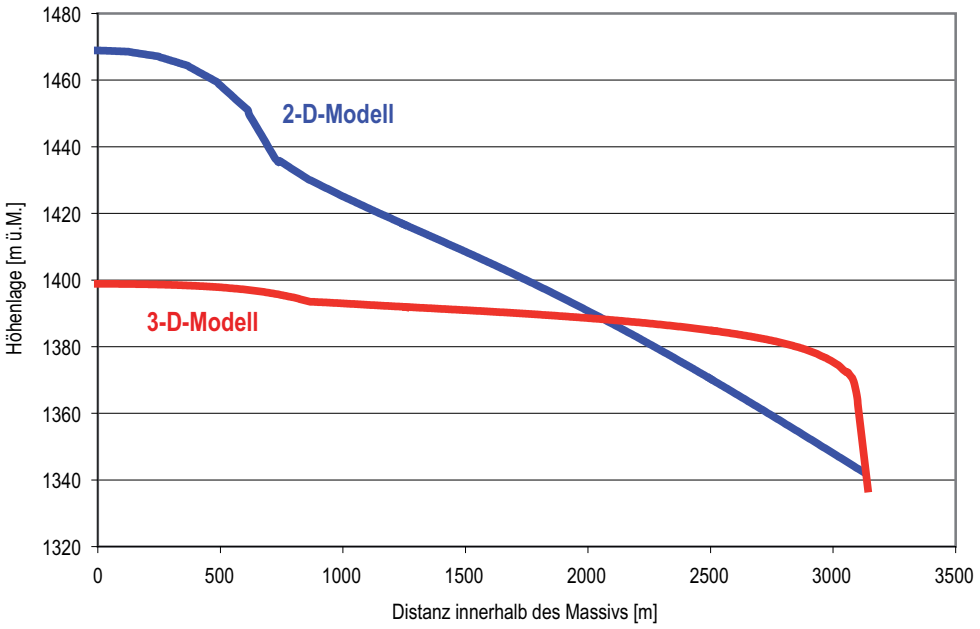
Bewegungsmechanismus und hydrogeologische Modellierung

Eine wahrscheinliche Ursache der anhaltenden Bewegungen dieses Felspakets dürfte dem Aufbau eines relevanten Strömungs- und/oder Kluftwasserdruckes zuzuschreiben sein, welcher sich in der dreidimensionalen Struktur des Trennflächengefüges aufbauen konnte.

Die maximalen Verschiebungen fanden im Bereich von zwei sich kreuzenden schwach durchlässigen Störzonen statt (Abb. 39). Der hydraulische Abflussquerschnitt des zerklüfteten Gneis wird in diesem Intersektionsbereich bei nahezu konstanter Abfluss-

menge stark eingeengt. Dadurch erhöht sich der hydraulische Gradient, was eine Zunahme des Strömungsdruckes zur Folge hat. Dieser dreidimensionale Effekt konnte als Arbeitshypothese mittels einer 2-D- und 3-D-GW-Modellierung (Abb. 41) nachgewiesen werden (Masset 2005).

Abb. 41 > Hydraulisches Potenzial im Felsmassiv mit 2-D- und 3-D-Modell berechnet



Überwachungs-, Schutz- und Sanierungskonzept

Wegen des enormen Volumens der Felsrutschung kam eine Sanierung beispielsweise durch Sprengung oder Verbauungsmassnahmen nicht in Betracht. Dagegen wurde einerseits ein redundantes Messstellen- und Frühwarnnetz installiert (Tab. 4), andererseits wurde der Bau eines ohnehin geplanten Lawinenschutzdammes notfallmässig vorgezogen. Um Aufschluss über das «Innenleben» des Rutschkörpers zu erhalten, wurde eine destruktive Sondierbohrung abgeteuft und geomesstechnisch ausgerüstet. Die Bohrung wurde ausserdem mit einer Bohrlochkamera befahren.

Tab. 4 > Komponente des Mess- und Überwachungsdispositivs

Instrumentierung	Ziel, Genauigkeit
12 Kluftweitenmessgeber	Erfassung der relativen Kluftweitenöffnungen; Genauigkeit: 0,1 mm
30 manuelle Kluftweitenmesspunkte	Erfassung der relativen Kluftweitenöffnungen; Genauigkeit: 1 mm
3 «Tiltmeter»	Messung der Verkippung an der Felsfront (Versagensmechanismen); Genauigkeit: 0,15 mm/m
5 Porenwasserdruckgeber	Existenz Kluftwasserdruck; Zusammenhang zwischen Porenwasserdruck und Deformationsverhalten
1 Datalogger mit Natelmodem und Solarstromversorgung	Registrierung der Messdaten in kurzem Intervall (15 Min.); Alarmschaltung bei Messwertüberschreitung; Übermittlung der Messwerte auf zentralen Datenserver
17 geodätische Reflektoren; manuelle Vermessung mittels Theodolit	Erfassung der absoluten Bewegungsvektoren an der Felsoberfläche; Genauigkeit 2-D-Distanz: ± 1 mm; Genauigkeit 3-D-Lage: ± 15 mm; Redundantes, unabhängiges Messsystem
Bohrlochkameraaufnahme im Sondierbohrloch	Identifikation von lithologischen/strukturellen Schwächezonen; Identifikation von Wasserzutritten
Inklinometerausrüstung in Sondierbohrung	Erfassung von Gleithorizonten und Bewegungsvektoren innerhalb der Rutschmasse

Der oberhalb des Weilers Stalu notfallmässig geschüttete Schutzdamm weist eine Länge von 630 m und eine Wirkungshöhe von 6 bis 10 m auf. Talseits ist mit 2 : 3, bergseits mit 4 : 5 geböscht worden. Zur Vergrösserung des Fallbodens hat man an der natürlichen Geländeböschung, in einem Winkel von ca. 34 bis 36°, ebenfalls noch Material abgetragen. Der Fallboden erreicht eine Breite von 5 bis maximal 16 m. Der Damm konnte bis zum Felssturzereignis nicht komplett fertiggestellt werden.

Das «Medji» dient seit Kurzem auch als Testgebiet für die Radarinterferometrie-Messungen des BAFU. Eine Fortsetzung der Bewegungen in der Lockergesteinsböschung scheint sich flächenhaft zu bestätigen.

Systemwirksamkeit

Das Überwachungs- und Frühwarnsystem erwies sich als effizient. Die Dynamik der Rutschung konnte bis zum Abbruch genau verfolgt werden. Etwa 20 Std. vor dem Ereignis wurde die bedrohte Bevölkerung evakuiert. Der Betrieb der Matterhorn Gotthard Bahn wurde temporär eingestellt. Obwohl zum Zeitpunkt des Abbruchs noch nicht abgeschlossen, bewies der Schutzdamm seine Wirksamkeit und absolute Notwendigkeit vollumfänglich. Mit Ausnahme einiger Blöcke kam das Sturzgut im Fallboden zum Stillstand. Grosser Infrastrukturschaden konnte damit verhindert werden.

Kosten und Kostenwirksamkeit

Die Gesamtprojektkosten (Notmassnahmen, Sprengungen, Überwachung, Dammbau, diverse Räumungen usw.) beliefen sich auf ca. 5 bis 6 Mio. Franken. Eine Schätzung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses liegt bei einem Mittelwert von 1 : 8.

Nach dem Abbruchereignis und der Fertigstellung des Schutzdammes verbleibt nur noch eine geringe Restgefährdung. Es wird ein minimales Messdispositiv aufrechterhalten, bestehend aus 3 Kluftweitenmessgebern mit Datalogging und einigen halbjährlich vermessenen Reflektoren. Die Kosten für den Betrieb belaufen sich jährlich auf einige Tausend Franken.

Schlussfolgerungen

Die hier aufgeführte Felsrutschung hat sich über lange Zeit mehrheitlich wenig aktiv verhalten. Von der (Re-)aktivierung bis zum Absturz dauerte es nur einige Monate. Typischerweise verlief die Bewegungsdynamik sehr sprunghaft und war schwer vorhersehbar. Sanierungsmassnahmen in der Rutschzone wären kaum realisierbar oder wenig erfolgversprechend gewesen. Deshalb konzentrierten sich die Gegenmassnahmen auf ein Schutzbauwerk und auf die Überwachung des Gefahrenpotenzials, welche eine rechtzeitige Evakuation der betroffenen Bevölkerung ermöglichte.

Literaturhinweise

Bearth P. 1978: Geologischer Atlas der Schweiz 1 : 25 000, Blatt 71, St. Niklaus. Schweizerische Geologische Kommission.

Brion J. 2002: Photogrammetrieaufnahme. PAT Photogrammetrie Aérienne et Terrestre SA, Sitten (unveröffentlicht).

Ladner F., Rovina H., Pointner E., Dräyer B., Sambeth U. 2004: Geologische Überwachung und Instrumentierung des Felssturzes Medji (St. Niklaus/Schweiz). Felsbau, Fachzeitschrift für Ingenieurgeologie, Geomechanik und Tunnelbau, 3/2004.

Marro Ch. 2000: Note au dossier 51415 Felswand Medji (Gemeinde St. Niklaus). Zentrum für Alpine Umweltforschung, Sitten.

Masset O. 2005: Modélisation géologique et hydrogéologique de l'instabilité de falaise de St. Niklaus, Valais, Suisse, GEOLEP.

MeteoSchweiz 2002: Tagesniederschläge.

Rouiller J.-D., Jaboyedoff M., Marro Ch., Philippossian F., Mamin M. 1998: Pentes instables dans le Pennique valaisan. Matterock: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. Schlussbericht NFP 31. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

Steck A., Epard J.-L., Marchant R. 1999: Carte tectonique des Alpes de Suisse occidentale et des régions avoisinantes 1: 100 000, Blatt 42 Oberwallis (Geologische Spezialkarte Nr. 123-NO). Landeshydrologie und -geologie, Bern.

A3 Rutschung Les Peillettes (VS): Beispiel einer lokalen Stabilisierung durch Drainage und Ableitung des Oberflächen- und Grundwassers

Gabriele Bianchetti



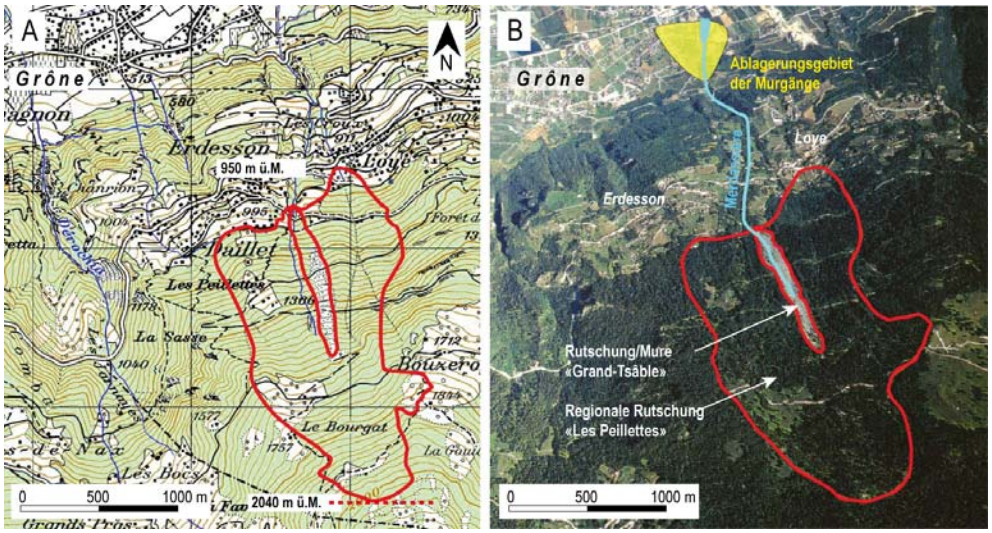
Allgemeine Lage, Problemstellung, Bauherrschaft

Die Rutschung Les Peillettes liegt oberhalb von Grône (VS) auf der linken Seite des Rhonetals (zentrale Koordinaten [Bohrloch FI19]: 602 866/120 326; Abb. 42A). Zwei Rutschungen sind zu unterscheiden: die langsame und tiefgründige von Les Peillettes und die seit 1977 sehr aktive von Le Grand Tsâble (Abb. 42B).

Les Peillettes
Höhenlage: zwischen 2050 und 950 m
Fläche: ~ 1,3 km²
Mächtigkeit der aktiven Zone: max. 80 m
Gesamtvolumen: ~ 50 Mio. m³

Le Grand Tsâble
Höhenlage: zwischen 1600 und 1000 m
Fläche: ~ 0,1 km²
Mächtigkeit der aktiven Zone: < 10 m
Gesamtvolumen: ~ 0,5 Mio. m³

Abb. 42 > A. Geografische Lage der Rutschung. B. Luftaufnahme der Rutschungen und Verlauf der Murgänge bis zum Talgrund (Situation 1999)



PK50 © swisstopo, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo BA091592]

Die Mächtigkeit der regionalen Rutschung Les Peillettes reicht von ca. 80 m im oberen (Bohrung FV12) zu ca. 50 m im mittleren (FV16; Abb. 43A) und weniger als 30 m im unteren Bereich der Rutschung (Abb. 42 und 43A). Die Rutschung Le Grand Tsâble tangiert den Wald und die Waldstrasse oberhalb der Maiensässzone Loye-Erdesson (Abb. 42B). Die Gefahr liegt in den Murgängen, welche im vegetationslosen Bereich ausbrechen und sich mit dem Bach Merdassière bis nach Grône hinunter ergiessen. 1995 waren Infrastrukturbauten der Gemeinde betroffen (Abb. 42B). Ausserdem bedrohen durch die mobilisierte Matrix frei gewordene Felsblöcke den oberen Teil der Maiensässzone. Zwischen 1996 und 2005 konnte die Gemeinde dank einem subventionierten Waldprojekt Studien durchführen und die nötigen Sanierungsarbeiten unter der

Leitung des Kantonsgeologen vornehmen. 1998 erhielt das Büro ALPGEO Sàrl in Siders den Auftrag für die geologische Untersuchung, die örtliche Leitung der Bohrarbeiten und das hydrogeologische Monitoring. Die Erstellung der Profilschnitte als Basis für die Planung der Bohrungen wurde Dr. sc. M. Sartori übertragen.

Charakterisierung der Rutschung

Geologie

Die regionale Rutschung Les Peillettes liegt in den Perm- und Triasformationen der Siviez-Mischabel-Decke. Der Felssockel besteht aus quarzreichem Serizitschiefer (im Folgenden Serizitschiefer) und klüftigen und kompetenteren Quarziten, welche den unteren Teil des Hangs ausbilden. Die Gleitmasse setzt sich aus mehr oder weniger zersetzten Felspaketen zusammen, die in einer lehmig-tonigen Grundmasse schwimmen und deren Grösse stetig abnimmt, je mehr man sich der Oberfläche nähert. Der Hang wird unterhalb einer Höhe von 1590 m zusehends steiler. Gleichzeitig findet in der Tiefe der Übergang des Serizitschiefers zu Quarziten statt und ist an der Oberfläche der aktivste Teil der Rutschung zu lokalisieren, nämlich derjenigen von Le Grand Tsâble. An dessen Fuss, in einem über 30° steilen Hang, nehmen die Muren ihren Anfang.

Hydrogeologie

Zwischen 1997 und 2002 wurden 16 vertikale Bohrungen oberhalb der Rutschung Le Grand Tsâble mit einer Gesamtlänge von 1430 m abgeteuft. Sie stiessen im Bereich der Gleitmasse einerseits auf wasserführende Schichten mit Zwischenraumporosität (AqSup), welche schwebend oder zuoberst im Felsuntergrund liegen, und andererseits im Serizitschiefer auf tiefe Kluftgrundwasserleiter (AqProf), in welchen gespannte Verhältnisse herrschen. Die darunter liegenden Quarzite sind geklüftet, aber immer trocken. In den geklüfteten Kompartimenten haben Pumpversuche hydraulische Verbindungen in einem Umkreis von 100 m um die Bohrungen FV12 und FV15-bis (Abb. 43A und B) aufgezeigt. Die Entwicklung der hydraulischen Potenziale ist praktisch nie durch die Niederschläge beeinflusst; einzig die Schneeschmelze trägt zu den Hochwasserständen bei (ausser im Herbst 2002). Die Grundwasserleiter liegen unterhalb von –10 und –32 m (AqSup) respektive unterhalb von –42 und –59 m (AqProf). Die jährlichen Schwankungen des Grundwasserspiegels sind abhängig von der Höhe der Schneedecke und können 14 m (AqSup) respektive 6 m (AqProf) erreichen (Abb. 45).

Bewegungen

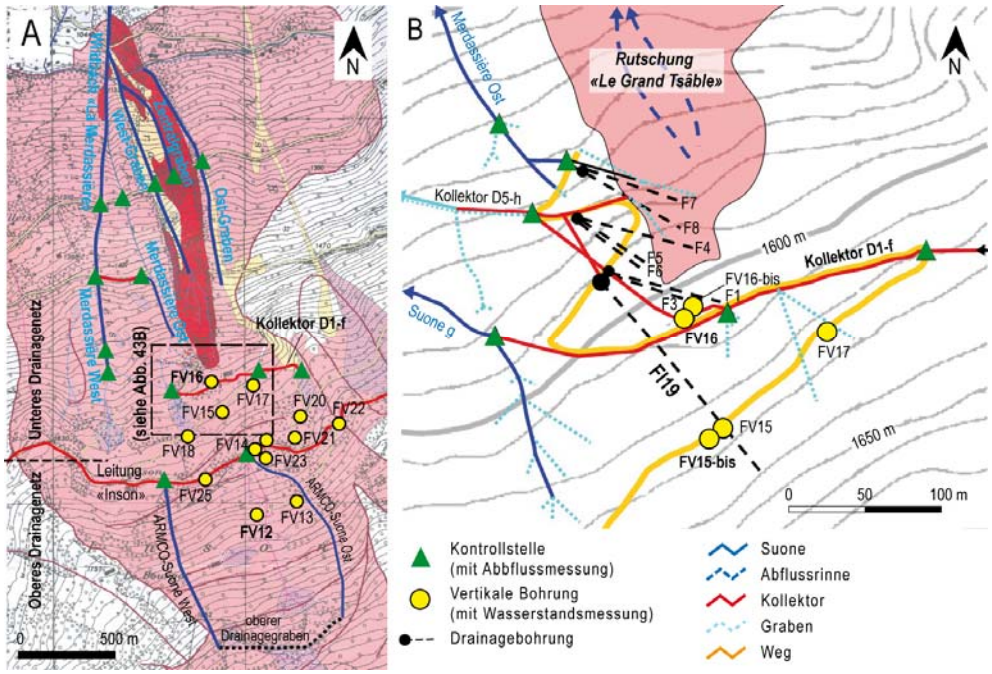
Von 1977 bis 1980 bewegte sich die Rutschung Le Grand Tsâble im Durchschnitt um 10 m/Jahr vorwärts, mit Spitzen von 0,3 m/Tag im Jahre 1981. In den Krisenzeiten von 1981–1983, 1986–1987 und 1993–1995 bewegte sich die Durchschnittsgeschwindigkeit um die 40 m/Jahr.

