

Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie
Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure;
Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie
Band: 3 (1998)
Heft: 1

Artikel: Geologische Naturgefahren in der Schweiz = Dangers géologiques en Suisse = Pericoli geologici naturali in Svizzera
Autor: Keusen, H.R. / Bollinger, D. / Lateltin, O.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-220733>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Geologische Naturgefahren in der Schweiz

Dangers géologiques en Suisse

Pericoli geologici naturali in Svizzera

ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE UND NATURGEFAHREN (AGN)

Vorwort	4
Geleitwort	5
Einführung, Introduction, Introduzione	6-9

Allgemeiner Teil:

1. H.R. KEUSEN, D. BOLLINGER, O. LATELTIN & CH. BEER: Massenbewegungen und ihre geologische Beurteilung	11-28
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

Fallbeispiele:

1. O. FRANÇAIS & O. LATELTIN: Les laves torrentielles de Villeneuve du 13/14 août 1995 ..	29-36
2. F. NOVERRAZ: Le glissement de Cergnat - La Frasse (VD)	37-47
3. A. PARRIAUX: Glissement de la Cornalle	49-56
4. P. JORDAN: Murgang von Selzach 1970	57-65
5. D. BOLLINGER: Einzugsgebiet der Gürbe im Gebirge (Berner Voralpen)	67-73
6. H. R. KEUSEN: Das Steinschlaggebiet Abendberg / Eyewald im Diemtigtal Risikoanalyse und Schutzmassnahmen	75-82
7. P. HALDIMANN: Das Rutschgebiet Bodmi, Gigentäl (UR)	83-88
8. H. R. KEUSEN: Die Bergstürze auf der Sandalp 1996 - Risikobeurteilung und Gefahrenmanagement	89-102
9. P. HALDIMANN: Der Felssturz von Amden vom 21. Januar 1974	103-110
10. L. BONZANIGO: Lo slittamento di Campo Vallemaggia	111-120
11. A. BAUMER & A. COLOMBI: Caduta massi sulla N2 a Rodi	121-129
12. D. BOLLINGER: Rutschungs-/Sackungsgebiet Halteli, Turbachtal (BE)	131-136
13. T. LARDELLI: Rutschungen im Tavetscher Zwischenmassiv, Vorderrheintal (Graubünden)	137-144
Leitbild der Arbeitsgruppe AGN	145-149

Vorwort

Die zunehmende Bedeutung der Naturgefahren in der Schweiz hat den Vorstand der Schweizerischen Fachgruppe für Ingenieurgeologie SFIG im Jahr 1996 veranlasst, die «Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren» AGN zu gründen. In diese Arbeitsgruppe wurden Geologen aus der Verwaltung von Bund und Kantonen, aus der Hochschule und aus privaten Beratungsbüros berufen. Es handelt sich um Fachleute, welche aufgrund ihrer Erfahrung und Stellung eine besondere Kompetenz bei der Beurteilung des Problemkreises Naturgefahren / Massenbewegungen besitzen.

Die AGN befasst sich vor allem mit folgenden grundsätzlichen Fragen:

- Früherkennung von Naturgefahren, insbesondere Massenbewegungen, und deren geologische Beurteilung,
- Gefahrenkartierungen,
- Überwachung und Gefahrenmanagement,
- Massnahmenplanung zur Verhinderung und zum Schutz,
- Ausbildung von Studenten und Fortbildung von Fachkräften, mit Schwergewicht auf geologischen Fragestellungen.

Im Bewusstsein um die interdisziplinären Problemstellungen auf diesem Gebiet arbeitet die AGN eng mit Fachleuten anderer Fachrichtungen, wie Forst- und Wasserbau, Geomorphologie und Ingenieurwesen zusammen. Sie ist bestrebt, innerhalb dieser Kreise Fachwissen auszutauschen und zu vermitteln und dabei die professionellen Anliegen der Geologen einzubringen. Sie ist zu diesem Zweck auch in Fachgremien wie der «Forstlichen Arbeitsgruppe Naturgefahren» FAN oder in der «Nationalen Plattform Naturgefahren» PLANAT des Bundes vertreten.

Ein wichtiges Ziel der Fachgruppe ist die Förderung des Fachwissens unter Geologen und deren Fortbildung, im Hinblick auf eine einheitliche und kompetente geologische Bearbeitung des Problemkreises der Naturgefahren und auf einen hohen Qualitätsstandard.

Die vorliegende Schrift will gleichermassen Geologen wie Fachleute aus verwandten Wissenschaften, Vertreter von kantonalen und kommunalen Verwaltungen und Praktiker, welche mit Naturgefahren konfrontiert sind, ansprechen, indem sie die Bedeutung der Geologie bei der Bearbeitung, Beurteilung und insbesondere bei der Analyse der Ursächlichkeit von Naturgefahren aufzeigt.

Verfasser der Schrift sind verschiedene Mitglieder der AGN. Einen massgebenden finanziellen Beitrag an die Druckkosten haben die Schweizer Rück und der Interkantonale Rückversicherungsverband (IRV) geleistet, denen an dieser Stelle für ihre Unterstützung herzlich gedankt sei.

DR. P. HALDIMANN, Präsident SFIG
DR. H.R. KEUSEN, Präsident AGN

Geleitwort

Der Umgang mit Naturgefahren ist eine der anspruchsvollen Aufgaben, die sich den Menschen im Alpenraum stellen. Massenbewegungen, also Rutschungen, Absenkungen, Bergstürze und Felsstürze sind im Vergleich mit anderen Naturereignissen zwar selten, in ihrem Gefährdungspotential und ihrem Verhalten sind sie aber schwieriger zu beurteilen. Systematisches Vorgehen zu ihrer Bewältigung ist deshalb wichtig.

Zunächst werden Instrumente benötigt, mit denen sich Wahrscheinlichkeit und Schadenausmass von möglichen Ereignissen einschätzen lassen. Dafür ist ein gutes Verständnis der in der Natur ablaufenden Prozesse notwendig. Ebenso wichtig ist es, die Schadenempfindlichkeit der bedrohten Werte zu kennen. Schadendaten der Versicherer können dazu einen Beitrag leisten. Die Raumplanung hilft, bedrohte Gebiete zu meiden. Mit baulichen Massnahmen lassen sich Gefahrenpotentiale vermindern. Versicherungslösungen helfen, die finanziellen Folgen von dennoch auftretenden Ereignissen zu bewältigen.

Dem Staat, der Wirtschaft und den Individuen kommt die Aufgabe der Schadenprävention zu. Schutzmassnahmen lassen sich oft nur von grösseren Gemeinschaften realisieren, und sie schaffen nicht nur Schutz und damit Nutzen, sondern sie verursachen auch Kosten. Schadenprävention ohne Ausgleich der verschiedenen Interessen ist darum nicht möglich. Hier liegt die Aufgabe der Politik. Versicherer und Rückversicherer schliesslich können erst dann zu tragbaren Prämien umfassenden Versicherungsschutz anbieten, wenn wirtschaftliche Massnahmen zur Schadenprävention ergriffen wurden.

Am Anfang jeder Beschäftigung mit Naturgefahren – und dies gilt für Staat, Politik und Versicherungswirtschaft gleichermassen – muss jedoch das Erkennen und Beurteilen von Gefahren stehen. Die vorliegende Schrift möge dazu in bezug auf Massenbewegungsgefahren einen Beitrag leisten.

MICHAEL KOHLER
Kommission für Elementar-
schadenverhütung der
kantonalen Gebäudeversicherer

JAKOB EUGSTER
Schweizerische Rückversicherungs-
Gesellschaft



Einführung

Die fortschreitende bauliche Entwicklung unseres Landes führt zu einer zunehmenden Exposition von Sachwerten und Menschen gegenüber den Naturgefahren. Das Schadenpotential wächst und die Verletzlichkeit von Werten wird grösser. Gleichzeitig beobachtet man in der Bevölkerung eine abnehmende Risikoakzeptanz. Naturgefahren sind heute ein häufiges Thema in Politik und Medien.

Die vorliegende Dokumentation präsentiert Fallbeispiele von Massenbewegungen in den Schweizer Alpen, die sich in den letzten 20 Jahren ereignet haben. Es ist dabei nicht die Absicht, möglichst spektakuläre Ereignisse zu beschreiben. Vielmehr geht es darum, interessante, «lehrreiche» Fälle zu präsentieren, die auch für Alltagsereignisse repräsentativ sind. Sie sollen in erster Linie die Bedeutung von fundierten geologischen Grundlagen für nachvollziehbare Gefahrenbeurteilungen und Risikobewertungen illustrieren. Der Leser findet einen mehr oder weniger einheitlichen, systematischen Aufbau der kurz gehaltenen Beschreibung vom Ereignis zur Gefahren- und Risikobeurteilung bis hin zur Massnahmenplanung. Die Orte der Ereignisse sind in einer geologischen Übersicht (Fig. 1) und Tabelle 1 dargestellt. Für die einzelnen Fallbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich. In einem allgemeinen Vorspann wird kurz auf einige generelle Aspekte von Massenbewegungen und ihre geologische Bearbeitung eingegangen.

Das Glossar am Schluss des allgemeinen Teils erläutert ausgewählte Begriffe im Zusammenhang mit Naturgefahren.

H.R. KEUSEN (Hrsg.)

Introduction

Les zones habitables se sont fortement développées ces dernières années dans notre pays et ont conduit à une augmentation croissante de l'exposition des vies humaines et des biens matériels face aux dangers naturels. Le potentiel de dégâts augmente tout comme la vulnérabilité des biens de valeur notable. Parallèlement, on peut observer une acceptation décroissante des risques auprès de la population. Les dangers naturels sont devenus aujourd'hui un thème d'actualité dans la presse et les milieux politiques.

Cette publication présente des cas concrets de mouvements de terrain qui se sont produits ces vingt dernières années dans les Alpes suisses. Ce ne sont pas des évé-

nements spectaculaires mais plutôt des phénomènes qui peuvent survenir chaque jour. Sous une forme plus ou moins harmonisée, le lecteur trouvera une description des différents cas qui débutent par une analyse du danger et l'évaluation des risques jusqu'à la planification des mesures d'assainissement. La localisation de ces événements est proposée sur un fond géologique (Fig. 1) et sous la forme d'un tableau synthétique.

Les auteurs sont seuls responsables du contenu du texte et des illustrations des différents cas présentés. Quelques aspects des mouvements de terrain et l'apport de la géologie sont présentés dans la première partie. Un glossaire en annexe permet d'explicitier les différents termes utilisés dans cette publication, en relation avec les dangers naturels.

H.R. KEUSEN (ed.)

Introduzione

L'espansione edilizia del nostro paese comporta un aumento progressivo del numero di persone e di manufatti esposti a pericoli naturali. Cresce il potenziale dei danni e la vulnerabilità dei beni aumenta. Nel medesimo tempo si deve constatare nella popolazione una sensibile diminuzione dell'accettabilità del rischio. I pericoli naturali sono così diventati un argomento che politici e mass media affrontano sempre più spesso e volentieri.

La presente documentazione illustra esempi di movimenti di massa nelle alpi svizzere avvenuti negli ultimi due decenni. L'intesa degli editori non era quella di presentare eventi particolarmente spettacolari ma di descrivere casi istruttivi che rientrino nella normale quotidianità. Con una più o meno uniforme e sistematica struttura dei singoli articoli è presentata la descrizione dell'evento, segue una valutazione del pericolo e del rischio e infine una pianificazione delle misure di remedio. L'ubicazione dei luoghi dei casi presentati è indicata alla fig. 1 con una carta geologica sinottica e con una tabella. Per il contenuto dei singoli articoli sono responsabili i relativi autori. In una introduzione vengono trattati in modo sommario alcuni aspetti generali dei movimenti di massa e il loro significato geologico.

Nel glossario dell'appendice della parte introduttiva vengono spiegati alcuni concetti relativi ai pericoli naturali.

H.R. KEUSEN (ed.)