Chronologischer Ablauf der Untersuchungen und Sanierungsmassnahmen

Bereits ab 1977 wurde ein Drainage- und Ableitnetz für das Oberflächenwasser oberhalb der Rutschung Le Grand Tsâble eingerichtet. Trotzdem ging die Destabilisierung weiter und endete in der Krise von 1995, in deren Verlauf Muren mit einem Volumen von 25 000 m³ bis ins Dorf Grône vordrangen. Die starke Sättigung des oberflächennahen Erdreichs, bedingt durch die verspätete Schmelze einer mächtigen Schneeschicht, hatte die Schlammströme vom Mai bis Juni begünstigt. In der Folge lösten selbst

Niederschläge geringer Intensität (> 20 mm/Tag) die Entstehung von Muren aus. Zwischen 1994 und 1997 zielten 11 subhorizontale Drainagebohrungen (insgesamt 685 m, maximale Länge 80 m, davon ist ein Teil in Abb. 43B dargestellt) darauf ab, das Grundwasser in geringer Tiefe zu fassen (insgesamt 0,7 l/s bei Höchststand). Später stellte ALPGEO fest, dass dieses Wassers fast vollständig aus einem Leck der vergrabenen Zementröhre D1-f (Abb. 43B) stammte; ab 2002 wurde diese Leitung durch eine im Boden verlegte PE-Röhre ersetzt (Abb. 44). Seit 1997 konzentriert sich das Projekt auf die Suche nach einem tief liegenden Grundwasserleiter mit der Hypothese, dass ein solcher aktiv an der Wasserspeisung der Rutschung Le Grand Tsâble teilhaben muss. Die Idee war, diesen Grundwasserleiter mit tief gebohrten Drainageröhren zu entwässern. Zwischen 1997 und 2002 wurden 16 vertikale destruktive Sondierbohrungen, ausgerüstet mit metallischen Piezometern, ausgeführt (insgesamt 1429 m, maximale Tiefe 181 m). Eine Drainagebohrung mit einem Gefälle von 12° und einer Länge von 174 m machte es möglich, einen tief gelegenen Grundwasserleiter zu entwässern (FI19, vgl. Abb. 43B).

Abb. 43 > A. Situationsplan mit den zwei Drainagenetzen für das Oberflächenwasser (oberes Netz mit den Suonen ARMCO und unteres Netz mit den Suonen La Merdassière) sowie der Lage der Bohrungen. B. Situationsplan der Drainagen und Bohrungen oberhalb der Rutschung von Le Grand Tsâble



topografische Grundlagen: Übersichtsplan © 2000 Kanton Wallis

Untiefe Drainagen, Fassen und Ableiten des Wassers

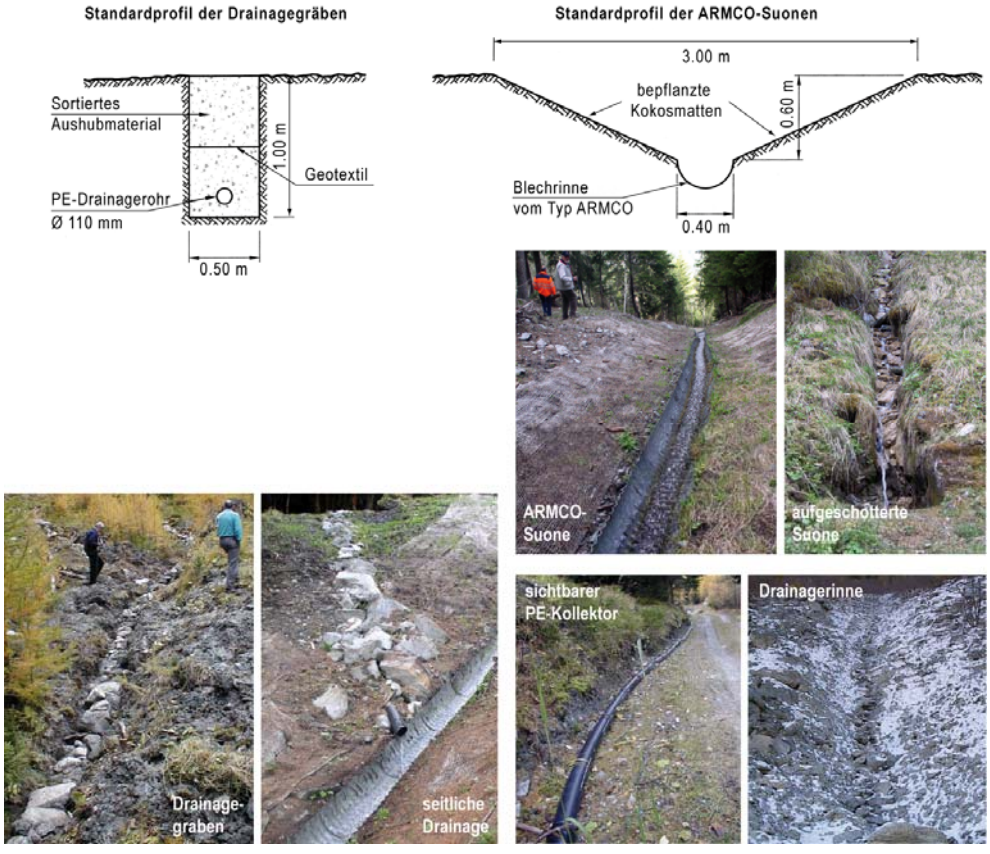
Zwei Drainagenetze in zwei verschiedenen Höhenlagen fassen und leiten das Oberflächen- und Grundwasser aus den instabilen Zonen ab (Abb. 43A). Das Wasser des unteren Netzes (oberhalb des Couloirs Le Grand Tsâble; Abb. 43B) wird durch zwei

traditionellerweise Suonen genannte Gräben (Merdassière West und Ost), die parallel zur aktiven Rutschung talwärts führen, in den Bach La Merdassière abgeleitet. Das Volumen kann bei Höchststand insgesamt 43 l/s erreichen, während es im Jahresdurchschnitt bei 7 l/s liegt. Im Couloir Le Grand Tsâble entwässern offene Gräben das oberflächennahe Erdreich und leiten das Schmelzwasser und die Frühlingsniederschläge in Hangrichtung ab. Das Volumen kann im Höchststand 9 l/s erreichen, während es im Jahresdurchschnitt 0,4 l/s nicht übersteigt.

Wirksamkeit des Sanierungssystems

Seit 2001 konnte durch die Wiederherstellung der Vorfluter (inklusive Leitung D1-f) die neuen Drainagen und die Abdichtung der Suone La Merdassière Ost (Abb. 44) die Menge des aus der Rutschung Le Grand Tsâble abgeleiteten Wassers erhöht werden (1 l/s zusätzlich im Jahresdurchschnitt). Seit 2002 entwässert die 174 m lange Schrägbohrung FI19 den tief gelegenen Grundwasserleiter (AqProf) im Serizitschiefer mit einer mittleren Jahresschüttung von 0,2 l/s. Dank dieser Bohrung war es möglich, den Grundwasserstand des tief gelegenen Grundwasserleiters um 8 m zu senken (Abb. 45, Bohrung FV15). Dennoch: Der Hauptbeitrag zur Sanierung des Geländes wurde durch das Fassen und Ableiten des Oberflächenwassers erreicht (Abb. 44).

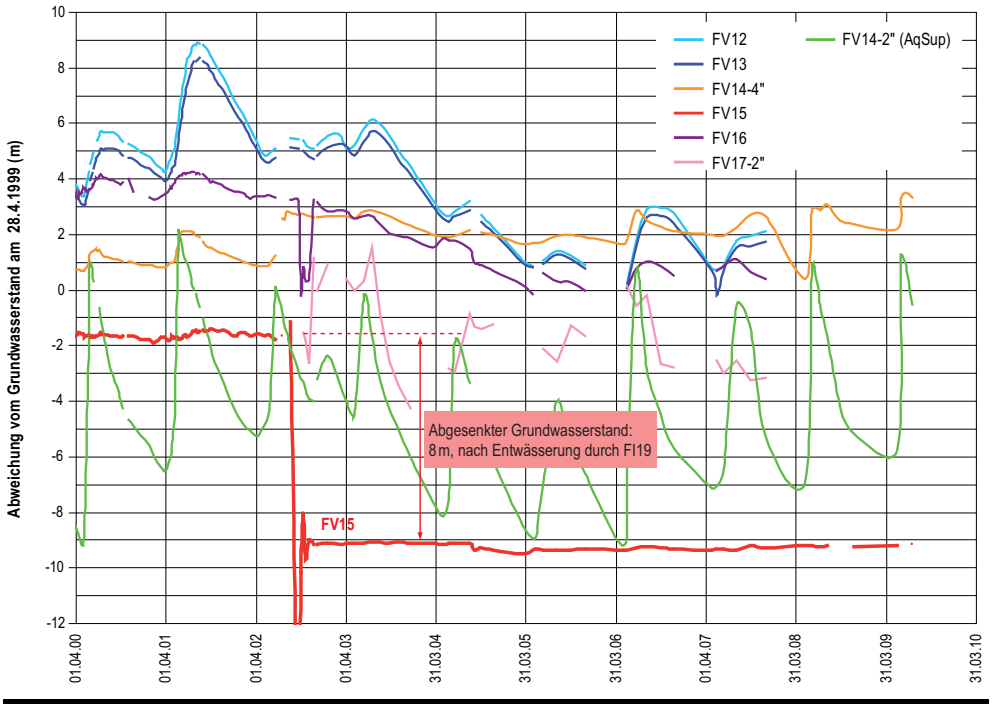
Abb. 44 > Sanierung der Suone La Merdassière Ost (2004): Detail der Massnahmen, die getroffen wurden, um die Sohle der Suone abzudichten und die feuchten instabilen Bereiche zu entwässern



Die Erfahrung hat gezeigt, dass diese Absenkung wenn nötig noch künstlich durch Druckluft in der Bohrung FV15-bis ergänzt werden kann. Dadurch wird das Wasser durch Überdruck verdrängt und durch die Bohrung FI19 mit einer Abflussmenge von ungefähr 6 l/s abgeleitet. Nur wenn sich aussergewöhnliche Wetterverhältnisse, wie sie zwischen 1993 und 1995 geherrscht haben, wiederholen, wird sich zeigen, wie wirksam die mit dem Waldprojekt umgesetzten Sanierungsmassnahmen sind und ob sie die Murenbildung im Bach La Merdassière wirklich verhindern können. Auch müssen, um die vollständige Sicherheit des Dorfes Grône zu garantieren, die Massnahmen möglichst rasch durch die Verbauung des Bachbetts ergänzt werden.

Abb. 45 > Einfluss der Entwässerung durch die Bohrung FI19 auf den Stand des tief gelegenen Grundwasserleiters (AqProf)

Die Daten für die Bohrung FV14–2" (oberer Grundwasserleiter AqSup) sind zu Vergleichszwecken abgebildet.



Bau- und Betriebskosten

Die Kosten des Forstprojekts belaufen sich auf 2 830 000 Franken, aufgeteilt in 980 000 Franken für die Tiefensanierung (alle Bohrungen, Drainagebohrungen, Pumpen und In-situ-Tests), 980 000 Franken für die Oberflächensanierung und den Bau eines Damms unterhalb der Rutschung und 870 000 Franken für die Studienkosten, die geophysikalischen Untersuchungen, das hydrogeologische Monitoring und das Projektmanagement. Die Kosten pro Laufmeter Bohrung (ausgerüstet) steigen auf rund 400 Franken (Schlagbohrung). Die Betriebskosten, berechnet als Jahresdurchschnitt über drei Jahre, enthalten den Unterhalt der Bauten (Pauschalsumme von 50 000 Fran-

ken mit Vortrag auf das nächste Jahr, wenn keine Ausgaben anfallen) und das hydrogeologische Monitoring mit Unterhalt der Datenlogger (11 500 Franken).

Bilanz der Sanierung

Seit den Muren von 1999, die von der Wetterlage begünstigt waren, konnte man eine langsame Wiederbewachsung des Couloirs Le Grand Tsâble beobachten, die sich seit 2001 dank der Sanierung der Drainagen und Vorfluter oberhalb der aktiven Rutschung verstärkt hat. Die Pioniervegetation leistet einen aktiven Beitrag zur Stabilisierung des oberflächennahen Erdreichs. 2006 verblieben nur einige kleine Bereiche unbewachsen und durchnässt. Seit 2000 ist kein grösserer Schlammstrom mehr beobachtet worden, und über den Anrissnischen der Rutschung Le Grand Tsâble entstanden keine bergseitige Erweiterungen.

Im November 2006 wurde die Rutschung Grand Tsâble jedoch als Folge einer illegalen Verbreiterung des den Hang auf 1280 m Höhe traversierenden Wanderweges reaktiviert. Der Hanganschnitt hat den oberflächennahen Untergrund bis in einige Meter Tiefe destabilisiert. Ab Mai 2008 wurden kumulative Verschiebungen in der Grössenordnung von 8 m innert weniger Wochen beobachtet. Dieses Phänomen akzentuierte sich im Mai 2009 als Folge ungünstiger meteorologischer Bedingungen (späte Schneedecke mit raschem Abschmelzen in der zweiten April-Hälfte). Die kumulierten Verschiebungen erreichten 30 m innert 20 Tagen, und die Vegetationsbedeckung wurde auf einer Fläche von 2 Hektaren zerstört. Die Rutschung ist oberflächlich geblieben, ohne dass grössere Schlammströme oder Murgänge entstanden wären. Die Sanierungsarbeiten zur Verlangsamung des Phänomens (Blocksprengungen, Graben einer Drainagerinne, Baggerarbeiten im Bachbett der Merdassière) wurden im Herbst 2009 durchgeführt.

Literaturhinweise

ALPGEO 2004: Glissement des Peillettes et du Grand Tsâble – Réactualisation des scénarios de laves torrentielles du torrent de la Merdassière. Rapport pour l'Etat du Valais, DTEE – SRCE – SFP – Géologue cantonal. September 2004, 20 S., 15 Anhänge und 1 Fotodossier (unveröffentlicht).

ALPGEO 2006: Glissement des Peillettes, projet de défense N° 431-VS9032 – Campagne de forages (2002), assainissement des drainages (2001–2004) et suivi hydrogéologique (1998–2005). Rapport final pour l'Etat du Valais, DTEE – SRCE – SFP – Géologue cantonal. April 2006, 41 S., 14 Anhänge und 1 Fotodossier (unveröffentlicht).

CREALP 1999: Glissement des Peillettes – Campagne de forages profonds (1997–98). Zentrum für Alpine Umweltforschung, Sitten, Bericht 99.04, Februar 1999 (unveröffentlicht).

CREALP 2000: Glissement des Peillettes – Rapport géologique et hydrogéologique N° 2 – Investigations hydrogéologiques en 1999. Zentrum für Alpine Umweltforschung, Sitten, Bericht 00/05, Juni 2000, 22 S. und 55 Anhänge (unveröffentlicht).

A4 Spontanrutschung und Hangmure Binu, Hohtenn (VS): Beispiel einer Stabilisierung durch Quellfassungen mit Drainage in geringer Tiefe

Hermann Rovina



Allgemeine Lage, Problemstellung, Bauherrschaft

Bezeichnung/Lokalität:	Rutschung und Hangmure Binu, Gemeinde Hohtenn, Oberwallis
Koordinaten:	625 095/129 905
Höhenlage:	937 m (Auslauf: 630 m)
Betroffene Oberfläche:	abgerutschte Kernzone ca. 3000 m²
Maximaler Tiefgang:	5 bis 7 m
Volumen:	abgerutschte Kernzone ca. 5000 m³

Entlang einer Zufahrtsstrasse zwischen dem Dorf Hohtenn (VS) und dem Bahnhof Hohtenn (Lötschberg Südrampe) bzw. dem Weiler Binu ereignete sich am 18.08.2003 um 6.40 Uhr eine Spontanrutschung, die sich im steilen Gelände zu einer Hangmure entwickelte (Prozesswechsel). Die Strasseninfrastruktur wurde auf einer Länge von ca. 40 m zerstört; Menschen wurden nicht betroffen. Für die Benutzer einer tiefer gelegenen Strasse und für die Arbeiter eines im Talgrund gelegenen Steinbruchs bestand ein Personenrisiko.

Als Bauherr für die Sanierungsarbeiten zeichnete die Gemeinde Hohtenn mit der Unterstützung der Dienststelle für Wald und Landschaft des Kantons Wallis bzw. das zuständige Kreisforstamt.

Die Projektierung und die Bauleitung der Sanierungsmassnahmen wurden von Ingenieurbüros Zumofen und Glenz AG, Steg, und Fux Werner, Naters wahrgenommen. Zur Naturgefahrenbeurteilung und zur Ursachenabklärung wurde das Geologiebüro Rovina + Partner AG, Varen, beigezogen.

Randbedingungen und Charakterisierung der Rutschung

Dynamik und Geometrie

Die Rutschung lief als plötzliches, spontanes Ereignis ab. Dabei wurde ein Lockergesteinskörper auf einer Breite von 30 bis 40 m mit einem Tiefgang von maximal etwa 7 m mobilisiert. Im Anrissbereich wurde eine Strasse mit berg- und talseitiger Stützmauer auf einer Breite von ca. 30 m mitgerissen (Abb. 46). Ein grosser Anteil der Rutschmasse kam aufgrund der steilen Hangneigung nicht zum Stillstand sondern entwickelte sich in der Folge zu einer Hangmure. Im Transitbereich der Hangmure wurde eine offen geführte Wässerwasserleitung («Suone») zerstört und eine unterhalb verlaufende Strasse verschüttet. Es bildete sich ein Schuttkegel von 30 bis 40 m Breite und ca. 200 m Länge. Aus dem umgelagerten Material entstand auch ein erheblicher Stein- und Blockschlag.

Abb. 46 > Anrisszone der Spontanrutschung Binu

Gut sichtbar sind die abgerutschten Stützmauerelemente; der Ort der Wasseraustritte liegt unten rechts im Bild.



Geologie

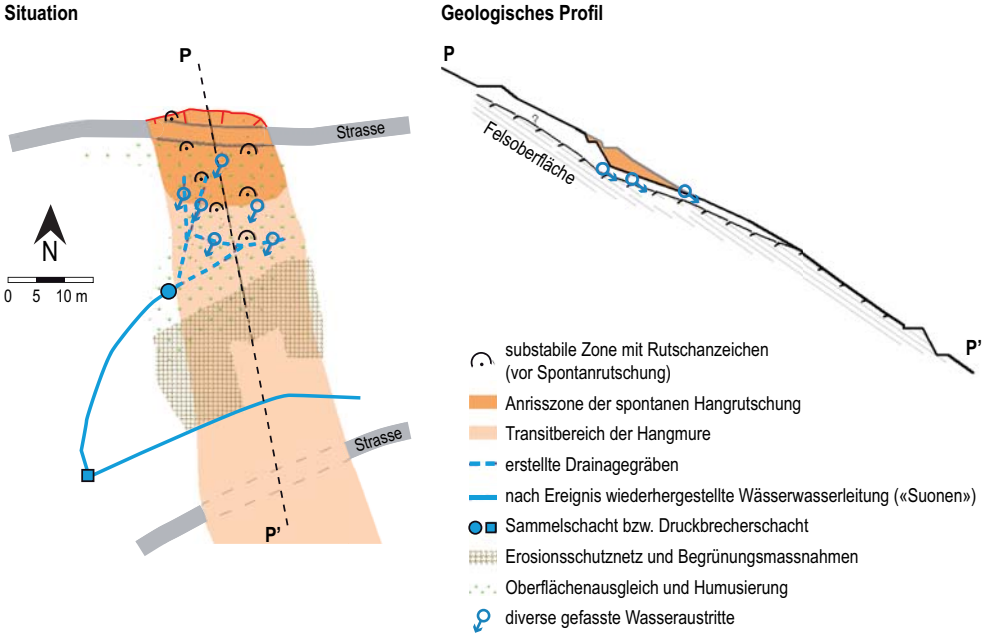
Der Rutschungsanriss unmittelbar oberhalb einer Gemeindestrasse wurde durch eine rückwärtige Ablösefläche von ca. 65 bis 70° gebildet. Eine basale Gleitfläche verlief leicht flacher als das generelle Hangfallen von etwa 30 bis 35° und keilte nach etwa 30 m gegen die Terrainoberfläche aus (Abb. 47). Die Felskote lag im Bereich des Rutschkörpers vermutlich auf einer Tiefe über 10 m, musste aber wahrscheinlich in Talrichtung seichter verlaufen, da der Fels etwa ab 50 m unterhalb der Anrissnische an die Oberfläche trat (Abb. 47). Über vergangene Rutschanzeichen liegen keine Angaben vor. Die Geländemorphologie lässt jedoch vermuten, dass sich der Hang seit Längerem in einem substabilen Gleichgewicht mit leichten talwärtigen Bewegungen befand. Auch waren an mehreren Stellen temporäre Quellen und Vernässungsstellen bekannt.

Die Rutschmasse bestand hauptsächlich aus Moräne und zu Gehängeschutt umgelagerter/aufgearbeiteter Moräne. Das Lockergestein war im trockenen Zustand standfest. Geotechnisch handelte es sich um einen stark siltigen Kies mit vielen Steinen und Blöcken. Festgesteinsunterlage bildeten Kalke und Mergel des Doggers und Malm der autochtonen mesozoischen Bedeckung des Aar-Massivs. Das plattige Festgestein fällt im «dip slope» zum Tal ab und bildet somit eine ausgezeichnete basale Gleitfläche.

Hydrogeologie

Das Moränenmaterial weist generell eine geringe Wasserdurchlässigkeit auf. Der anstehende Fels ist schwach verkarstet. Diverse unbedeutende Quellaustritte aus der Übergangszone Lockergestein/Fels waren bekannt und verursachten ausschliesslich lokale Vernässungen.

Abb. 47 > Situationsplan und geologisches Profil der Rutschung Binu



Auslösefaktor

Der August 2003 war der bisher heisseste Monat seit dem Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1753. Ab Mitte August kam es im hydrogeologischen Einzugsgebiet der Wasseraustritte in «Binu» zu mehreren heftigen, sehr lokalen Gewittern. Zwischen dem Anspringen der Karstquellen und einer Niederschlagsperiode wenige Tage vor dem Rutschereignis besteht ein Zusammenhang (Tab. 5).

Tab. 5 > Niederschlagssummen [mm] der letzten 5/3/1 Tage vor der Rutschung vom 18. August 2003

MeteoSchweiz-Station	Distanz [km]	5 Tage	3 Tage	1 Tag
Ried (Lötschental)	ca. 11	53,5	24,7	11,0
Leukerbad	ca. 12	60,0	43,5	23,0

Die Rutschung wurde durch eine massive Schüttungszunahme einer bis anhin unbedeutenden Karstquelle ausgelöst, welche vor dem Abgleiten zu einer nahezu vollständigen Sättigung der Lockergesteine führte. Der Wasserausfluss unmittelbar nach dem Ereignis konnte zwar nicht gemessen werden. 12 Stunden nach dem Ereignis betrug er immer noch ca. 20 l/s, und in den folgenden Tagen ging er auf einen Basisabfluss von ca. 1 l/s zurück. Heute beträgt die Quellschüttung zwischen 0 bis ca. 3 l/s.

Sanierung

Im Anschluss an das Ereignis wurde sofort die Sanierung in Angriff genommen mit den Zielen: Wiederherstellung des Strassenabschnittes, Wiederherstellung und Befestigung der Geländeoberfläche, Stabilisierung der Rutschung und Vermeidung von künftigen Hangdeformationen sowie Neuerstellung des zerstörten Wässerwasserkanals. Folgende Massnahmen wurden realisiert:

> Zur Querung der unmittelbaren, rutschgefährdeten Zone wurde eine leichte Brückenkonstruktion gewählt. Gegenüber einem massiven talseitigen Stützmauerverbau entstand dadurch eine gewisse Entlastung des Untergrundes. Die bergseitige Böschung wurde mittels Spritzbeton gesichert und mit einem engen Raster aus Drainagebohrungen entwässert (Abb. 48). Davor wurde ein Gabbionenverbau errichtet.

Abb. 48 > Anrisszone beim Bau der rückwärtigen Nagelwand und des oberen Brückenwiderlagers (Mitte)



> Zur Wiederherstellung des Geländes unterhalb der Strasse fand ein Eintrag und Ausgleich der Lockergesteinsbedeckung mit anschliessender Humusierung statt. In steilen Partien kam zusätzlich ein Geo-Raumgitter als Oberflächenerosionsschutz zum Einsatz. Das Geogitter wurde mit Kurznägeln rückverankert (Abb. 47 und Abb. 49).

Abb. 49 > Wiederhergestellter relativ steiler Böschungsbereich mit einem vernagelten Geo-Raumgitter als Oberflächenerosionsschutz



- Als Entwässerungsmassnahme wurden einerseits die Karstwasseraustritte so gut wie möglich punktuell gefasst. Andererseits wurden Drainagegräben mittels Sickerkies und geschlitzten PVC-Rohren erstellt. Das Hangwasser wird in einen Sammelschacht geleitet und kann für die lokale Berieselung zur Begrünungsunterstützung verwendet werden oder wird als Überlauf an die nahe Wässerwasserleitung abgegeben.
- Die durch die Hangmure zerstörte Wässerwasserleitung wurde auf einer Länge von ca. 45 m neu erstellt. Zum Schutz gegen Steinschlag aus der aufgelockerten Böschung wurde ein leichtes Steinschlagschutznetz errichtet.

Kosten und Kostenwirksamkeit

Die Kosten für das Sanierungspaket (inkl. Studien, Projektierung und Bauleitung) können wie folgt zusammengefasst werden (Tab. 6):

Tab. 6 > Kosten der Sanierungsmassnahmen

	CHF
Strassensanierung (Brücke, Quellfassung, Hangsicherung und diverse Anpassungen)	650 000
Geländeherstellung, Geogitter, Begrünung, Drainage und Steinschlagschutznetze sowie Wiederherstellung Wässerwasserleitung	130 000
Total	780 000

Die Massnahmen haben sich bisher als effizient erwiesen. Der Hang ist stabilisiert. Die Anlagen kommen mit einem minimalen Unterhalt aus, der sich auf eine Prüfung der Funktionstüchtigkeit und allfällige Reinigungs-/Aufräumarbeiten beschränkt. Die Aufwendungen können im Rahmen des ordentlichen Strassenunterhalts geregelt werden. Ohne die getroffenen Massnahmen hätten der Betrieb der Verbindungsstrasse sowie der Zugang zu einem Trinkwasserreservoir nicht mehr aufrechterhalten werden können.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann von einer kleinräumigen, flachgründigen, substabilen Rutschung mit einer einzelnen, ausgeprägten Reaktivierungsphase gesprochen werden. Austretendes Karstwasser im Anschluss an starke Niederschläge führte offenbar zu einem bedeutenden Aufstau am Kontakt zwischen Lockergestein und Felsoberfläche und wirkte als Auslöser der Spontanrutschung. Das Rutschgebiet reagierte sehr plötzlich und sensibel auf Wasserzutritte. Ein durchgehender Geländebruch war die Folge. Begünstigt durch den hohen Wassersättigungsgrad des Lockergesteins und die steile Hangneigung entwickelte sich daraus eine Hangmure.

Kleinräumige Gefahrenpotenziale wie das oben beschriebene sind sehr verbreitet. Die Eintretenswahrscheinlichkeit für eine (Re-)Aktivierung ist zwar oft gering, im Falle einer Aktivierung können die Prozesse jedoch sehr rasch und brutal ablaufen. Dementsprechend schwierig erweist sich das Erkennen dieser Bereiche.

Zur Behandlung von derartigen Gefahrenherden haben sich beispielsweise folgende einfache, summarische Massnahmen als erfolgversprechend erwiesen: Erfassung der Gefahrenpotenziale in einem Kataster im Rahmen der Gefahrenkartierung, qualitative Abschätzung des Schadenpotenzials vor Ort, evtl. periodische Kontrollgänge sowie Planung von Massnahmen für kritische Konfigurationen (Starkniederschläge, Schneeschmelze) wie z. B. Sperrung, Überwachung, Evakuation usw.

Literaturhinweise

Ing. Büro Fux Werner, Naters 2004: Strassenprojektierung, Hangsicherung, Quellfassungen, Projektierung und Bauleitung (unveröffentlicht).

Ing. Büro Zumofen und Glenz AG, Steg 2003: Vorstudie Wiederinstandstellungs- und Verbauungsprojekt «Binu», Gemeinde Hohtenn, Kanton Wallis, Dienststellen für Wald und Landschaft, Kreis II (unveröffentlicht).

MeteoSchweiz 2003: Tägliche Niederschlagssummen.

Rovina + Partner, Büro für Ing. Geologie, Varen 2003: Hangmure Gemeindestrasse Tunnel Mittal Nordportal – Binu (Gemeinde Hohtenn, VS), Ereignisbeschreibung / geologisch-hydrogeologischer Kurzbericht (unveröffentlicht).

A5 Rutschung Walkere, St. Stephan (BE): Beispiel einer Stabilisierung durch Drainagegräben

Ueli Gruner

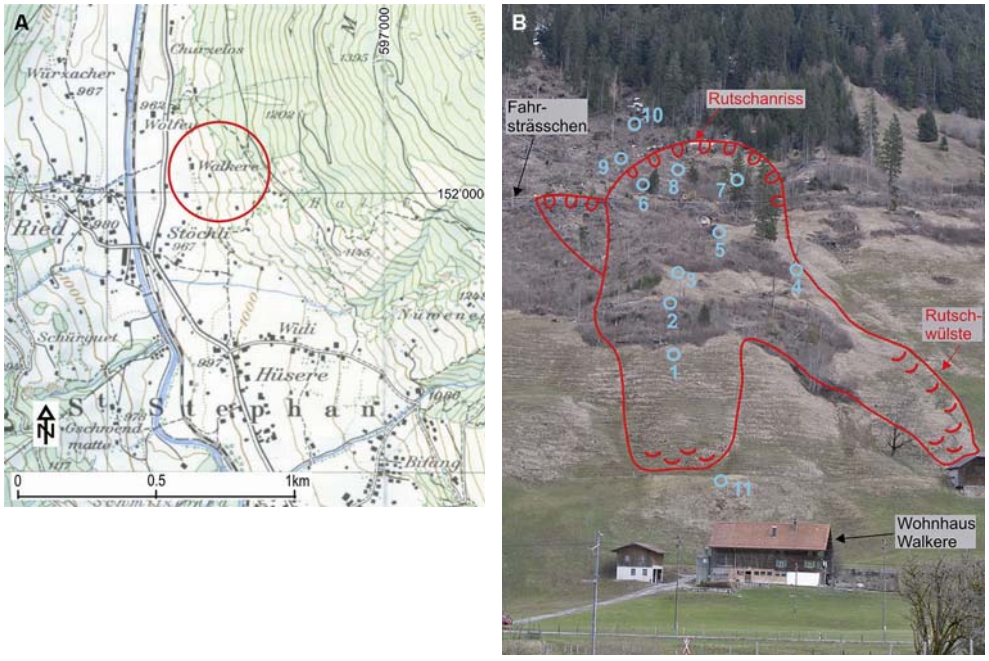


Allgemeine Lage, Problematik, Bauherrschaft

Bezeichnung/Lokalität:	Rutschung Walkere, Gemeinde St. Stephan (BE), ca. 500 m östlich des Weilers Ried (Abb. 50A)
Koordinaten:	596 500/152 150
Höhenlage:	1000 bis 1130 m ü. M.
Rutschfläche:	ca. 15 000 m²
Tiefe der Gleitfläche:	ca. 4 bis 6 m im oberen Teil, ca. 1 bis 4 m im unteren Bereich
Rutschvolumen:	ca. 50 000 m³

Ende März 2006 bewegte sich eine Rutschmasse von rund 50 000 m³ an einem steilen Hang (ca. 25 bis 30°) talwärts, beschädigte massiv ein Fahrsträsschen und bedrohte das Wohnhaus Walkere am Fuss der Rutschung (Abb. 50B und Abb. 51). Aufgrund der starken Beschleunigung der Bewegungen, welche teilweise bis gegen 3 cm/h betrugen, wurde das Haus evakuiert.

Abb. 50 > A. Allgemeine Situation. B. Übersichtsfoto mit Umgrenzung der Rutschung und Lage sowie Nummer der Reflektoren (blaue Kreise)



PK25 © swisstopo, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo [BA091592]

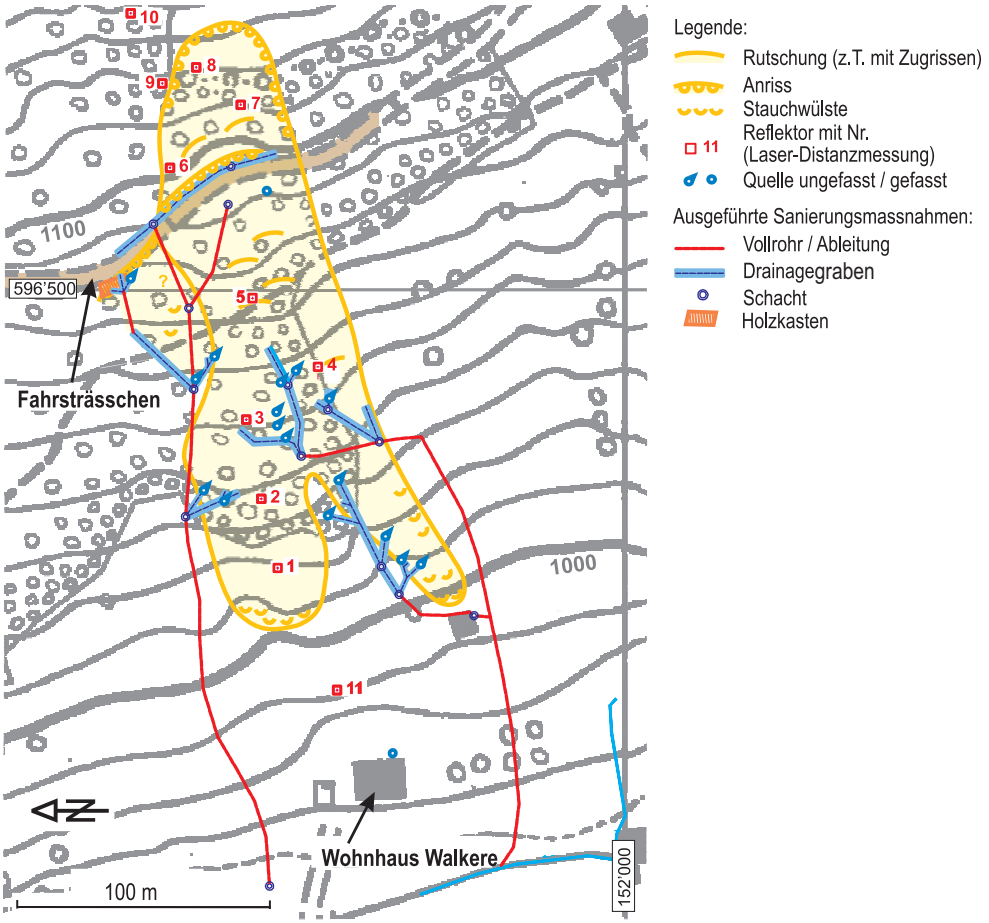
Die Gemeinde St. Stephan beauftragte das Geologiebüro Kellerhals + Haefeli AG (Bern), Sofortmassnahmen zur Eindämmung der akuten Rutschgefahr auszuarbeiten und im Rahmen eines forstlichen Vorprojekts definitive Sanierungsmassnahmen zu projektieren und auszuführen.

Charakterisierung der Rutschung

Geologie

Der Untergrund der Rutschung besteht aus Gips, Rauwacke und Dolomit der Trias der penninischen Klippen-Decke (Rabowsky 1912). Diese Zone zieht vom Talboden des Simmentals aus nach Nordosten in Richtung Spillgerten/Diemtigtal. Die Triasgesteine sind im Rutschgebiet durch einen unterschiedlich mächtigen Gehänge- und Verwitterungsschutt mit Blöcken aus Gips und Dolomit überdeckt.

Abb. 51 > Geologische Situation mit ausgeführten Sanierungsmassnahmen



kartographische Grundlage: digitaler Übersichtsplan UP5 © Amt für Geoinformation des Kantons Bern

Hydrogeologie

Der Gips ist generell stark verkarstet, was durch verschiedene unterirdische Wasserläufe und Quellaustritte im weiteren Untersuchungsgebiet dokumentiert wird. Dies und das relativ weiche und verwitterungsanfällige Untergrundgestein führten dazu, dass vielerorts kleinere Rutschungsphänomene im Gelände der Umgebung zu beobachten sind. Ungünstig für die Hangstabilität an diesem Standort war der Umstand, dass der Wald im mittleren Bereich der Rutschung durch den Lotharsturm (1999) weitgehend zerstört wurde.