Tab. 1: Dargestellte Fallbeispiele von Massenbewegungen

Nr.	Ort	Ereignis(se)	Prozr(ss)(e)	Höhe ü.M. Anriss	Höhe m ü.M. Ablagerung	Volumen [Mio m³]	Schadenpotential	Massnahmen
1	Villeneuve (VD)	13.8.1995	Murgang	1'770	370	0.05	Industriequartier Autobahn Kulturland	Verbauungen Geschiebesammler
2	La Frasse (VD)	permanent	Rutschung	1'400	820	60	Strasse Wohngebäude	Entwässerungen Stützmauer
3	La Cornalle (VD)	permanent	Rutschung	750	370	8	Autobahn SBB	Entwässerungen spezielle Grün- dungspfeller
4	Selzach (SO)	21.4.1970	Rutschung Murgang	1'200	420	Murgang 0.1 Total 0.2	Siedlung (Selzach)	Entwässerung Überwachung Raumplanung
5	Gürbe (BE)	permanent, Katastrophen- Hochwasser 29.7.1990	div. Rutschungen gesamtes Gebiet Hochwasser Murgang	1'600	630	Murgang- potential 0.1	Siedlungen Verkehrswege Kulturland	Murgangleitdämme Sperrn forstl. Pflegemass- nahmen
6	Diemtigtal (BE)	1962, 1994	Bolckschlag	1'800	1'000	Einzelblöcke	mehrere Wohnhäuser	Schutzdamm Raumplanung
7	Gigental (UR)	—	Rutschung Bachstau- und Murganggefahr	720	560	unbestimmt	Gehöfte, Alpwirtschaft Verkehrswege	Entwässerungen Bachumleitung
8	Sandalp (GL)	24.1.1996 3.3.1996	Bergsturz Hochwasser	2'300	1'300	2.2	Hochwasser im Tal	Scheitelkanal, Überwachung
9	Amden (SG)	21.1.1974	Felssturz	940	540	0.06	Verbindungsstrasse Überflutung infolge Flutwellen	Überwachung Gefahren- management
10	Campo (TI)	—	Rutschung	2'100	1'020	1'000	4 Siedlungen	Entwässerung Überwachung
11	Rodi (TI)	24.2.1990	Blockschlag	1'150	941	Einzelblöcke	Nationalstrasse	Räumung Verankerung
12	Turbach (BE)	1987 starke Aktivierung	Rutschung/Sackung Blockschlag	1'520	1'370	unbestimmt	8 Gebäude Verbindungsstrasse Kulturland	Auffangdamm Steinschlagnetze
13	Tavetsch (GR)	permanent, z.T. 1983 - 1990 beschleunigt	Rutschungen	1'550		aktiv 0.2 langsam 0.5 substabil 5	Kantosstrasse Furka-Oberalp-Bahn	Anker, Pfähle, Drainagebohrungen, Grünverbau

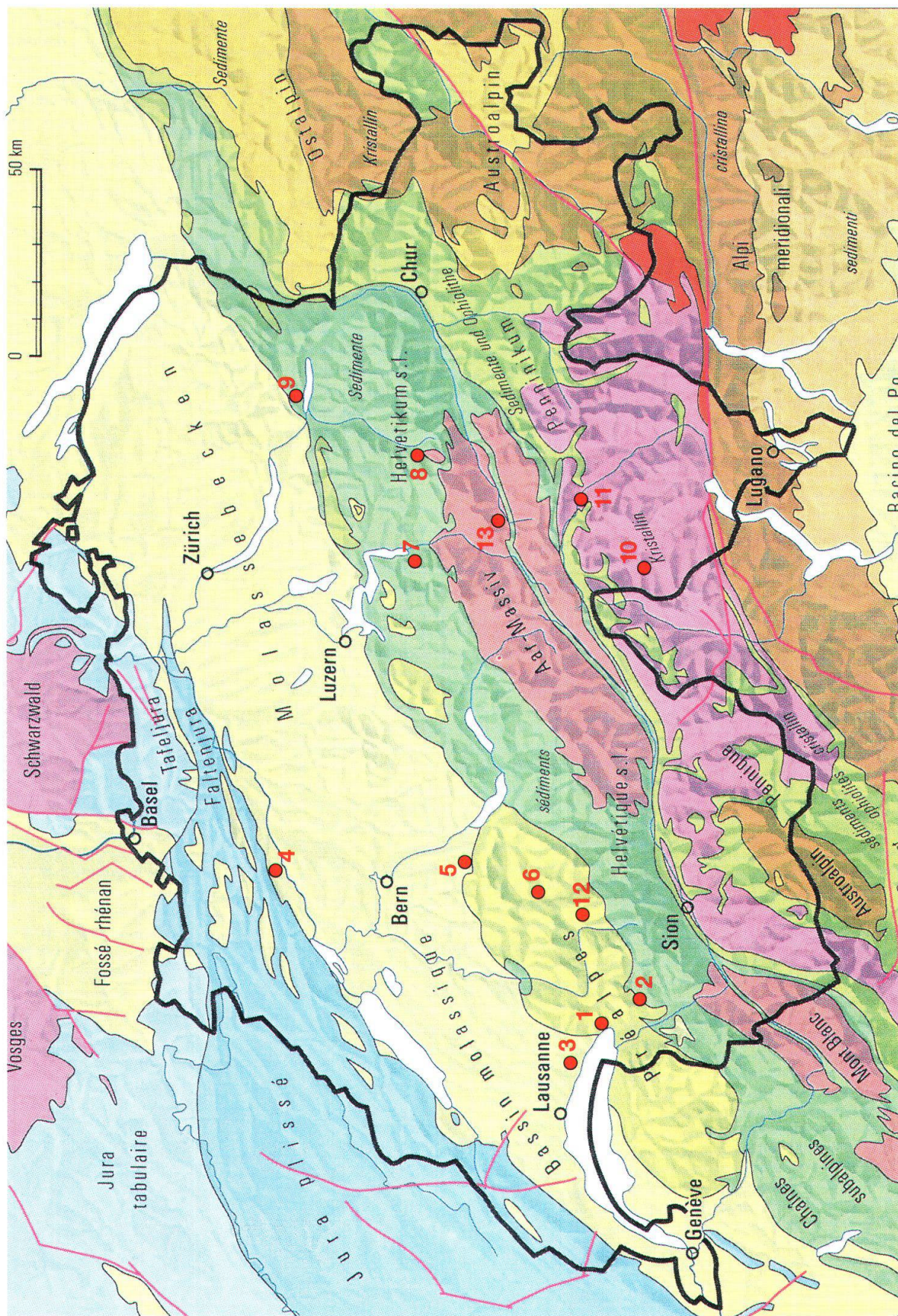


Fig. 1: Die dokumentierten Fallbeispiele in der geologischen Übersicht (Geologische Grundlage: LHG Bern©)

Allgemeiner Teil:

Massenbewegungen und ihre geologische Beurteilung

HANS RUDOLF KEUSEN¹⁾, DANIEL BOLLINGER²⁾, OLIVIER LATELTIN³⁾
und CHRISTOPH BEER³⁾

1. Bedeutung der geologischen Naturgefahren in der Schweiz

Unter geologischen Naturgefahren werden Ereignisse verstanden, welche durch geologische Ursachen und Vorgänge charakterisiert sind. Es sind dies:

- a) Erdbeben
- b) Vulkanausbrüche
- c) Bodenbewegungen (Rutschungen, Absenkungen)
- d) Bergstürze, Felsstürze, Block- und Steinschlag
- e) (Murgänge)

Die gravitativen Vorgänge c - e werden auch als Massenbewegungen bezeichnet, wobei Murgänge kausal eine ausgeprägt meteorologisch-hydrologische Komponente haben.

Gemäss dem Bericht «Katastrophen- und Notlagen in der Schweiz» (Bundesamt für Zivilschutz 1995, «KATANOS») haben Massenbewegungen (ohne Murgänge) nur einen Anteil von etwa 1 % des gesamten gewichteten Risikos aller Naturgefahren. Erdbeben und Hochwasser, auf welche hier nicht weiter eingegangen wird, machen dagegen 50 % resp. 15 % aus. Obschon Erdbeben seltene Ereignisse sind und im Bewusstsein der schweizerischen Bevölkerung kaum als Gefahr empfunden werden, ist das hier bestehende Risiko wegen des grossen Wirkungsraumes und damit immensen Schadenpotentials (100 Mia CHF monetarisierter Gesamtschaden bei einem Erdbeben mit der Stärke des Basler Bebens von 1356) erheblich.

Das von Massenbewegungen ausgehende Risiko ist dagegen relativ gering, weil die Schäden meist vergleichsweise klein sind. Im Empfinden des Menschen werden solche Ereignisse trotzdem stark wahrgenommen. Sie sind häufig und die Medien greifen die Vorkommnisse gerne auf. Gerade Massenbewegungen können aber durch ein wirksames Gefahrenmanagement relativ gut beherrscht werden.

¹⁾ Geotest AG, Birkenstrasse 15, 3052 Zollikofen

²⁾ Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern

³⁾ Landeshydrologie und -geologie, 3003 Bern



Fig. 1: Bergstürze Sandalp (Kanton Glarus): Schuttkegel der Bergstürze vom 24. Januar und 3. März 1996

Ausbruchvolumen: 0.5 und 1.8 Mio m³

Sturzhöhe 900 m, Pauschalgefälle 35°

Ablagerungsvolumen: 3 Mio m³

Die stark strukturierte Ablagerung ist auf der Seite des Ausgleichsbeckens durch einen scharfen Stauchwulst begrenzt. Bereits wenig intensive Niederschläge führen zu markanten Erosionsrinnen.