Rutschauslösung und Bewegungen

Ende März 2006 setzte eine starke Schneeschmelze ein, welche die überdurchschnittlich hohe Schneemenge auch auf Höhen von gegen 2000 m ü. M. rasch und intensiv zum Schmelzen brachte (z. B. am 26./27. März; vgl. Abb. 52). Die am 26. März 2006 erstmals festgestellten Risse sowie die verbreitet vernässten Stellen im Rutschgebiet zeigen, dass das Einzugsgebiet der unterirdischen Gipskarstquellen u. a. in hochgelegenen, abflusslosen Talkesseln der Triaszone im Nordosten des Rutschereignisses liegen dürfte. Intensive Niederschläge am 28. und 30. März 2006 (je ca. 30 mm; vgl. Abb. 52) führten zu erhöhten Bewegungen im Gelände, was sich in Form von neuen Anrissen, Zug- und Längsrissen sowie Stauchwülsten manifestierte (vgl. Abb. 51). Ab dem 29. März 2006 wurde das Rutschgelände zweimal täglich mittels Laser-Distanzmessung vom Talboden aus überwacht. Da sich der Rutschhang immer schneller talwärts bewegte – im mittleren Bereich mit einer Geschwindigkeit von bis zu 27 mm/h (vgl. Abb. 52) – wurde das Haus Walkere am 31. März 2006 evakuiert.

Sanierung: Sofortmassnahmen und langfristige Massnahmen

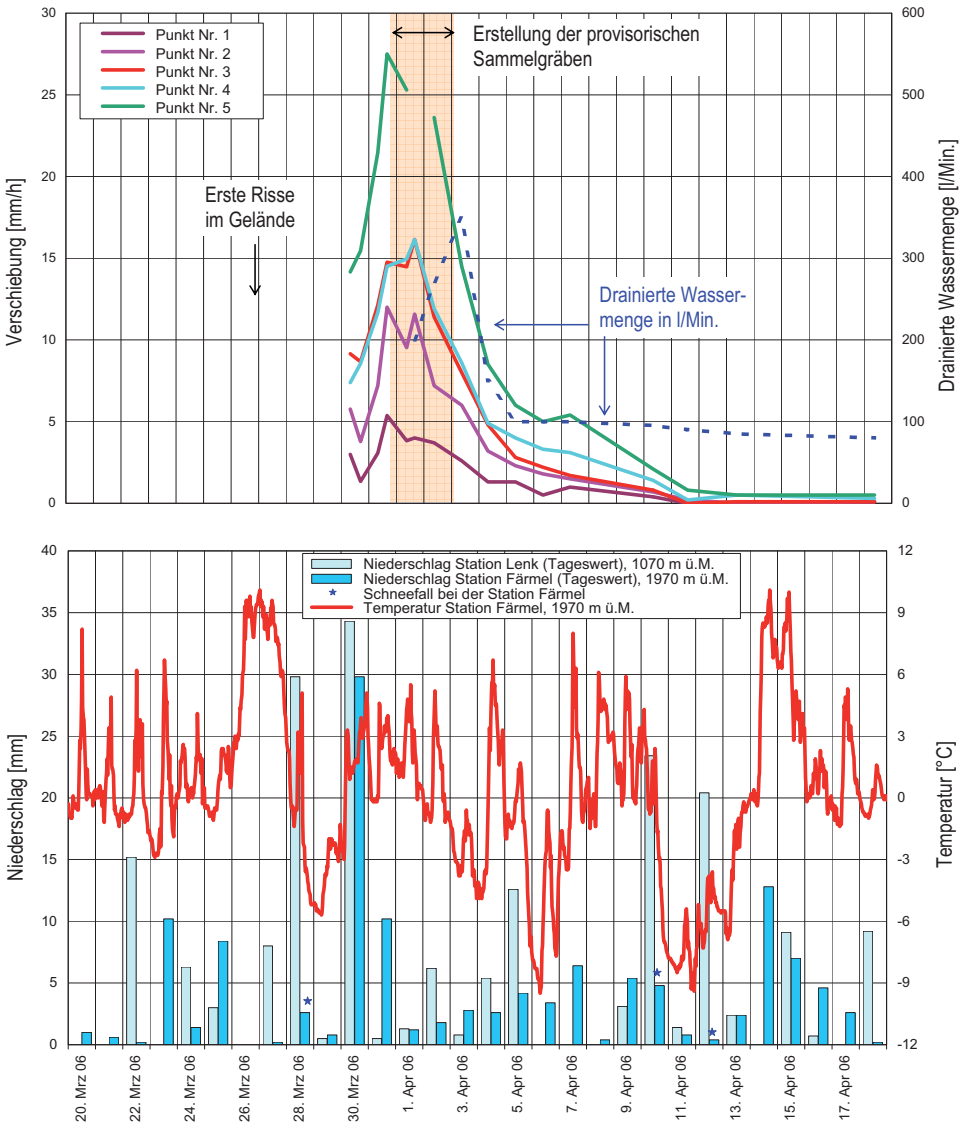
Sofortmassnahmen

Aufgrund der sich bedrohlich beschleunigenden Geschwindigkeiten wurde am 31. März 2006 beschlossen, mittels einer grösseren Anzahl von offenen Sammelgräben den Hangwasserspiegel zu senken. Am 1. und 2. April wurden insgesamt rund 250 m unterschiedlich lange und tiefe Gräben meist in der Falllinie ausgehoben (Abb. 53). Nachdem am 2. April bereits rund 200 l/Min. aus dem Rutschgebiet gefasst und abgeleitet werden konnten, lag die drainierte Wassermenge am 3. April bei rund 350 l/Min! In der Folge gingen die Rutschbewegungen rasch und markant zurück (Abb. 52). Ab dem 5. April stabilisierte sich die drainierte Wassermenge bei rund 100 l/Min; die Geschwindigkeit der Bewegungen nahm in den folgenden Tagen trotz gelegentlichen Niederschlägen noch weiter deutlich ab (Abb. 52).

Langfristige Massnahmen

Ende April 2006 wurde beschlossen, als langfristige Sanierungsmassnahme die bestehenden offenen Sammelgräben zu Drainagegräben umzufunktionieren und, wo nötig, weitere Quellaustritte in das Entwässerungssystem einzuleiten. Insgesamt wurden rund 420 m Drainagegräben mit 13 Kontrollschächten erstellt. In die Gräben wurde ein PE-Sickerrohr Ø 100 mm eingelegt und darüber Filterkies (Ø 30/50 mm) in einer Mächtigkeit von ca. 0,5 bis 0,7 m eingebracht (Abb. 53). Der Filterkies wurde mit einer Geotextilmatte abgedeckt und der Graben mit groben Anteilen des Aushubmaterials wieder aufgefüllt. Bei tieferen Gräben wurden lokale Sickerverbindungen bis zur Terrainoberfläche gezogen. Zur Sicherung des Fahrsträsschens wurde angesichts seiner untergeordneten Bedeutung auf eine kostenaufwendige Vernagelung verzichtet und stattdessen bergseitig eine Drainageleitung und talseits ein Holzkasten zur Stabilisierung der Böschung erstellt.

Abb. 52 > Ganglinien der Bewegungsgeschwindigkeiten (oben) und Meteodaten (unten)



Station Lenk: Daten MeteoSchweiz; Station Färmel: Daten SLF/IMIS

Wirksamkeit der Sanierung

Bereits die sofort eingeleiteten, provisorischen Entwässerungsmassnahmen erwiesen sich als äusserst wirksam. Die verbesserten und auch umfassenderen Drainagegräben werden diese Wirksamkeit erhöhen und auch langfristig beibehalten. Auch wenn an der Basis örtlich nach wie vor ein hoher Porenwasserdruck aufgebaut werden kann, so wird infolge der starken Reduktion des Strömungsdruckes sowie der Erhöhung des Auftriebswiderstandes die Stabilität des Hanges massgeblich verbessert.

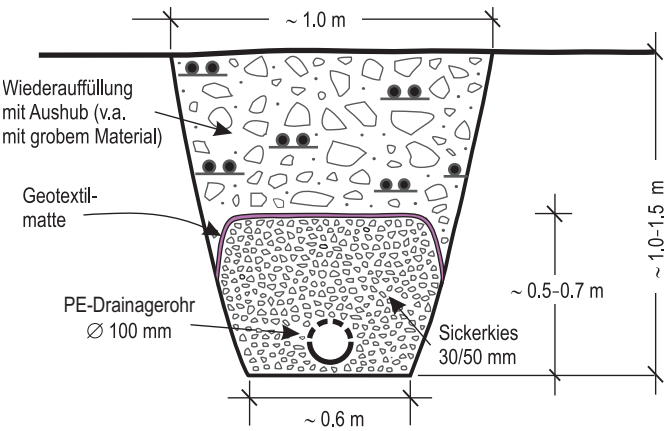
Abb. 53 > Drainagemassnahmen: Offene Sammelgräben und Drainagegräben

A



Erstellung eines offenen Sammelgrabens als Sofortmassnahme (links); Umfunktionierung zu einem Drainagegraben mit Zwischenschacht (rechts).

B



Prinzipskizze eines Drainagegrabens.

C



Erstellung von Drainagegräben im weichen Rutschmaterial: Stabilisierung mit Holzstämmen und Einlegung von PE-Drainage-rohren (links); nach Eindeckung mit Sickerkies (rechts).

Kosten

Die Kosten für die Sanierung beliefen sich auf rund 160 000 Franken. Darin eingeschlossen sind die provisorischen Massnahmen, die Aufwendungen für die messtechnische Überwachung sowie die geologische Begleitung der Arbeiten. Der Unterhalt führt nur zu geringen Kosten, da in der Regel eine regelmässige Überprüfung der Funktion der Drainagegräben genügt.

Schlussfolgerungen

Die geologische Zustandsanalyse zu Beginn der Rutschbewegungen zeigte, dass die Rutschung in erster Linie durch ausserordentlich starke, unterirdische Wasseraustritte aus dem Gipskarst ausgelöst wurde. Die Sanierungsmassnahmen konzentrierten sich deshalb auf eine rasche und zielgerichtete Entwässerung des ganzen Hanges, wobei damit in erster Linie der Strömungsdruck massiv reduziert und der Auftriebswiderstand erhöht werden konnte. Die Wirksamkeit der Entwässerungsmassnahmen konnte dank der messtechnischen Überwachung des Rutschhanges ständig überprüft werden.

Literaturhinweise

Kellerhals + Haefeli AG 2006: Sanierung Rutschung Walkere. Vorprojekt. Technischer Bericht. Bericht Nr. 5705 vom 02.06.2006 (unveröffentlicht).

MeteoSchweiz 2002: Tagesniederschläge.

Rabowsky F. 1912: Simmenthal und Diemtigtal. Geologische Spezialkarte Nr. 69. Schweizerische Geologische Kommission.

SLF 2006: Schneedaten, Station Färmel.

A6 Rutschung Montagnon (VS): Beispiel einer Stabilisierung durch gravitative Entwässerung mit tiefen Drainagebohrungen

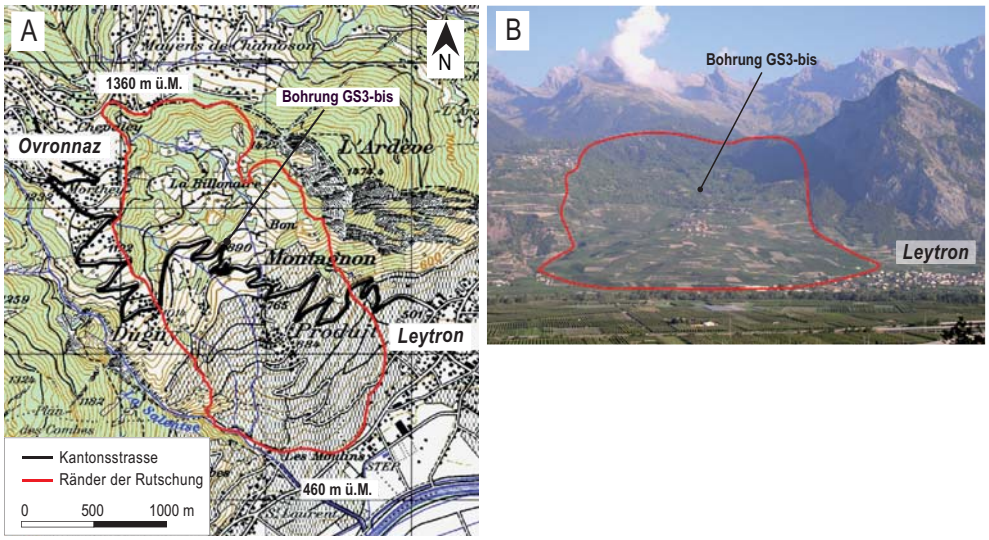
Gabriele Bianchetti, Germain Crestin



Allgemeine Lage, Problemstellung, Bauherrschaft

Ort:	Rutschung Montagnon (VS), oberhalb Leytron, am rechten Rhoneufer (Abb. 54A und B)
Koordinaten:	580 750/115 800 (Filterbrunnen GS3-bis)
Höhenlage:	zwischen 1360 und 460 m
Betroffene Oberfläche:	~3 km²
Mächtigkeit der aktiven Zone:	bis > 100 m
Gesamtvolumen:	rund 150 Mio. m³

Abb. 54 > A. Geografische Lage. B. Blick aus der Rhoneebene auf die Rutschung

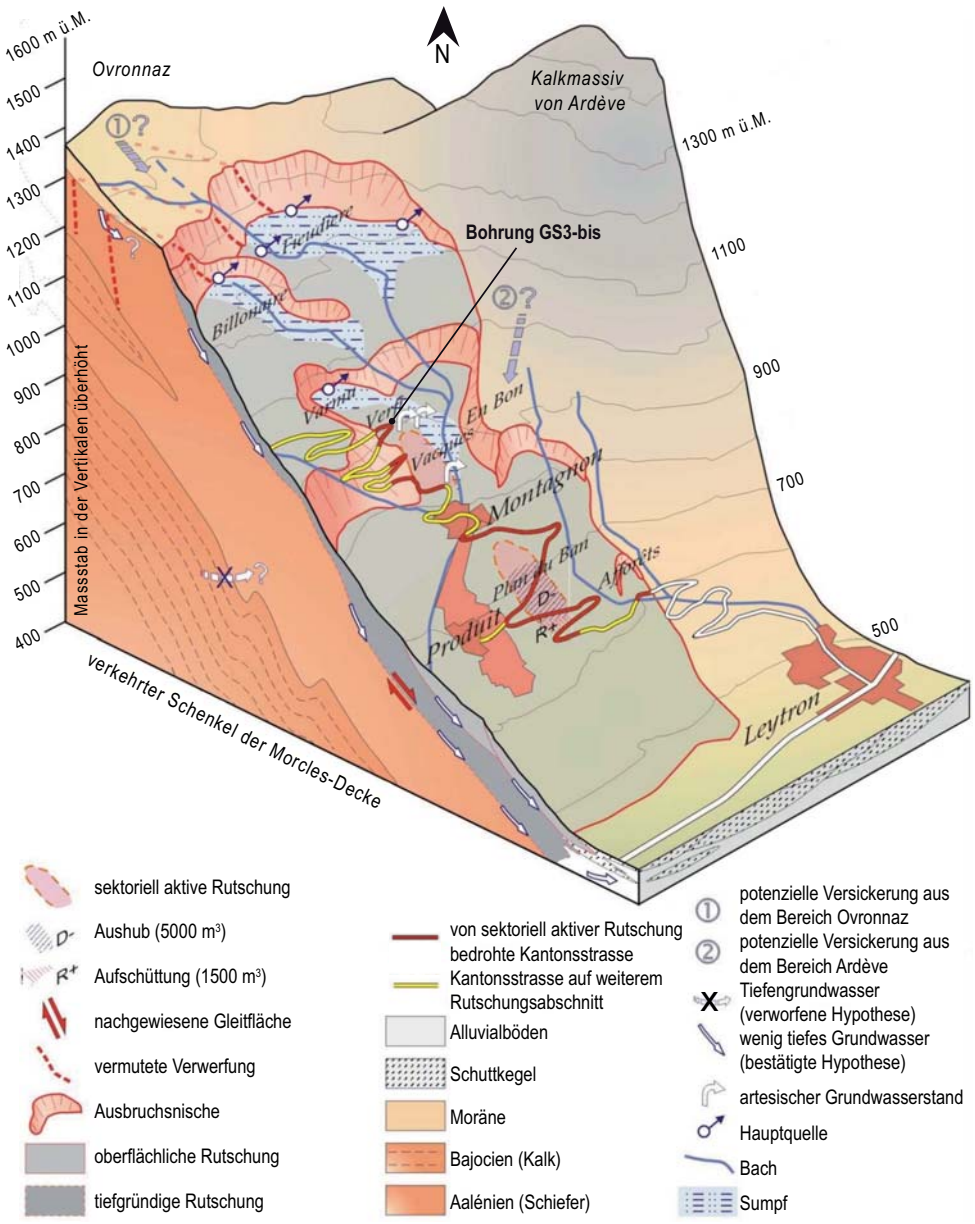


PK50 © swisstopo, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo [BA091592]

Die Rutschung erstreckt sich zwischen den Ortschaften Leytron und Ovronnaz und tangiert die in der Mitte des Hanges liegenden Weiler Montagnon und Produit. Ebenfalls betroffen sind die Kantonsstrasse, welche aus der Rhoneebene in den Tourismusort Ovronnaz führt, sowie der Rebberg, der den unteren Bereich bedeckt (Abb. 54A und B). Die Mächtigkeit der Gleitmasse reicht von 20 m im oberen, zu 40 m im mittleren und zu über 100 m im unteren Bereich der Rutschung (Abb. 55).

Die Kosten der bisher ausgeführten Arbeiten der Tiefensanierung wurden von Kanton und Bund übernommen. Der Kantonsgeologe hat das Hydrogeologiebüro ALPGEO Sàrl in Siders mit der Bauleitung vor Ort und dem hydrogeologische Monitoring beauftragt. M. Sartori, Dr. sc., übernahm die Erstellung der geologischen Detailprofile. Seinerseits erstellte das Büro BEG SA in Aproz die Verschiebungskarten der Rutschung auf der Grundlage von fotogrammetrischen Aufnahmen. Die Untersuchungs- und Sanierungsarbeiten wurden unter der Federführung des Kantonsgeologen realisiert.