Foto H.R. Keusen

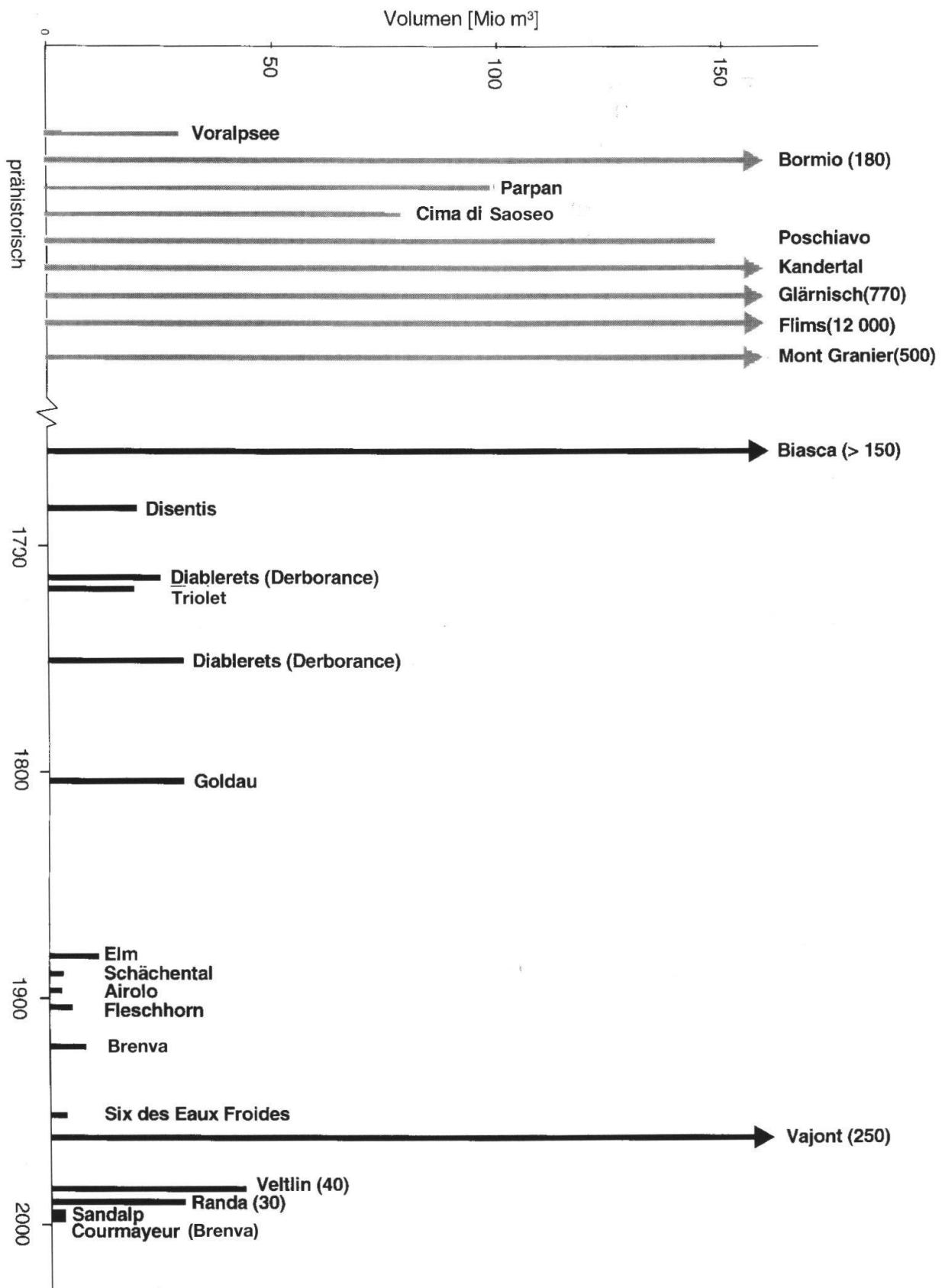


Fig. 2: Bergstürze in den Alpen

Die historische Rückschau auf die grossen Bergsturzereignisse in den Alpen zeigt Überraschendes: Immerhin sind hier in den letzten 300 Jahren 16 solche Ereignisse bekannt (siehe Fig. 1 und 2). Ihre Zahl ist wahrscheinlich grösser, weil Bergstürze in abgelegenen Tälern nicht überliefert wurden. Dazu kommen eine ganze Reihe sehr grosser prähistorischer Bergstürze, welche heute aufgrund geologischer Evidenzen nachkonstruiert werden können. Durchschnittlich ereignet sich in den Alpen ca. alle 20 Jahre ein Bergsturz.

Die Alpen sind als sehr junges und immer noch in Hebung begriffenes Gebirge übersteil und entsprechend instabil. Der die Talflanken entlastende Rückzug der Gletscher ist ein zusätzlicher, Instabilitäten begünstigender Faktor. Massenbewegungen sind im Alpenraum deshalb allgegenwärtig. Sie gefährden Menschen und Sachwerte, deren Wert durch die fortschreitende Erschliessung des Alpenraums zunimmt.

Der Gesetzgeber trägt dieser Erkenntnis Rechnung. Er fordert die Kantone mit Gesetzen auf, Massnahmen zum Schutz vor Naturereignissen zu ergreifen (Waldgesetz 1991, Wasserbaugesetz 1991, Raumplanungsgesetz 1979). In der Folge hat der Bund Empfehlungen zur Berücksichtigung von Naturgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten veröffentlicht (BWW, BUWAL, BRP 1997).

2. Begriffe, Definitionen

2.1 Massenbewegungen

Bei Massenbewegungen handelt es sich um bruchhafte oder bruchlose, unter der Wirkung der Schwerkraft hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fest- (Fels) und/oder Lockergesteinen. Sie sind in ihrer Entstehung sehr komplex und beruhen selten auf nur einer Ursache.

Der Ablauf und die Dynamik von Massenbewegungen können durch die Grundmechanismen Fallen, Gleiten und Fliessen beschrieben werden, wobei oft Übergänge oder Kombinationen davon auftreten.

Die geologischen Gegebenheiten und insbesondere die nacheiszeitliche Entwicklung des Reliefs beeinflussen die Grunddisposition für Hanginstabilitäten massgeblich. Während die eiszeitlichen Gletschervorstösse die Alpentäler trogförmig ausschiffen, blieben nach dem Zurückschmelzen des stützenden Eises oft übersteilte und instabile Talflanken zurück.

Massenbewegungen beruhen auf ungünstigen Veränderungen des Kräftegleichgewichtes (Verhältnis der rückhaltenden und treibenden Kräfte) infolge physikalischer Prozesse, welche durch verschiedene Faktoren gesteuert werden. So beeinflussen langfristig wirksame Verwitterungsvorgänge wie auch die Schwankungen des Grundwasserspiegels die Stabilität eines Hanges kontinuierlich. Ein Hang kann indessen auch kurzfristig destabilisiert werden, sei es infolge der Erosion des Hangfusses durch ein Fliessgewässer, starke Niederschläge oder durch ein Erdbeben. Nicht selten werden Hanginstabilitäten durch anthropogene Einflüsse begünstigt (Hanganschnitte, Erhöhung des Hangwasserspiegels, Entwaldung etc.).

Stabilitätsberechnungen dokumentieren, dass Wasser ein äusserst wichtiger kausaler Faktor von Massenbewegungen ist, da dieses sehr grosse Kräfte aufbauen kann. Porenwasser- oder Kluftwasserdruck sind oft auslösende Momente für Massenbewegungen.

2.2 Verschiedene Erscheinungsformen von Massenbewegungen

Sturzprozesse

Sturzprozesse sind schnelle Massenbewegungen, bei welchen das längs Trennflächen (Schicht-, Schieferungs-, Kluft- oder Bruchflächen) aus dem Gebirgsverband ausgebrochene Material den grössten Teil des Weges in der Luft zurücklegt. Es werden drei Kategorien unterschieden: Block- und Steinschlag, Felssturz und Bergsturz. Sturzprozesse umfassen drei räumlich aufeinander folgende Prozessbereiche: das Ausbruchsgebiet, die Transitstrecke und das Ablagerungsgebiet (Fig. 3).

Steinschlag, Blockschlag:	Isolierte Sturzbewegungen (Fallen, Springen Rollen) von Einzelkomponenten bis mehrere Kubikmeter Grösse. Geschwindigkeiten bis 30 m/s.
Felssturz:	Beim Felssturz löst sich ein grösseres Gesteinspaket von 100 bis mehreren 100'000 m ³ und stürzt ab. Geschwindigkeiten bis 40 m/s.
Bergsturz:	Ein Bergsturz entsteht beim gleichzeitigen Loslösen grosser Gebirgsteile (1 Mio bis viele Mio m ³). Bewegungsmechanismus und Verlagerungsprozess werden durch die Topographie sowie die Interaktion zwischen den Gesteinsfragmenten bestimmt. Es werden Geschwindigkeiten von über 40 m/s erreicht. Die Transportdistanzen sind volumenabhängig und können infolge der geringen Pauschalgefälle beträchtlich sein und mehrere Kilometer betragen. In Gebirgstälern können die grossen Sturzmassen Bäche und Flüsse zurückstauen, was die Gefährdung durch katastrophale Überflutungen v.a. in talabwärts liegenden Gebieten zur Folge hat.

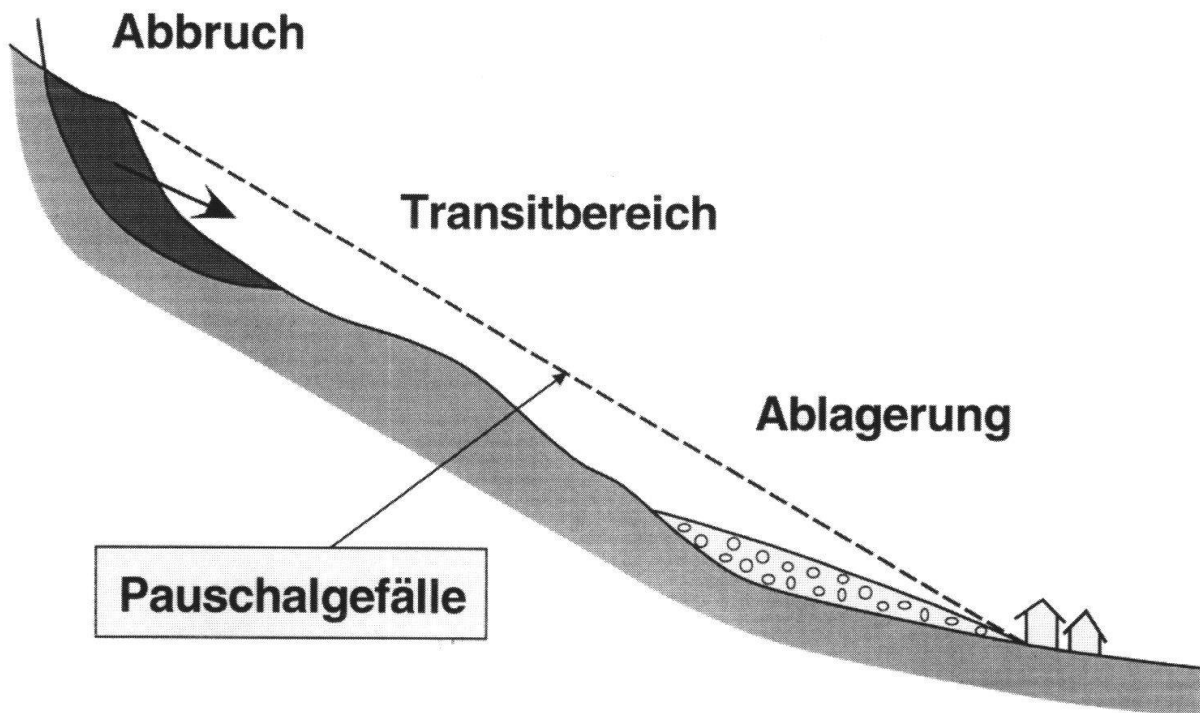


Fig. 3: Wirkungsbereiche von Massenbewegungen (Pauschalgefälle = Fahrböschung nach Heim 1932).

Rutschungen

Rutschungen sind hangabwärts gerichtete, gleitende Bewegungen von Hangbereichen aus Fest- und/oder Lockergestein. Sie sind das Ergebnis eines Scherbruches und treten im allgemeinen an mässig geneigten bis steilen Hängen und Böschungen auf. Natürliche Instabilitäten dieser Art sind in der Schweiz ausserordentlich häufig (8 % natürliche Geländeoberfläche) und weisen eine grosse Vielfalt von Erscheinungsformen auf. Sehr viele unter ihnen sind alt und heute weitgehend passiv, können aber bei ungünstigen Bedingungen plötzlich neu belebt werden. Bei Rutschungen spielt das Wasser meist eine wichtige Rolle, sei es durch die Wirkung von Porenwasserdrücken, von Sickerströmungen oder von Quelldrücken infolge des Quellens von Tonmineralien.

Die durchschnittlichen Bewegungsraten liegen bei substabilen bis schwach aktiven Rutschungen meist in der Grössenordnung von einigen mm, bei aktiven Rutschungen bei mehreren cm bis dm pro Jahr. Seltener treten auch bedeutend raschere Verschiebungen auf, welche unter Beibehaltung einer in sich kohärenten Rutschmasse mehrere Dezimeter pro Tag erreichen können. In Extremfällen können auch sehr rasche Verschiebungen erfolgen (z.B. Rutschung Falli-Hölly, August 1994: rund 6 m pro Tag).

Vereinfachend sind zwei Typen von Rutschungen zu unterscheiden, die **Rotations-** und **Translationsrutschung**. Die meisten der grossen Hangrutschungen sind eine Kombination dieser beiden Typen.

Translationsrutschungen: *In Translationsrutschungen gleiten Schichten oder Schichtpakete auf einer bestehenden Schwächezone (oft Felsoberfläche, Schicht-, Schieferungs-, Kluft- oder Bruchflächen). Die flächenmässige Ausdehnung solcher Rutschungen ist sehr variabel und kann Flächen von einigen m² bis zu mehreren km² umfassen. Die Mächtigkeit der Rutschmassen erreicht häufig mehrere Zehner von Metern. Gebiete mit Flysch, kalkigen Mergelschiefern oder metamorphen Schiefern sind prädestiniert für die Bildung solcher Rutschungen.*

Rotationsrutschungen: *Für Rotationsrutschungen charakteristisch sind mehr oder weniger sphärische Gleitflächen. Sie bilden sich hauptsächlich in homogenen Lockergesteinen aus. Rotationsrutschungen beinhalten im allgemeinen beschränkte Volumina und Mächtigkeiten und sind entsprechend von begrenzter räumlicher Ausdehnung.*

Rutschungen können nach der mutmasslichen Tiefenlage der Gleitfläche und der durchschnittlichen, langfristigen Geschwindigkeit (als Mass der Aktivität) der Bewegungen klassifiziert werden.