Abb. 55 > Blockdiagramm der Rutschung



Zeichnung M. Sartori

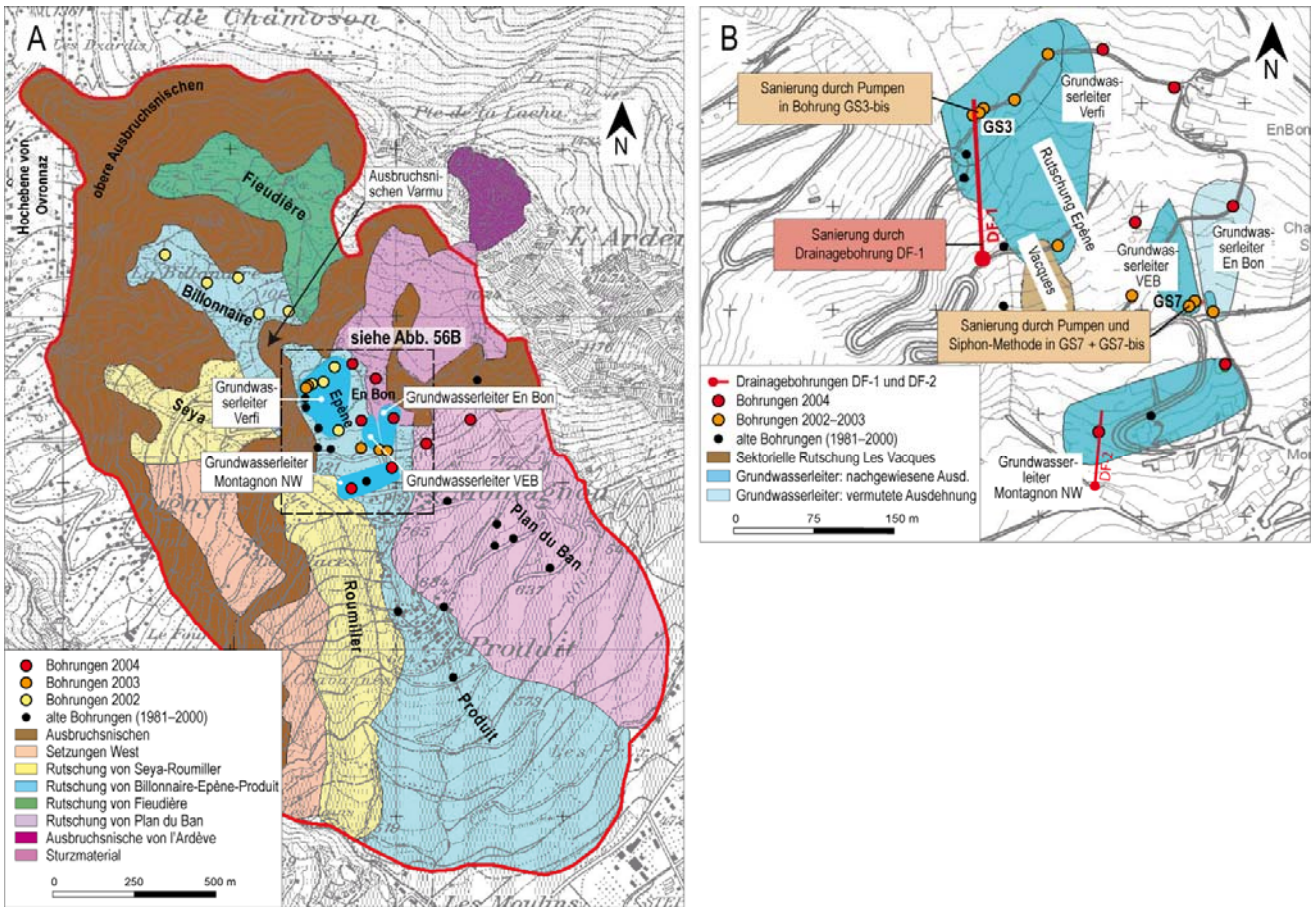
Charakterisierung der Rutschung

Geologie

Die Rutschung liegt in den Aalénien-Schiefern des Verkehrtschenkels der Morcles-Decke (Abb. 55). Sie beinhaltet verschiedene Gesteinsarten, darunter anstehende und mobilisierte Schiefer, eine Moränedeckschicht zuoberst an der Rutschung und Sturzmassen am östlichen Rand. Sie ist in mehrere Unterrutschungen unterteilt, welche mit verschiedenen Zungen einer Gletscher-Arena verglichen werden können (Abb. 56A). Über dem ungestörten Felsuntergrund beinhaltet das typische lithologische Profil eine

Verwitterungszone aus zersetztem und geklüftetem Fels, welche von einer mobilen Lockergesteinsmasse überlagert wird. Die Wasserzirkulation im Kluftgrundwasserleiter an der Basis dieser Masse treiben die Rutschbewegungen an.

Abb. 56 > A. Unterteilungen der Rutschung, Lokalisierung der identifizierten Grundwasserleiter und Lage der Bohrungen. B. Zentrale Zone von Epène: Lokalisierung der Grundwasserleiter, der Pumpanlagen und der Drainagebohrungen DF-1 und DF-2



topografische Grundlagen: Übersichtsplan © 2000 Kanton Wallis

Hydrogeologie

21 Erkundungsbohrungen und 2 Drainagebohrungen wurden zwischen 2002 und 2007 (Gesamtlänge: 1200 m) vorgenommen. Sie haben es ermöglicht, dass in einer Tiefe von 20 bis 40 m vier Kluftgrundwasserleiter erkannt werden konnten (Abb. 56A und B). Diese Grundwasserleiter sind durch sehr geringdurchlässige Schichten voneinander getrennt, sodass in den Pumpversuchen keine Verbindungen aufgezeigt werden konnten. Ihr hochgespannter Charakter übt in Hochwasserperioden einen starken hydrostatischen Druck aus, der die Sohle der Rutschung sättigt und anhebt und so die bekannten Bewegungen verursacht. Der grösste dieser Kluftgrundwasserleiter ist derjenige von Le Verfi mit einem durch Pumpen nachgewiesenen lateralen Wirkungsbereich von 80 m (Abb. 57B).

Bewegungen

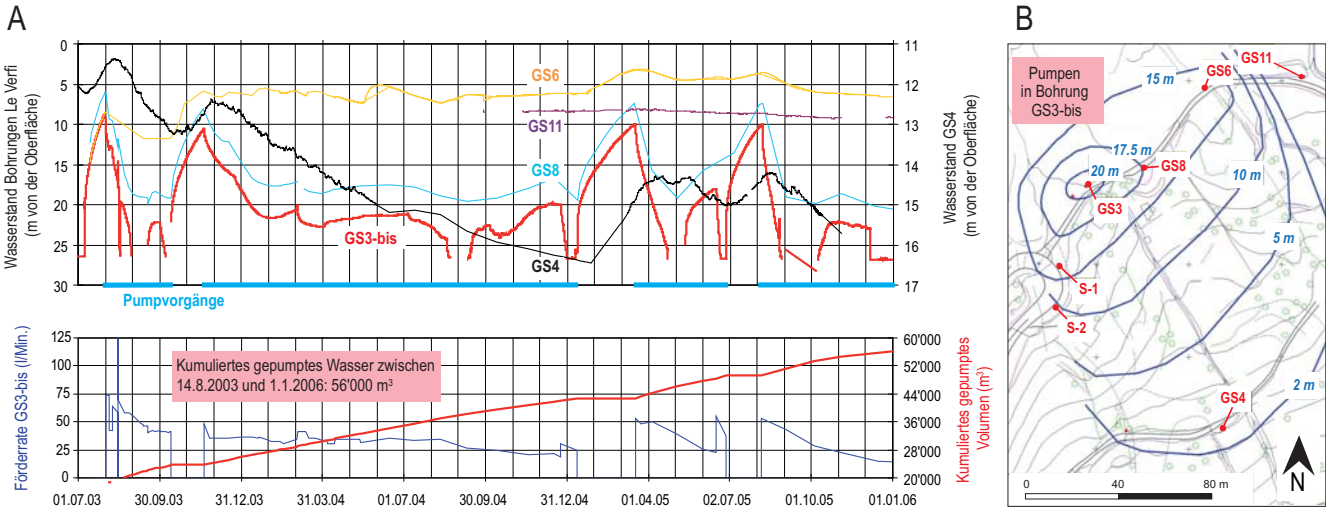
Für die Jahre 1990–2002 konzentrieren sich die grössten Verschiebungen (16 bis 40 cm/Jahr) auf die Teilrutschungen von Epène und Plan du Ban (Abb. 56A). Die am wenigsten betroffenen Sektoren entsprechen mit wenigen Ausnahmen den Weilern von Montagnon und Produit. Die unvermeidbare Mittelung der Bewegungen über das Jahr täuscht vereinfachte Verhältnisse vor. Die Erfahrung hat gezeigt, dass es sich in Realität, gestützt auf geodätische Messkampagnen, um eine Folge von sehr aktiven Phasen zwischen wenig aktiven Perioden handelt.

Sanierungskonzept für die Rutschung

Die vorgesehenen Sanierungsmassnahmen zielen auf eine Abdichtung der Bachsohlen (Projekt in Ausarbeitung) und auf eine permanente Absenkung des hydrostatischen Drucks der gespannten Kluftgrundwasserleiter ab. Zwischen 2003 und 2006 wurde das zweite Ziel durch Abpumpen und die Siphon-Methode in den Bohrungen erreicht (Abb. 56B und 57); dadurch konnten die Bewegungen oberhalb des Weilers von Montagnon fast komplett abgestellt werden. Ab Anfang 2007 wurden diese Systeme durch die endgültige Schwerkraftdrainage in den subhorizontalen Drainagebohrungen DF-1 am Verfi (Abb. 56B und 58) und DF-2 nord-westlich des Weilers von Montagnon (Abb. 56B) ersetzt.

Sanierung des Grundwasserleiters Le Verfi: Das Abpumpen im Filterbrunnen GS3-bis (Abb. 56B) ergab zwischen Oktober 2002 und November 2006 rund 70 000 m³ Wasser mit einer durchschnittlichen Förderrate zwischen 30 und 75 l/Min., was ermöglichte, den Wasserspiegel auf 15 m unter der Oberfläche zu halten (Abb. 57A und B).

Abb. 57 > A. Einflüsse des Abpumpens im Filterbrunnen GS3-bis auf die benachbarten Piezometer. B. Zone Le Verfi: Karte der Absenkung des Wasserspiegels infolge Pumpens im Filterbrunnen GS3-bis

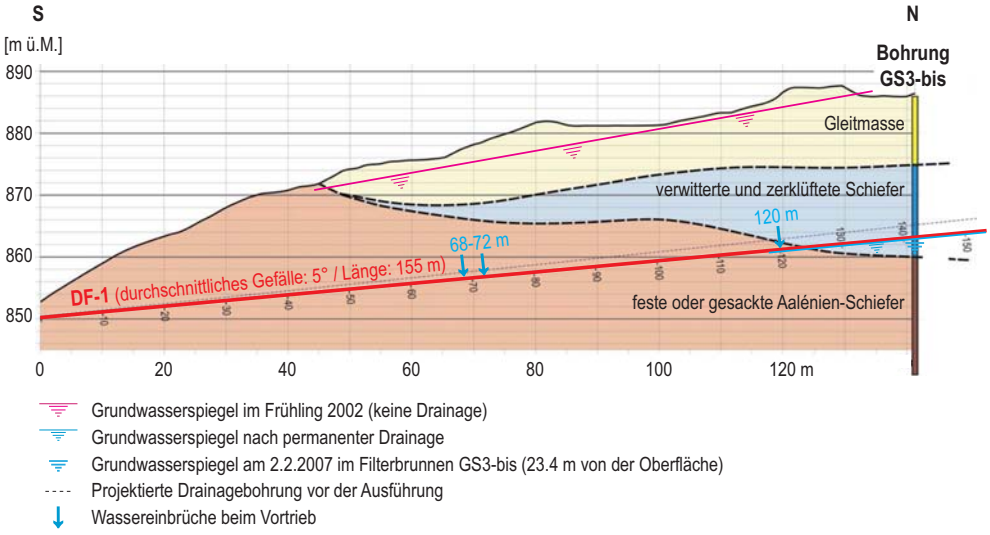


topografische Grundlage: Übersichtsplan © 2000 Kanton Wallis

Aufgrund der durch das Pumpen erreichten Resultate konnte eine permanente Schwerkraftdrainage des gespannten Grundwassers ins Auge gefasst werden. In der Folge stimmte die Bauherrschaft in einem ersten Schritt der Ausführung von zwei Drainagebohrungen zu. Die Drainagebohrungen wurden so geplant, dass sie direkt auf die wasserführende Verwitterungszone wirken. Die grösste Länge des Drainagerohrs DF-1 wurde im gesunden Felsuntergrund gebohrt; nur die letzten 30 m befinden sich im Kluftgrundwasserleiter. Letztlich genügte eine einzelne Drainagebohrung mit 155 m Länge, um den Kluftgrundwasserleiter Le Verfi zu entwässern (Abb. 58). In der Niedrigwasserperiode kann somit bei einer anhaltenden Abflussmenge in der Grössenordnung von 30 l/Min. der Grundwasserspiegel bei 24 m Tiefe gehalten werden, das heisst 10 m unter der Basis der Rutschung. In zwei Jahren wurden mehr als 36 000 m³ Wasser durch die Bohrung DF-1 abgeleitet (mittlere Schüttung von 34 l/Min.). Aufgrund einer sehr mächtigen Schneebedeckung erreichte die Schüttung während der intensiven Schneeschmelze im Frühling 2009 120 l/Min.

Abb. 58 > Geologisches Profil entlang der Drainagebohrung DF-1 und hydrogeologische Situation

Im Frühling 2002 war das Wasser in den Bohrungen GS3, GS6 und GS8 artesisch gespannt. Von 2003 bis 2006 wurde der gespannte Grundwasserspiegel durch Pumpen im Filterbrunnen GS3-bis abgesenkt. Seit Ende 2006 wird der Grundwasserleiter Le Verfi allein mithilfe der Schwerkraft durch die Drainagebohrung DF-1 entwässert.



Zeichnung M. Sartori

Sanierung des Grundwasserleiters VEB: Das anhaltende Abpumpen im Filterbrunnen GS7-bis (Abb. 56B) ermöglichte zwischen September 2003 und Mai 2004 bei einer Förderrate von 20–30 l/Min. den Entzug von 8000 m³ Wasser. Nach der Eindolung eines Abschnitts des Bachs Chaudanne oberhalb der Bohrung verringerte sich das drainierte Wasservolumen stark. Die Pumpe wurde daraufhin durch ein im benachbarten Filterbrunnen GS7 installiertes System von Kolbensaughebern abgelöst. Dadurch wurde es möglich, 6000 m³ Wasser zu entziehen und den Grundwasserspiegel um 8 m zu senken (≤ 16 l/Min.), ohne dass dabei Betriebskosten entstanden. An den benachbarten Piezometern konnten jedoch keine Senkungen beobachtet werden.

Wirksamkeit des Sanierungssystems

In der Kurve der Kantonsstrasse bei Le Verfi (Abb. 55 und Abb. 56B) hat das Pumpen im Filterbrunnen GS3-bis sofort zum Stillstand der Bewegungen auf der Höhe der Kantonsstrasse geführt. Abwärts wurde die Sekundärrutschung Les Vacques, die seit November 2002 die Kantonsstrasse bedrohte, in wenigen Monaten stark verlangsamt.

Ende 2009 konnte noch keine Wirkung durch den Wasserentzug im Grundwasserleiter VEB (Abb. 56B) auf die Rutschung festgestellt werden.

Kosten

Die Untersuchungen, die Sanierungsmassnahmen und die Überwachung der Grundwasserleiter verursachten bis 2006 Kosten in der Höhe von rund 850 000 Franken.

Bilanz des Sanierungskonzepts

Die Drainagebohrung DF-1 hat es möglich gemacht, den Sektor Verfi/Vacques innerhalb weniger Monate zu stabilisieren. Seitdem wurden keine Bewegungen mehr festgestellt.

In den Sektoren, welche zum einen durch den Grundwasserleiter VEB und zum anderen durch den nordwestlich von Montagnon gelegenen Grundwasserleiter (Abb. 56B) destabilisiert worden sind, wurde der Grundwasserspiegel durchschnittlich um 4 m abgesenkt. Ein Vergleich der Flugaufnahmen von 2006 und 2009 zeigt auf, dass sich die Bewegungen oberhalb des Weilers Montagnon, wie auch unterhalb, stark verringert haben. So gesehen wurde die oben erwähnte Wirkung auf die Hangstabilität nicht wirklich unter Beweis gestellt. Allein eine längerfristige Überwachung über 10 Jahre wird es erlauben festzustellen, bis wie weit hangabwärts die Drainagebohrungen DF-1 und DF-2 ihre Wirkung tatsächlich entfalten. In der Zwischenzeit und auch als Präventivmassnahme werden in den bestehenden Bohrungen ergänzende Langzeit-Pumpversuche durchgeführt. Auf der Basis der sich daraus ergebenden Resultate werden anschliessend eine oder zwei ergänzende Drainagebohrungen vorgeschlagen.

Im Frühling 2009 wurden wegen der intensiven Schneeschmelze zahlreiche Rutschungen im Wallis reaktiviert. Auch unterhalb des Dorfes Montagnon, bei Plan du Ban, hat in dieser Phase eine lokale Rutschung grosse Schäden an der Kantonsstrasse verursacht. Die Gleitfläche liegt in 11 m Tiefe in einer Lössablagerung. Ein Sanierungsprojekt ist in Vorbereitung.

Literaturhinweise

ALPGEO 2002: Glissement de Produit-Montagnon, Commune de Leytron. Forages de reconnaissance dans la région de Billonaire-Epène (avril–mai 2002). Bericht zuhanden des Kantonsgeologen, August 2002 (unveröffentlicht).

ALPGEO 2005: Glissement de Montagnon, Commune de Leytron. Synthèse des investigations (période 2002–04) et mise à jour du concept d'assainissement. Technische Notiz zuhanden des Kantonsgeologen, Januar 2005 (unveröffentlicht).

ALPGEO 2005: Glissement de Montagnon, Commune de Leytron. Deuxième campagne de forages de reconnaissance (mars 2003 – décembre 2004). Secteur d'investigation: Verfi – EnBon – Champs du Seigle. Bericht zuhanden des Kantonsgeologen, April 2005 (unveröffentlicht).

ALPGEO 2007: Glissement de Montagnon, Commune de Leytron. Troisième campagne de forages: drains forés et forage vertical de reconnaissance (novembre 2006 – mai 2007). Secteurs d'investigation: Verfi – Montagnon – Plan du Ban. Bericht zuhanden des Kantonsgeologen, Oktober 2007 (unveröffentlicht).

A7 Rutschung Arveyes (VD): Beispiel einer Stabilisierung durch Filterbrunnen mit Pumpen

Christophe Bonnard, Aurèle Parriaux

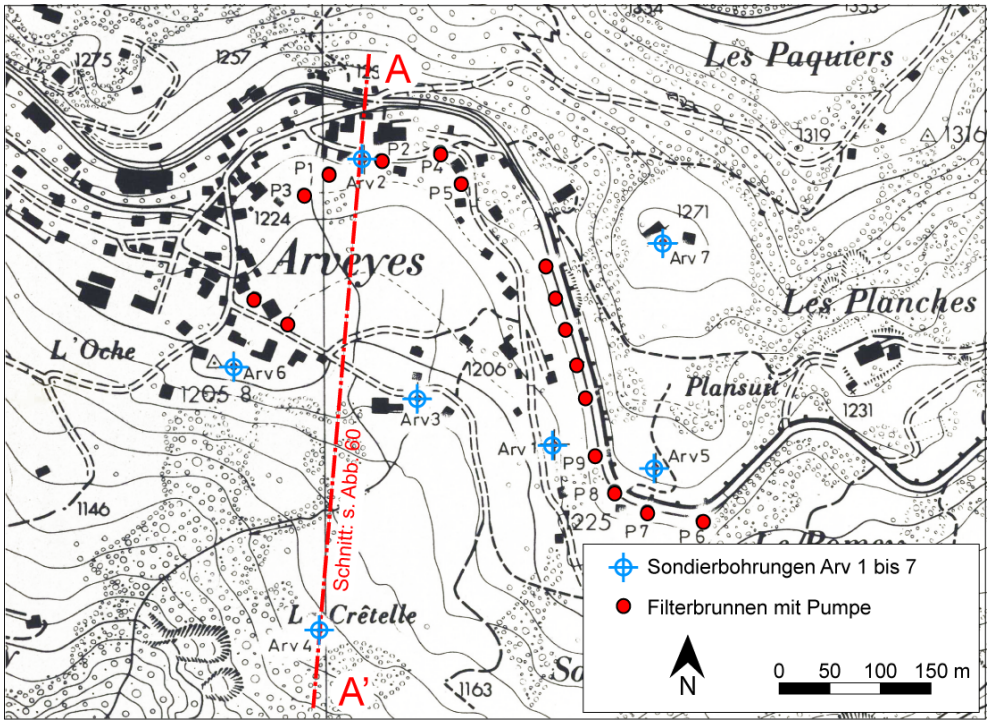


Allgemeine Lage, Problematik, Bauherrschaft

Ort:	Rutschung Arveyes (VD) bei Villars-sur-Ollon, Gemeinde Ollon (Abb. 59)
Koordinaten:	571 000/126 500
Höhenlage:	zwischen 1000 und 1300 m
Fläche:	rund 1 km²
Mächtigkeit der aktiven Zone:	45 m im Durchschnitt, lokal bis 74 m
Gesamtvolumen:	rund 25 Mio. m³

Arveyes, ein kleines Dorf in der Nähe von Villars-sur-Ollon, liegt an der Strasse Bex–Villars, auf der auch die Geleise der Bahnlinie Bex–Villars–Bretaye verlaufen. Zusammen mit der darunter liegenden Landwirtschaftszone ist dieser Sektor von einer grossen, langsamen Rutschung betroffen, die sich Ende der 1970er-Jahre reaktivierte und Schäden an Häusern, der Strasse, der Bahnlinie und der Kanalisation verursachte (Abb. 59).

Abb. 59 > Rutschung von Arveyes: Standorte der Filterbrunnen und der Sondierbohrungen



Karte auf der Basis der Katasterdaten erstellt © Kanton Waadt

Die Meliorationsgenossenschaft von Arveyes, gegründet 1982, übernahm die Sanierung mit Unterstützung der Gemeinde Ollon, des Kantons Waadt und des Bundes. Das Büro J. Martin (heute Tecnat SA in St. Triphon) beauftragte die EPFL mit der geologischen Untersuchung und dem Sanierungsprojekt (Gabus et al. 1988).

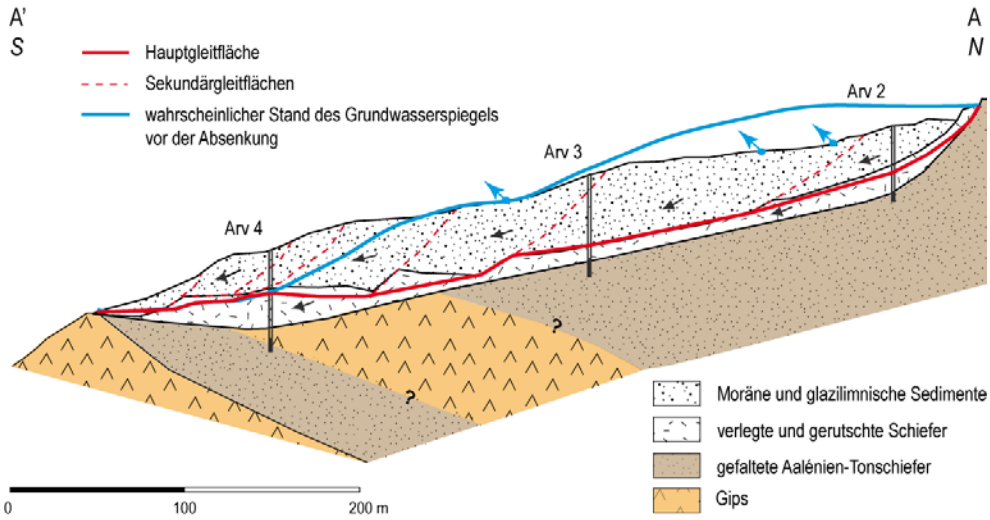
Charakterisierung der Rutschung

Geologie

Die Gleitmasse besteht hauptsächlich aus Moränenmaterial und stark umgearbeiteten Schiefern. Die Rutschung liegt auf gefalteten schwarzen Aalénien-Tonschiefern (Abb. 60). Im unteren Bereich liegt darunter stark verkarsteter triassischer Gips.

Abb. 60 > Längsprofil durch den stabilisierten Bereich der Rutschmasse (Situation Schnitt A–A': s. Abb. 59)

Die Abbildung zeigt den Grundwasserspiegel vor der Senkung und die Rutschrichtung.



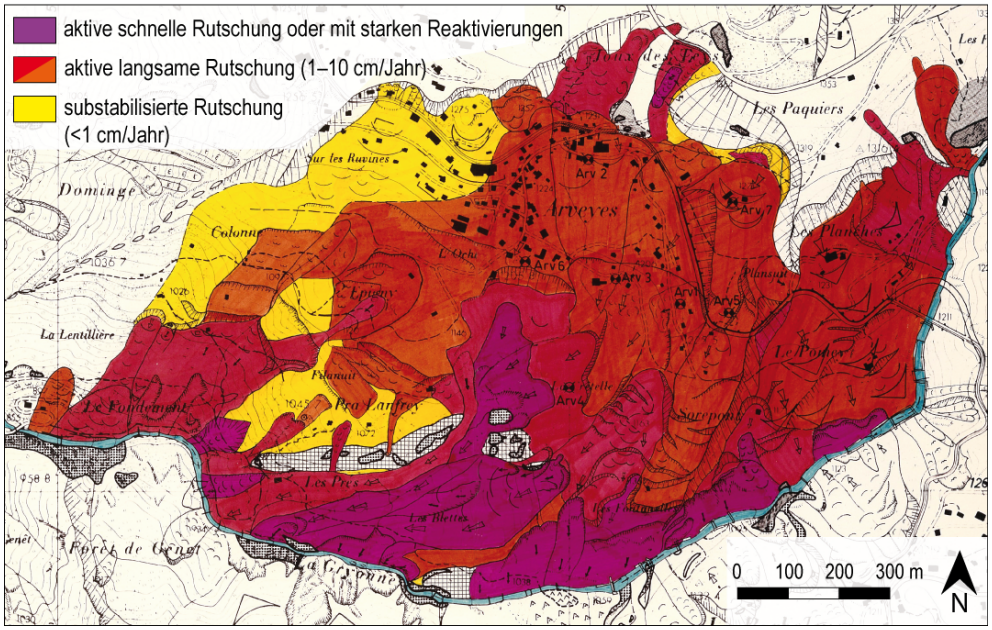
Hydrogeologie

Im oberen Teil der Rutschung war der Grundwasserspiegel vor der Absenkung durch artesische Bedingungen mit einem Überdruck von 1 bis 2 bar an der Oberfläche charakterisiert. Dieses Wasser stammt aus sandig-tonigem Kalk des Doggers weiter oben. Das Wasser in den Schiefern ist Natriumbikarbonat-haltig und reich an H_2S; das Wasser aus der Moräne ist Calciumbikarbonat-haltig. Ein Versuch mit Durchflussmesser («Flowmeter») im Filterbrunnen P9 (Abb. 59 und Abb. 62) hat gezeigt, dass der Grossteil des Wassers aus dem Felsuntergrund stammte, obschon dieser als wenig durchlässig galt; dagegen war die Moräne in dieser Bohrung, obschon wassergesättigt, kaum produktiv.

Bewegungen

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Rutschung variierten zwischen 1 und 4 cm/Jahr (Abb. 61). In gewissen Bereichen sind sie noch geringer. In einigen Bohrungen beobachtete man zwei bis drei übereinander gelagerte Rutschflächen, die wenig aktiven Bereichen entsprechen. Die Bewegungen sind im unteren Teil der Rutschung in Richtung der am Hangfuss durchfliessenden Gryonne am markantesten.

Abb. 61 > Instabilitätskarte vor den Sanierungsarbeiten mit der Verteilung der Geschwindigkeiten

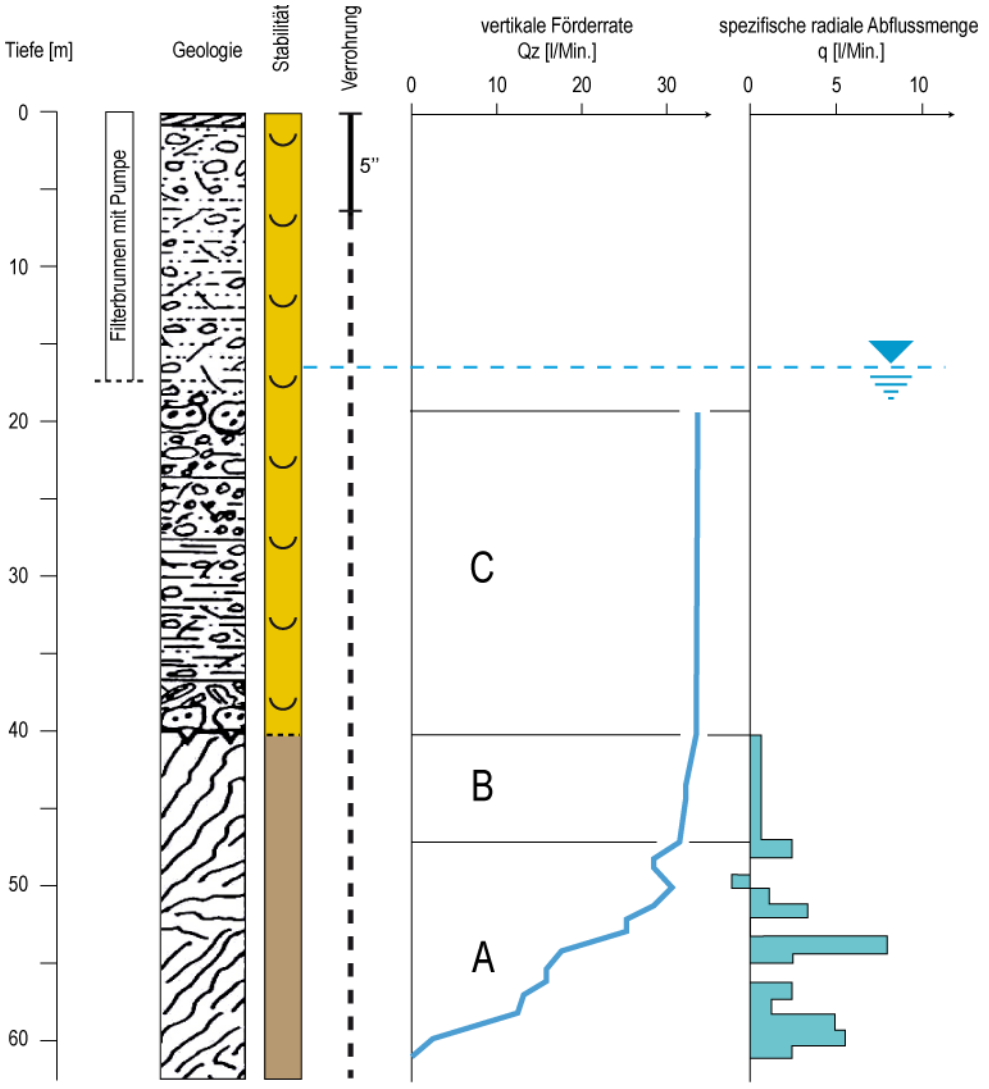


Karte auf der Basis der Katasterdaten erstellt © Kanton Waadt

Sanierungskonzept für die Rutschung

Mit einer Reihe von mit Pumpen ausgerüsteten Filterbrunnen (Abb. 59 und Abb. 60) wurde die Senkung des Grundwasserspiegels unter das Niveau der aktiven Rutschung bewirkt. Dieses Hauptsystem mit 16 in Etappen realisierten Bohrungen wurde durch Sammelgräben für das Oberflächenwasser und Erosionsschutzbauten im Wasserlauf ergänzt. Die erste Etappe 1983 umfasste fünf Bohrungen in der Dorfzone, ausgeführt mit einem Durchmesser von 700 mm durch einen Greifbagger und mit Verrohrung, während die beiden folgenden Etappen von 1985 und 1986 mit einem Durchmesser von 250 mm durch eine Rotationsbohrung realisiert wurden. In der ersten Etappe wurden die perforierten, mit Rilsan gegen Korrosion geschützten Stahlfilterrohre mit einem Durchmesser von 250 mm, in den beiden folgenden Etappen mit 150 mm Durchmesser realisiert. Diese Filterrohre sind von einem PVC-Gitter mit einer Maschenweite von 1 mm² und einem Filterkies von 0 bis 20 mm umgeben. Die Tauchpumpen mit einer Kapazität in der Grössenordnung von 100 l/Min. waren nur intermittierend in Betrieb, da die Förderraten sehr variabel waren (von 0,13 bis 30 l/Min.). Im Verlauf der Bohrung wurden bei Wassereinbrüchen Werte von über 200 l/Min. verzeichnet. Dieses Wasser wird durch Rohre, in der Regel entlang der Strasse, bis in die Gryonne abgeleitet. Die in den Filterbrunnen gemessenen Absenkungen bewegten sich im Durchschnitt zwischen 10 und 45 m.

Abb. 62 > Flowmetertest im Filterbrunnen P9



Rutschung

A durchlässiger Fels

B verwitterter, wenig durchlässiger Fels (gefalteter Tonschiefer)

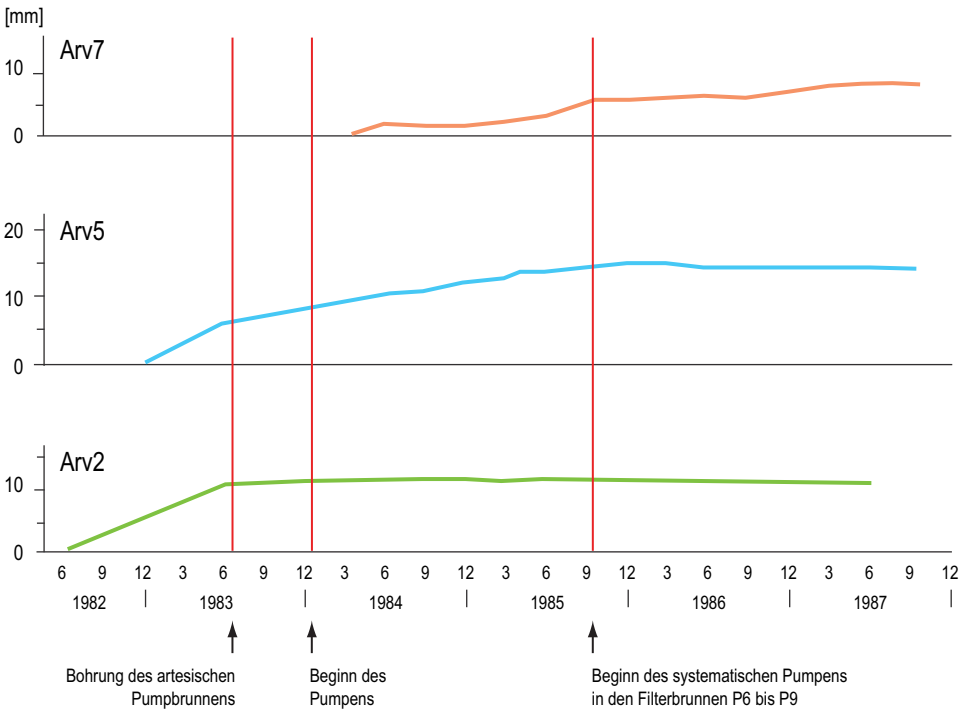
C Moräne und wenig durchlässige glazilimnische Sedimente

geändert nach Parriaux 1988

Wirksamkeit des Sanierungssystems

Das Pumpen führte zu einer sofortigen und fast vollständigen Beruhigung der Rutschung in der Dorfzone von Arveyes, also dort, wo der artesische Grundwasserstand am höchsten war (Abb. 59 und Abb. 63). Die Bewegung verringerte sich bereits während der Bohrung der Filterbrunnen. Im untersten Bereich in einiger Entfernung von den ersten Brunnen, reduzierten sich die Bewegungen nach Inbetriebnahme der Pumpen um die Hälfte, aber es dauerte fast drei Jahre, um eine signifikante Reduktion der Geschwindigkeit auf 2 bis 3 mm/Jahr zu erreichen.

Abb. 63 > Inklinometerdaten in den Sondierbohrungen Arv2, Arv5 und Arv7 zwischen 1982 und 1987; kumulierte horizontale Verschiebungen in mm



Daten LMS/EPFL

Ebenso nahmen nach der zweiten, entlang der Kantonsstrasse in Richtung Bex durchgeführten Sanierungsetappe die Bewegungen im Umfeld der Bohrungen deutlich ab, aber es dauerte mehrere Jahre, bis sie im tiefgründigsten, bis zu 74 m mächtigen Bereich der Rutschung (in der Sondierbohrung Arv7), unter ein Niveau von 1 mm/Jahr fielen. Seit mehr als 25 Jahren ist das System inzwischen in Betrieb, und es wurden keine Anzeichen einer Reaktivierung festgestellt. Die Inklinometermessungen erstreckten sich über den Zeitraum 1982–1989.

Bau- und Betriebskosten

Die Kosten für die in drei Etappen realisierten Filterbrunnen beliefen sich, einschliesslich der Installation der Pumpen, auf 1 Mio. Franken. Mit den Kosten für das Sammeln des Oberflächenwassers (1,5 Mio. Franken), für die Arbeiten zur Stabilisierung eines Zuflusses der Gryonne und für die Zufahrtswege zu den Baustellen betrug die Investition insgesamt 7 Mio. Franken (Daten J.F. Huck, Büro Tecnat, St. Triphon).