Bei der Beurteilung des Gefahrenpotentials von Rutschungen sind nicht allein Volumina, Bewegungsraten und auftretende Differentialbewegungen massgebend, sondern auch die Disposition zu Reaktivierungen. Rutschungen können ferner in Fliessrutschungen (Hangmuren) übergehen und dadurch grössere Reichweiten erlangen. Im weiteren zu beachten sind die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen Rutschungen und Fliessgewässern, sei es durch Mobilisierung grosser Geschiebemengen, Ablenkung oder - im Extremfall - durch Rückstau eines Fliessgewässers.

Obschon selten, können in manchen Schweizer Seen «Rutschungen» in geotechnisch äusserst sensiblen, feinkörnigen Seeablagerungen, insbesondere Seekreide, auftreten. Spannungsänderungen können dort zu einem Kollaps des Korngefüges und zu schnellen Massenbewegungen in Form eines viskosen Breis führen. Eine eigentliche Gleitfläche bildet sich dabei nicht aus. Solche Bewegungen sind selbst bei geringem Gefälle von nur wenigen Grad möglich (z.B. Seeuferrutschung Zug 1887, Schindler und Gyger, 1987).

Hangkriechen

Über lange Zeiträume anhaltende, langsame Verformungen im Lockergestein oder Fels können zu kriechenden Hangbewegungen führen. Dabei finden bruchlose, kontinuierliche Verformungen und/oder ein diskontinuierliches Kriechen mit Gleitvorgängen auf zahlreichen kleinen Trennflächen statt. Im Gegensatz zu den Rutschungen sind keine durchgehenden Gleitflächen ausgebildet. Phänomene wie Talzusub und Bergzerreissung können Formen tiefgründiger Kriechbewegungen sein. Bei kriechenden Hangbewegungen kann das Vorhandensein einer durchgehenden Gleitfläche in manchen Fällen jedoch nicht eindeutig ausgeschlossen werden.

Ein Spezialfall von Hangkriechen zeigt sich bei **Blockgletschern** im Permafrost. Blockgletscher bestehen aus einem Gemisch von Lockergestein und Eis. Die physikalischen Eigenschaften des Eises, insbesondere dessen ausgeprägte Anfälligkeit zum Kriechen, haben zur Folge, dass in derartig gefrorenen Böden bereits bei kleinen Hangneigungen ab etwa 6° auffallend gleichmässige Kriechbewegungen in der Grössenordnung von Dezimetern pro Jahr auftreten.

Murgänge

Murgänge - im Volksmund auch «Rüfen» genannt - sind ein schnellfliessendes Gemisch aus Lockergesteinskomponenten (bis grosse Blöcke) und Wasser. Der Feststoffanteil variiert im allgemeinen zwischen 30 und 70 %, die Fliessgeschwindigkeiten betragen rund 2 - 20 m/s. Murgänge sind gekennzeichnet durch ein erhebliches erosives Potential (insbesondere Tiefenerosion) längs der Fliessstrecke.

In einem Gerinne können Murgänge nur schwierig von Hochwassern mit starkem Geschiebetransport abgegrenzt werden, da beide Prozessarten in wechselnder Reihenfolge auftreten können. Während eines 'normalen' Hochwasserabflusses können sich eine oder mehrere Murgangswellen (Murgangschübe) ausbilden, deren Zeitdauer in der Grössenordnung von einigen Sekunden bis wenigen Minuten liegt. Charakteristisch ist ein sehr rascher Anstieg der Hochwasserwelle, eventuell verbunden mit der Ausbildung einer stark feststoffbefrachteten Front. Ein weiteres Kennzeichen ist die Ausbildung wallartiger Ablagerungen an der Seite (levées) und/oder an der Front (Murköpfe).

Bei der Genese von Murgängen sind zwei Haupttypen zu unterscheiden: Hangmuren und Murgänge aus Gerinnen. Im Kasten sind einige wichtige Begriffe des Prozesses Hochwasser - Murgang aufgeführt.

Hochwasser:	<i>Zustand in einem Gewässer, bei dem der Wasserstand oder der Abfluss einen bestimmten Schwellenwert überschritten hat.</i>
Überschwemmung:	<i>Bedeckung einer Landfläche mit Wasser und Feststoffen, die aus dem Gewässerbett ausgetreten sind.</i>
Ufererosion:	<i>Abgleiten von Uferböschungen infolge Tiefen- und Seitenerosion.</i>
Übermürung:	<i>Ablagerung von Murgangmaterial ausserhalb des Gerinnes (häufig im Kegelbereich eines Wildbaches).</i>
Übersarung:	<i>Ablagerung von Feststoffen ausserhalb des Gerinnes anlässlich von Überschwemmungen.</i>
Murgang:	<i>Schnell fliessendes Gemisch von Wasser und Feststoffen mit einem hohen Feststoffanteil von ca. 30 bis 70 %, Geschwindigkeit 2 - 20 m/s.</i>
Hangmure:	<i>Entstehung in steilen Hängen mit gering durchlässigem Untergrund. Kennzeichnend ist ein oberflächliches Gemisch aus Lockergestein und Wasser. Beschränktes Volumen i.a. $\leq 20'000 \text{ m}^3$. Geschwindigkeiten 1 - 10 m/s.</i>
Murkopf:	<i>Steile Front eines Murganges bzw. der abgelagerten Masse eines (plötzlich) zum Stillstand gekommenen Murganges.</i>
Murzunge:	<i>Relativ flache, oft weitreichende Ablagerung eines Murganges bzw. von verschwemmtem Murmaterial.</i>

Absenkungs-und Einsturzphänomene

Absenkungs- und Einsturzphänomene treten auf im Zusammenhang mit der Auslaugung eines löslichen Untergrundes (Gips, Rauhwaacke), unterirdischen Hohlräumen (z.B. Karsthöhlen) oder infolge von Grundwasserabsenkungen. Typische Erscheinungsformen sind Dolinen. Insbesondere in triadischen Schichtfolgen mit Gips und Rauhwaacke können solche Phänomene in Erscheinung treten. Sie kommen auch in verkarsteten Kalken der Alpen und des Juras vor, wo sie räumlich konzentriert Flächen bis zu einigen km^2 einnehmen können.