Gemäss dem Büro Tecnat sind die Betriebskosten, über zehn Jahre gemittelt, die folgenden:

- Wartung der Pumpen 6000 Franken/Jahr
- Ersatz von Pumpen 2000 Franken/Jahr
- elektrischer Strom (Förderhöhe zwischen 40 und 90 m) 3500 Franken/Jahr
- Unterhalt der Rinnen und Zufahrten 15 000 Franken/Jahr
- Organisation, Überwachung 4000 Franken/Jahr

Die Pumpen förderten im Durchschnitt rund 200 m^3 Wasser pro Monat. Das entspricht, für alle Brunnen zusammen, einer sehr bescheidenen permanenten Förderrate von durchschnittlich weniger als 5 l/Min. Selbst wenn bis jetzt nur wenige Pumpen ersetzt werden mussten, ist, vorsichtig gerechnet, von einer Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren auszugehen. Es ist geplant, an diesem Standort für die Einrichtung einer modernen, funkgesteuerten Anlage zum Betrieb der Pumpen 100 000 Franken zu investieren.

Bilanz der Sanierung

Nach mehreren Jahren haben die Bewegungen signifikant abgenommen. Gemäss Tecnat bleiben die Verschiebungen in der bebauten Zone unter 5 mm/Jahr (Messung zwischen 1992 und 2000). Demgegenüber sind in den an den Fluss angrenzenden Bereichen nach wie vor bedeutende Verschiebungen zu verzeichnen.

Literaturhinweise

Gabus J.H., Bonnard Ch., Noverraz F., Parriaux A. 1988: Arveyes, un glissement, une tentative de correction. Comptes rendus du V^e Symp. Int. sur les glissements de terrain, Lausanne (2): 911–914. Balkema.

Parriaux, A. 1988: Contribution of flowmeter measurements in wells bored for stabilizing landslides. Comptes rendus du V^e Symp. Int. sur les glissements de terrain, Lausanne (2): 463–464. Balkema.

A8 Rutschung Campo Vallemaggia (TI): Beispiel einer Stabilisierung mittels Entwässerungsstollen

Luca Bonzanigo



Allgemeine Lage, Problemstellung, Bauherrschaft

Ort:	Rutschung Campo Vallemaggia (TI)
Koordinaten:	681 000/127 000
Höhenlage:	zwischen 2200 und 1000 m
Fläche:	rund 6 km²
Mächtigkeit der aktiven Zone:	durchschnittlich 200 m, max. rund 300 m
Gesamtvolumen:	rund 800 Mio. m³

Zwei Dörfer liegen auf der Terrasse der Rutschung: Campo Vallemaggia und Cimalmotto. Es scheint, dass gegen Ende des 18. Jahrhunderts, als Folge von katastrophalen, in historischen Texten nicht näher präzisierten Ereignissen, das Dorf Campo vorübergehend evakuiert worden war. Ende des 19. Jahrhunderts ereigneten sich an den Ufern der Rovanna schwerwiegende Erosionsvorgänge, deren Ursache, teilweise zu Unrecht, den Flösseraktivitäten (im kanadischen Stil) zugeschrieben wurden; Folgen der Erosion waren Setzungen und Zerstörungen von Gebäuden. Bereits im 19. Jahrhundert wurden die Kantonsbehörden aufgerufen, sich um das Problem zu kümmern, umso mehr als die Sicherheit der talwärts gelegenen Gebiete durch massive Erosion und den erheblichen Eintrag von Sand und Kies stark gefährdet wurde. Das Material wurde bis zur Mündung der Maggia in den Langensee bei Locarno transportiert. Aber die Dimension des Phänomens bewog den Kanton dazu, sich an den Bund zu wenden. 1892 schrieb Albert Heim nach einem Augenschein eine Aktennotiz, in welcher er das Vorkommen von Wasser in der Rutschung für die Bewegungen verantwortlich macht. Mehr als ein Jahrhundert später, zwischen 1993 und 1996, machte der Bau eines vom Kanton Tessin finanzierten und vom Bund subventionierten Entwässerungsstollens endlich die Stabilisierung der Rutschung möglich.

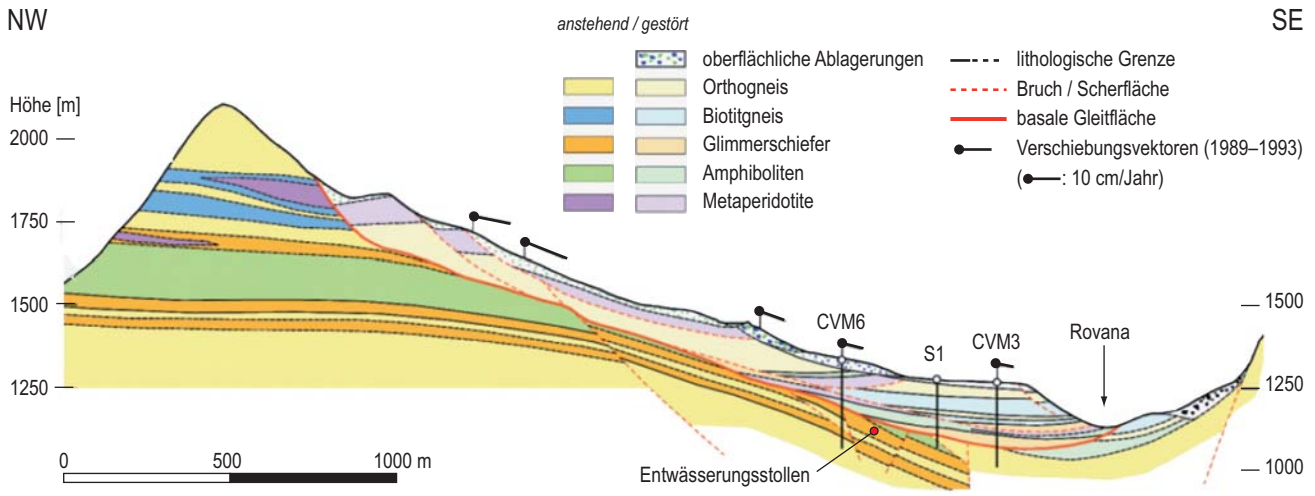
Charakterisierung der Rutschung

Geologie

Die Rutschung liegt in den metamorphen penninischen Decken. Der anstehende Fels besteht aus Gneisen, Schiefern und Metaperidotiten sowie einer mächtigen Einschaltung von Amphiboliten (Abb. 64) und einigen Schichten Kalkschiefer (Kieselkalk). Die allgemeine Struktur ist definiert durch eine ausgedehnte isoklinale Synform, in welcher die basischen Gesteine den Faltenkern bilden. Die Schieferung fällt wie die Topografie nach Südosten ein und ist damit in Richtung der Gleitbewegung der Rutschung orientiert. Der Gesteinskomplex wird von verschiedenen Verwerfungssystemen durchquert, wobei das bedeutendste rechtwinklig zum Hang verläuft. Die Rutschung besteht aus einer Masse aus verwittertem und zersetztem Fels, dessen Strukturen ihre Orientierung trotz den Bewegungen weitgehend beibehalten. Die Gleitflächen folgen in der Regel der Schieferung oder dem Kontakt zwischen den verschiedenen Lithotypen (Abb. 64). Die Rutschung ist in diverse Blöcke mit unterschiedlichem Fliessverhalten unterteilt. Die Unterteilung ist von Verwerfungen und lithologischen Kontaktflächen bedingt.

Abb. 64 > Längsprofil durch die Rutschung

Angegeben sind die Positionen von einigen Sondierbohrungen und des Entwässerungsstollens im anstehenden Fels unter der Rutschung.



geändert nach Bonzanigo et al. 2007

Hydrogeologie

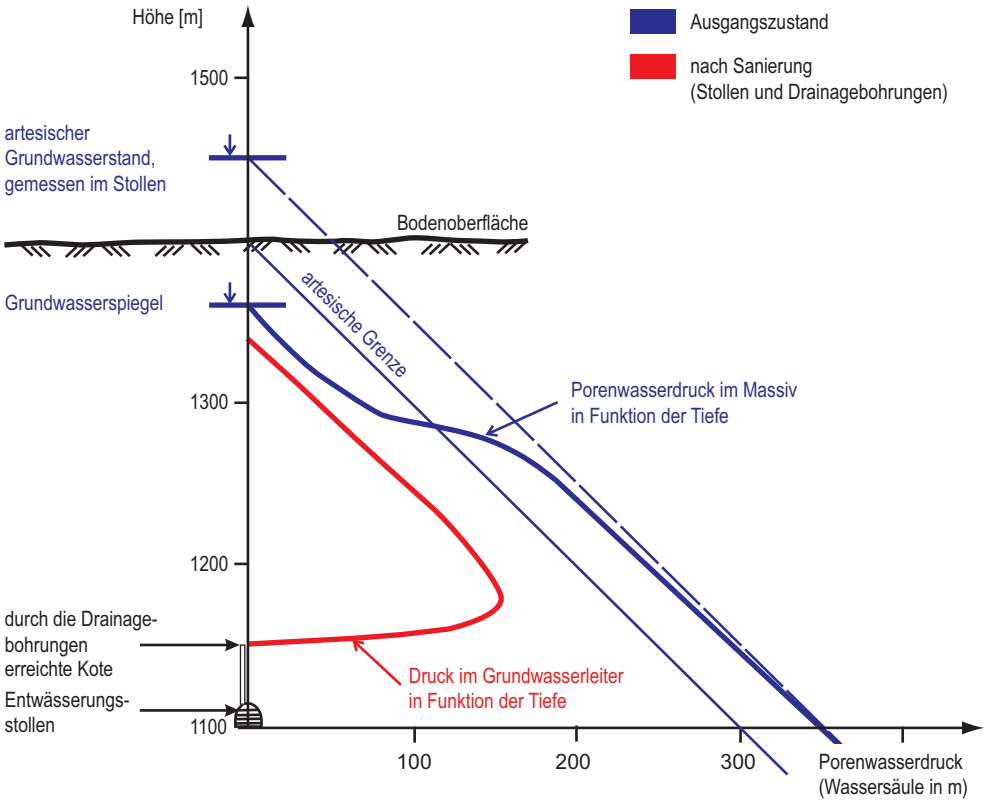
Die hydrogeologischen Verhältnisse spielen eine fundamentale Rolle. Verschiedene, bevorzugt entlang von Verwerfungen angeordnete Quellaustritte, weisen hydrochemische Charakteristiken auf, die von unterschiedlicher Herkunft zeugen. Der Grundwasserspiegel ist in wenigen Metern Tiefe anzutreffen. Mehrere Sondierbohrungen wurden abgeteuft, deren tiefste 330 m erreichte und die den artesischen Charakter der tiefen Grundwasserleiter aufzeigte (Abb. 65). Der artesische Überdruck erwies sich als Ursache für die Instabilität.

Bewegungen

Das Alter und das Ausmass dieser Rutschung sowie die Tatsache, dass sie eine Bedrohung für die ganze Gegend darstellte, führte die kantonalen Behörden dazu, ab 1892 einige geodätische Überwachungspunkte zu installieren. Das Netz wurde 1927 nach bedeutenden Bewegungen ab 1921 sowie anlässlich einer erneuten Beschleunigungsphase 1940 erweitert. Die Verschiebungsmessungen wurden zeitlich leider sehr variabel durchgeführt; wenn die Rutschung ruhig war, wurden über längere Zeit keine Daten erhoben. 1984 schliesslich wurde das Netz wieder instand gesetzt und ergänzt. Die Messungen fanden nun mehr oder weniger jährlich statt. Inklinometermessungen in den Bohrungen stellen dabei auch wertvolle Informationen über die Verteilung der Verschiebungen in der Tiefe dar. Die Durchschnittsgeschwindigkeit betrug rund 3 cm/Jahr mit periodischen Beschleunigungen, die mehrere cm/Jahr erreichten. Diese Beschleunigungen sind nur indirekt mit der Regenintensität korrelierbar. Das Rutschphänomen lässt einen pulsierenden Mechanismus erkennen, mit einer Anreicherungsperiode, in welcher keine grossen Bewegungen stattfinden, obschon die Regenfälle intensiv und die Erosion katastrophal ist. Dann plötzlich, bei längeren, aber nicht unbedingt stärkeren Regenfällen, gibt es eine heftige Beschleunigung. Nach einigen Monaten gehen die Bewegungen wieder zurück und reaktivieren sich während 10 oder 20 Jahren nicht, obschon es auch in dieser Zeit heftige Niederschläge gibt.

Abb. 65 > Entwicklung des Porendrucks mit zunehmender Tiefe, wie er mit verschiedenen Sondierungen aufgezeigt wurde (10 m Wassersäule = 1 bar)

Vom freien Grundwasser an nimmt der Druck mit der Tiefe zu, bis er artesisch wird (Überschreiten der hydrostatischen Linie bei 45° entsprechend dem Oberflächenniveau). Die Linien illustrieren die ursprüngliche Situation (blau) und die Wirkung der Drainage (Stollen und Drainagebohrungen, rot). Es wurde beobachtet, dass die Drainage zwar auf den Porendruck wirkt, die Kote des freien Grundwasserspiegels jedoch nur sehr geringfügig absenkt.



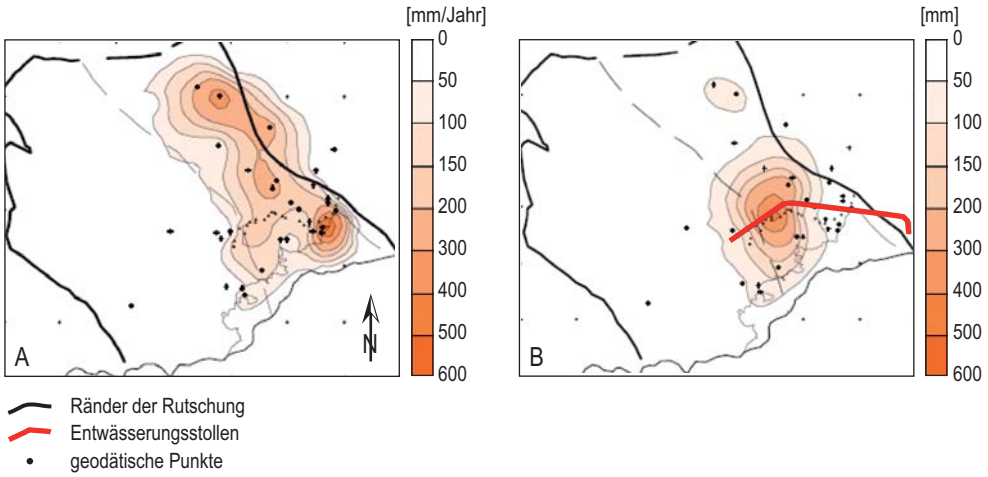
Sanierungskonzept für die Rutschung

Die vertiefte Analyse der geologischen, geodätischen und hydrogeologischen Beobachtungen führte zum Schluss, dass die Rutschung keine Folge der massiven Erosion an deren Fuss ist, sondern ihre treibende Kraft im hydraulischen Überdruck in und unter der Gleitmasse hat. In der Folge wurde ein Entwässerungsstollen im anstehenden Fels unter der Rutschungsmasse vorgeschlagen, von dem aus Drainagebohrungen in die Rutschmasse vorgetrieben werden sollten. Der Stollen wurde 1810 m lang, 3,5 m breit und 3,5 m hoch. Von den ursprünglich geplanten 120 subvertikalen, strahlenförmig angeordneten Drainagebohrungen wurden schlussendlich 35 mit Imlochhammer und 4,5"-Durchmesser gebohrt. Ihre Länge variiert zwischen 25 und 75 m. Die Überdruckverhältnisse machten die Bohrarbeiten schwierig. Die Ausrüstung mit einem «Preventer» mit Sicherheitsschleuse wurde damals als zu teuer erachtet.

Die Drainage, die allein schon durch den Ausbruch des Stollens in Gang kam, führte bei einer anfänglichen Abflussmenge von 8 l/s bereits zu einer Abnahme der beobachteten hydraulischen Höhe (Abb. 67, Ende 1994) und wahrscheinlich zu einer Verlangsamung der Rutschung. Sobald die ersten Drainagebohrungen fertiggestellt waren, zeigten die kontinuierlichen Messungen der Verschiebungen eine unmittelbare Verlangsamung der Bewegungen. Nach Abschluss der Bohrarbeiten wurde zu Beginn eine gesamte Abflussmenge von rund 50 l/s erreicht. An der Oberfläche wurden dadurch Setzungsbeträge von bis zu einem halben Meter bewirkt (Abb. 66).

Abb. 66 > A. Vertikale Bewegungen (in mm/Jahr) gemessen während eines Jahres in der Beschleunigungsphase von 1993. B. Durch die Drainage bewirkte Setzungen mit Beträgen bis über einen halben Meter direkt oberhalb des Stollens

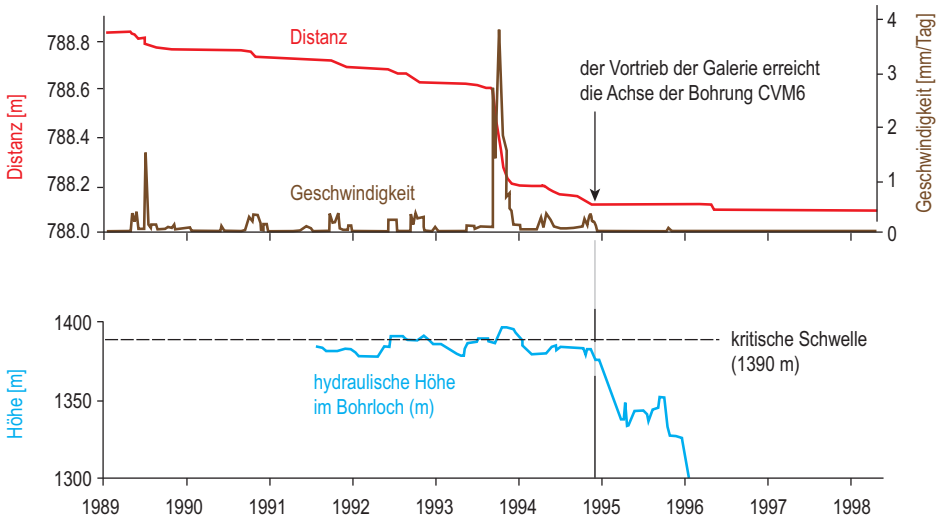
Diese Setzung stellt eine Konsolidierung dar, welche neben der Reduktion des Drucks und der Ablenkung der Perkolationskräfte eine zusätzliche stabilisierende Wirkung erzeugt.



Die Rutschung konnte auf diese Weise saniert werden. Kontrollmessungen werden durch die zuständigen Stellen des Kantons sichergestellt. In von der Stollenwand aus abgeteuften, kurzen Bohrungen von 15 bis 30 m Länge wurden Manometer installiert; diese ermöglichen die Kontrolle des Porendrucks in den Klüften des anstehenden Fels. In den von der Oberfläche aus abgeteuften Sondierbohrungen erlauben montierte Mehrfachpiezometer die Beobachtung des Wasserdrucks an verschiedenen Stellen und in den drei Dimensionen sowohl in der Gleitmasse als auch im anstehenden Fels (Abb. 68). 2007 ging die Abflussmenge am Ausgang des Stollens auf rund 30 l/s zurück. Seither wurde keine Reaktivierung mehr beobachtet.

Abb. 67 > Verschiebungen – gemessen mit einem automatischen Theodoliten –, Rutschgeschwindigkeiten und gemessener Druck in der Sondierbohrung CVM6 (s. Abb. 64)

Man beobachtet eine klare Korrelation zwischen dem Überschreiten einer kritischen Druckschwelle (1390 m) und der Beschleunigung der Bewegungen. Die Wirkung der Drainage ist offensichtlich: Die hydraulische Höhe ging auf Werte zurück, welche deutlich unter der kritischen Schwelle liegen; gleichzeitig sind Bewegungen kaum mehr feststellbar. Die ausgeprägte Beschleunigung im Herbst 1993 wurde durch Starkniederschläge auf der Alpensüdseite ausgelöst.



geändert nach Eberhardt et al. 2007

Baukosten

Der Entwässerungsstollen und die strahlenförmig angeordneten Drainagebohrungen kosteten rund 12 Mio. Franken; davon entfielen rund 10 % auf die Bohrungen. Die Betriebskosten sind bescheiden und beschränken sich auf die Überwachung und Wartung der Rohrleitungen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass aus Sicherheitsgründen Reparaturen an der Betonverkleidung nötig werden. Eine Revision der Einrichtungen, Tore, Rinnen, Rohrleitungen und Kanäle muss ebenfalls periodisch ins Auge gefasst werden. Falls nötig, zum Beispiel wenn eine hohe Anzahl an Drainagebohrungen wegen Korrosion oder Ablagerungen nicht mehr funktioniert, könnten mit vertretbarem Aufwand neue Bohrungen realisiert werden. Dabei kämen gleichzeitig verbesserte Bohrtechniken für hohe Druckverhältnisse, wie sie beim Bau der Alpentransversalen zum Einsatz kommen, in Frage.

Bilanz der Sanierung

Die für die Sanierung der von der grossen Rutschung ausgehenden Risiken gewählte Methode hat sich, zumindest in diesem konkreten Umfeld, als höchst wirksam erwiesen. Die Oberflächendrainage durch Sammelgräben, welche das Oberflächenwasser aufnehmen und es an der Versickerung hindern sollten, hat die Stabilität der kleinen, lokalen oberflächlichen Rutschungen verbessert, hatte aber keinerlei Einfluss auf die hydrogeologischen Verhältnisse in der Tiefe. Von diesen ist das oberflächennahe

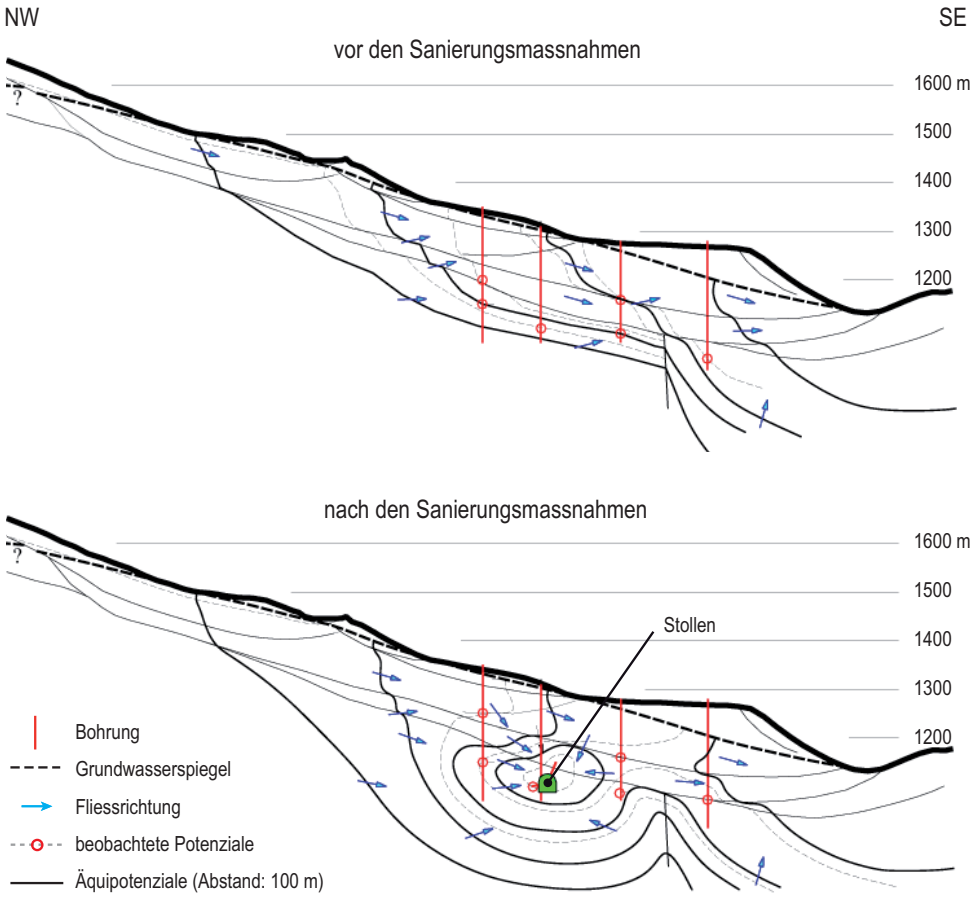
Grundwasser nämlich praktisch abgekoppelt (Abb. 65 und Abb. 68). Während es unmittelbar auf Niederschlagsereignisse reagiert und entsprechend von direkt in die Rutschung einsickerndem Wasser gespiesen wird, werden die tiefen Grundwasserleiter von weit ausserhalb der Rutschung angereichert. Dies wird durch die hydrochemischen und isotopischen Schwankungen des Wassers belegt.

Da das Ziel war, so nah wie möglich an der Scherzone auf den Porenwasserdruck einzuwirken, bot die Tiefendrainage drei vorteilhafte Wirkungen:

> Auswirkung auf die Drücke selber, indem so die effektive vertikale Spannung im Gestein vergrössert wird;
> Auswirkung durch eine Konsolidierung, welche die mechanischen Widerstandsparameter verbessert;
> Auswirkung durch eine Umlenkung der Perkolationskräfte nach unten, direkt auf Scherflächen.

Abb. 68 > Auswirkung der Drainage auf die hydrodynamischen Verhältnisse in der Gleitmasse und im anstehenden Fels, wie sie aufgrund von piezometrischen Messungen abgeschätzt werden kann

Die Äquipotenziale und die Fliessrichtungen werden umgelenkt. Die stabilisierende Wirkung ist deshalb nicht allein der Reduktion der Porenwasserdrücke zu verdanken, sondern auch der vorteilhaften Neuorientierung der Perkolationskräfte.



geändert nach Eberhardt et al. 2007

Auch die Möglichkeit, artesische Brunnen einzusetzen, wurde ins Auge gefasst. Diese erlauben es jedoch nur, die artesischen Überdrücke bis auf Geländeniveau abzusenken. Hinzu kommt, dass die Bauten mit rund 150 bis 300 m sehr tief hätten sein müssen, um die Bereiche im Untergrund zu erreichen, in welchen die grössten Verschiebungen stattfinden. Der Einsatz von Pumpen hätte eine heikle Wartung zur Folge gehabt und höhere Betriebs- und Überwachungskosten erzeugt. Demgegenüber hat es der Entwässerungsstollen zusammen mit den Drainagebohrungen möglich gemacht, die Drücke durch simple Schwerkraft unmittelbar um einige hundert Meter abzusenken, dies mit insgesamt bescheidenen Abflussmengen.

Literaturhinweise

Bonzanigo L. 1999: Lo Slittamento di Campo Vallemaggia. Thèse de doctorat ETHZ n° 13387, Zürich. http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:23420

Bonzanigo L., Eberhardt E., Loew S. 2007: Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock – Part 1: Geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide. Canadian Geotechnical Journal: 44 (10): 1157–1180.

Eberhardt E., Bonzanigo L., Loew S. 2007: Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock – Part 2: Mitigation measures and numerical modelling of deep drainage at Campo Vallemaggia. Canadian Geotechnical Journal: 44 (10): 1181–1199.

> Verzeichnisse

Abbildungen

Abb. 1
Rotationsrutschung (A) und Translationsrutschung (B) 11

Abb. 2
Zeitlicher Verlauf der Bewegung bei verschiedenen Rutschungstypen 11

Abb. 3
Auswirkung der Reduktion des Abflussquerschnitts (*S*) des Grundwassers in einer Rutschung mit freiem Grundwasserspiegel 15

Abb. 4
Dreidimensionale Darstellung einer Rutschung 16

Abb. 5
Schwankung der Durchlässigkeit innerhalb einer Rutschmasse in Abhängigkeit von der Bewegung 18

Abb. 6
Beispiel einer abrupten Erhöhung der Durchlässigkeit am Beispiel der Rutschung Chenaula (Kanton Waadt), die 1983 die Verbindungsstrasse von Lausanne nach Belmont zerstörte 18

Abb. 7
Präsenz von schwebendem Grundwasser in Hängen und Auswirkungen auf den unterirdischen Abfluss 19

Abb. 8
Zu- und Abflüsse eines Hang-Grundwasserleiters 21

Abb. 9
Karte des elektrischen Widerstands (RHOa), erstellt aus radiomagnetotellurischen Messungen im oberen Teil der Rutschung von Hohberg (Freiburger Voralpen) 23

Abb. 10
An Hanglage angepasster Lysimeter 23

Abb. 11
Mehrfachpiezometer bei mehreren Grundwasserleitern, mit Tonpfropfen isoliert 25

Abb. 12
Piezometrischer Artefakt wegen einer schlechten Abdichtung gegen Oberflächenwasser 26

Abb. 13
Platzierung einer Drucksonde in einem Bohrloch 27

Abb. 14
Die am Fuss der Rutschung austretenden Quellen werden von verschiedenen unterirdischen Zuflüssen mit unterschiedlichen Fliesswegen gespiesen. Sie bilden beispielsweise eine Mischung von unterschiedlichen Wässern, die durch die Rutschmasse (1 und 2) oder durch den stabilen Untergrund (3) fliessen können 30

Abb. 15
Inklinometrische Kurven 34

Abb. 16
Verteilung der hydrogeologischen Parameter eines Modells im Massstab der Rutschung (links) und im lokalen Bereich (rechts) 35

Abb. 17
Zwei 2-D-Schnittmodelle, jeweils in stationärem Zustand und unter gesättigten Fliessverhältnissen 35

Abb. 18
Hydrogeologische Modelle erlauben die Erstellung von Verhaltensszenarien des Grundwassers, die anschliessend in mechanische Modelle integriert werden, um daraus die Wirkung auf die Gleichgewichtsbedingungen des Hangs zu bestimmen 38

Abb. 19
Fortlaufende Entwicklung der Oberflächenbewegungen eines Punktes im aktivsten Teil der Rutschung Villarbeney (Freiburger Voralpen) zwischen Oktober 1983 und April 1985 und der Tagesniederschläge, die auf der Rutschung gemessen wurden 39

Abb. 20
Beziehung zwischen hydrogeologischen Parametern und Verschiebungen bei der Rutschung La Frasse (Kanton Waadt) 40

Abb. 21
Messungen der Oberflächenbewegungen der grossen Rutschung im Lumnez seit 1887 (30 km², Kanton Graubünden) 41

Abb. 22
Die Beziehung zwischen Niederschlägen und Bewegungen sollte in der Regel über ein beeinflussendes Element führen, das nicht umgangen werden kann: die unterirdischen Fliessverhältnisse 42

Abb. 23
Wirkung des Wassers auf die Stabilität eines Felskeils 44

Abb. 24
Beziehung zwischen der Saugkraft und der Kohäsion bei feinen Böden. Versuche an Ton aus der Kiesauswaschung der Region Sitten (Kanton Wallis) 45

Abb. 25
Vergleichendes Schema der wichtigsten hydrogeologischen Sanierungsmethoden 47

Abb. 26
Schema des Prinzips der Abdichtung von Bachsohlen 50

Abb. 27
Schema eines Drainagegrabens (im Profil und Verlegung im Grundriss) 51

Abb. 28
Beispiel einer Anwendung einer Wellpoint-Anlage 56

Abb. 29
Zwei Varianten von Entwässerungsstollen mit Drainage-bohrungen: Stollen mit grossem Querschnitt sowie Stollen mit kleinem Querschnitt und Bohrkammern 59

Abb. 30
Mittlere Jahresverdunstung des Zeitraumes 1973–1992 in der Schweiz 62

Abb. 31
Höhenprofile der mittleren Verdunstung in der Schweiz 63

Abb. 32
Rutschung La Frasse (Kanton Waadt): geologisches Profil im unteren Teil der Rutschung und Vergleich der Wirksamkeit von mehreren Massnahmenvarianten 70

Abb. 33
Hydrogeologische Skizze der Schweiz, mit Lokalisierung der Fallstudien 75

Abb. 34
Die Triesenberg-Flanke mit geologischem Modell und den Abgrenzungen der aktiven Rutschung sowie der Sackung im oberen Teil der Rutschung 76

Abb. 35
Geologischer Querschnitt durch die Rutschung von Triesenberg 77

Abb. 36
Resultate der kontinuierlichen Messungen: Inklinometer B5, Piezometer B8 und Quelle Q16 (Lokalisierung gemäss schematischer Karte unten rechts) 79

Abb. 37
Verschiebungsfelder übers Jahr, berechnet mit dem geomechanischen Modell 81

Abb. 38
Geografische Lage des Felssturzes Medji 83

Abb. 39
Dreidimensionale Darstellung der Geologie im Projektbereich 84

Abb. 40
Fotos des sich in Bewegung befindenden Felskopfes «Untere Spissplatte» vor dem Abbruch (A. August 2002) und nach dem Abbruch (B. November 2002) 85

Abb. 41
Hydraulisches Potenzial im Felsmassiv mit 2-D- und 3-D-Modell berechnet 86

Abb. 42
A. Geografische Lage der Rutschung. B. Luftaufnahme der Rutschungen und Verlauf der Murgänge bis zum Talgrund (Situation 1999) 89

Abb. 43
A. Situationsplan mit den zwei Drainagenetzen für das Oberflächenwasser (oberes Netz mit den Suonen ARMCO und unteres Netz mit den Suonen La Merdassière) sowie der Lage der Bohrungen. B. Situationsplan der Drainagen und Bohrungen oberhalb der Rutschung von Le Grand Tsâble 91

Abb. 44
Sanierung der Suone La Merdassière Ost (2004): Detail der Massnahmen, die getroffen wurden, um die Sohle der Suone abzudichten und die feuchten instabilen Bereiche zu entwässern 92

Abb. 45
Einfluss der Entwässerung durch die Bohrung FI19 auf den Stand des tief gelegenen Grundwasserleiters (AqProf) 93

Abb. 46
Anrisszone der Spontanrutschung Binu 96

Abb. 47
Situationsplan und geologisches Profil der Rutschung Binu 97

Abb. 48
Anrisszone beim Bau der rückwärtigen Nagelwand und des oberen Brückenwiderlagers (Mitte) 98

Abb. 49
Wiederhergestellter relativ steiler Böschungsbereich mit einem vernagelten Geo-Raumgitter als Oberflächen-erosionsschutz 99

Abb. 50
A. Allgemeine Situation. B. Übersichtsfoto mit Umgrenzung der Rutschung und Lage sowie Nummer der Reflektoren (blaue Kreise) 101

Abb. 51
Geologische Situation mit ausgeführten Sanierungs-massnahmen 102

Abb. 52
Ganglinien der Bewegungsgeschwindigkeiten (oben) und Meteodaten (unten) 104

Abb. 53
Drainagemassnahmen: Offene Sammelgräben und Drainagegräben 105

Abb. 54
A. Geografische Lage. B. Blick aus der Rhoneebene auf die Rutschung 107

Abb. 55
Blockdiagramm der Rutschung 108

Abb. 56
A. Unterteilungen der Rutschung, Lokalisierung der identifizierten Grundwasserleiter und Lage der Bohrungen. B. Zentrale Zone von Epène: Lokalisierung der Grundwasserleiter, der Pumpanlagen und der Drainagebohrungen DF-1 und DF-2 109

Abb. 57
A. Einflüsse des Abpumpens im Filterbrunnen GS3-bis auf die benachbarten Piezometer. B. Zone Le Verfi: Karte der Absenkung des Wasserspiegels infolge Pumpens im Filterbrunnen GS3-bis 110

Abb. 58
Geologisches Profil entlang der Drainagebohrung DF-1 und hydrogeologische Situation 111

Abb. 59
Rutschung von Arveyes: Standorte der Filterbrunnen und der Sondierbohrungen 113

Abb. 60
Längsprofil durch den stabilisierten Bereich der Rutschmasse (Situation Schnitt A–A': s. Abb. 59) 114

Abb. 61
Instabilitätskarte vor den Sanierungsarbeiten mit der Verteilung der Geschwindigkeiten 115

Abb. 62
Flowmetertest im Filterbrunnen P9 116

Abb. 63
Inklinometerdaten in den Sondierbohrungen Arv2, Arv5 und Arv7 zwischen 1982 und 1987; kumulierte horizontale Verschiebungen in mm 117

Abb. 64
Längsprofil durch die Rutschung 120

Abb. 65
Entwicklung des Porendrucks mit zunehmender Tiefe, wie er mit verschiedenen Sondierungen aufgezeigt wurde (10 m Wassersäule = 1 bar) 121

Abb. 66
A. Vertikale Bewegungen (in mm/Jahr) gemessen während eines Jahres in der Beschleunigungsphase von 1993. B. Durch die Drainage bewirkte Setzungen mit Beträgen bis über einen halben Meter direkt oberhalb des Stollens 122

Abb. 67
Verschiebungen – gemessen mit einem automatischen Theodoliten –, Rutschgeschwindigkeiten und gemessener Druck in der Sondierbohrung CVM6 (s. Abb. 64) 123

Abb. 68
Auswirkung der Drainage auf die hydrodynamischen Verhältnisse in der Gleitmasse und im anstehenden Fels, wie sie aufgrund von piezometrischen Messungen abgeschätzt werden kann 124

Tabellen

Tab. 1
Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Rutschungen, Erosion und Murgängen, nach *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald – NaiS* 65

Tab. 2
Vor- und Nachteile der wichtigsten Drainagemassnahmen oder -techniken (gemäss Abb. 25 A bis D) mit Angabe des günstigsten Kontexts, in dem sie eingesetzt werden können 66

Tab. 3
Typisches Bewegungsverhalten eines Messpunktes während der Schlussphase der Felsrutschung 84

Tab. 4
Komponente des Mess- und Überwachungsdispositivs 87

Tab. 5
Niederschlagssummen [mm] der letzten 5/3/1 Tage vor der Rutschung vom 18. August 2003 97

Tab. 6
Kosten der Sanierungsmassnahmen 99