Absenkungs- und Einsturzphänomene können auch im Zusammenhang mit menschlichen Aktivitäten stehen (grossflächige Setzungen infolge Grundwasserabsenkungen, Salzgewinnung, Einsturz über Untertagebauten).

Hakenwurf

Schichtköpfe des anstehenden Felses können unter dem Einfluss der Schwerkraft talwärts bis zu subvertikalem Einfallen umgebogen werden, insbesondere dann, wenn die Talachse parallel zum Schichtstreichen verläuft. Dieses als Hakenwurf bezeichnete Phänomen erfasst vor allem geschichtete, gebankte, plattige und schiefrige Serien. Selbst grobbankige Schichten können ihm unterworfen sein. Hakenwurf tritt in der Regel im Bereich der obersten Meter bis Zehner von Metern auf. Mit zunehmendem Zerfall der Felsböschung kann er zu Sackungen und zu Felsstürzen führen.

Sackungen

Sackungen sind gravitative Bewegungen in Festgesteinen mit einer ausgeprägten vertikalen Bewegungskomponente längs Trennflächen. Sie führen im allgemeinen zu einer Auflockerung des Gesteinsverbandes. Einerseits bestehen graduelle Übergänge zu Rutschungen, andererseits lösen sich aus versackten Felspartien oft auch Stein-/Blockschlag oder kleinere Felsstürze. Grosse Felsstürze oder Bergstürze können in der Anfangsphase aus einer Sackung hervorgehen.

3. Gefahrenbeurteilung

3.1 Allgemeines

Die Beurteilung einer Naturgefahr ist eine äusserst anspruchsvolle, schwierige und oftmals heikle Aufgabe. Es wird eine sichere Aussage erwartet, denn von dieser hängen entscheidende und häufig kostspielige Massnahmen zur Verminderung oder Ausschaltung des Risikos ab. Die Prognose hat nicht nur darüber Antwort zu geben, wie das Naturereignis ablaufen wird, welchen Wirkungsraum es einnimmt und wie gross seine Intensität ist. Vielmehr wird auch eine Antwort auf die Frage, ob und wann dieses eintritt, erwartet. Da grosse Sachwerte und häufig Menschenleben auf dem Spiel stehen, ist die haftungsrechtliche Bedeutung von Gefahrenbeurteilungen besonders brisant.

Massenbewegungen haben ihren Ursprung im mehr oder weniger bedeckten, nicht direkt einsehbaren Untergrund, d.h. im Innern des Gebirges. Das Verständnis von Massenbewegungen setzt damit eine sowohl räumliche wie zeitliche Auseinandersetzung mit einem komplex aufgebauten geologischen Medium voraus.

Eine exakte und vollkommen objektive Beurteilung der Gefahr ist aber meist nicht möglich. Der Geologe muss diesem Umstand Rechnung tragen, indem er seine Aussagen nachvollziehbar darstellt und deren Unsicherheiten offenlegt.

Die Überprüfung der Qualität einer Prognose der Gefahr von Massenbewegungen ist schwierig und letztlich erst anhand des Eintretens oder Nichteintretens des Ereignisses möglich (Zopfi 1996).

Im Hinblick auf die Erfassung, Darstellung und Beurteilung geologischer Naturgefahren ist das folgende grundsätzliche Vorgehen zweckmässig (Kienholz 1995, BUWAL 1998):

a) Gefahrenerkennung und -dokumentation

- Zusammenstellung und Analyse früherer Ereignisse anhand der Ereignisdokumentation und Naturbeobachtungen («stumme» Zeugen)
- Beschreibung des Prozessgebietes (Geologie, Hydrogeologie, Morphologie, Vegetation etc.)

b) Ursachenanalyse (kausale Zusammenhänge der Entstehung der Massenbewegung)

c) Beurteilung des Gefahrenpotentials (was kann wo und wann geschehen?)

- Ermittlung oder Abschätzung von Ursache, Grösse, Wirkungsraum, Intensität und Eintretenswahrscheinlichkeit von Ereignissen

d) Beurteilung des Schadenpotentials (welche Schäden können entstehen?)

e) Gefahren- und Risikomanagement im Hinblick auf wirksame und zweckmässige Schutzmassnahmen

Die Vielfalt des Problems der Entstehung und Auswirkungen von Massenbewegungen macht häufig eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit anderen Fachleuten (Geomorphologen, Ingenieuren, Forstingenieuren, Pflanzensoziologen etc.) zweckmässig.

3.2 Grösse, Wirkungsraum und Intensität des Ereignisses

Mit Feldkartierungen, Erfassung der räumlichen Lage von Trenn- und Gleitflächen, photogeologischen Analysen sowie Sondierungen kann der potentielle Ausbruchkörper lithologisch und volumenmässig erfasst werden. Die Aufgabe ist schwierig, weil geologische Körper im nicht direkt einsehbaren Untergrund liegen und praktisch immer anisotrop und inhomogen sind. Trenn- und Gleitflächen, Inhomogenitäten und Anisotropien der boden- oder felsmechanischen Eigenschaften sowie der Wasserhaushalt spielen eine entscheidende Rolle für die vorhandene Stabilität. Anhand der Naturbeobachtungen, Messungen, Berechnungen und seiner Erfahrung kann der Geologe die Gefahr modellhaft erfassen und darstellen. Geologische Modelle sind die wichtigste Grundlage für die Ursachenanalyse und die richtige Einschätzung der Gefahr von Massenbewegungen. Das geologische Modell ist das Resultat eines vielschichtigen und kreativen Arbeitsprozesses, in welchem die vorhandenen Naturphänomene und Messungen als harte Fakten, wissenschaftliche Kenntnisse, Berechnungen und Erfahrung einfließen. Der Geologe überprüft das so entstehende Modell laufend durch Rückkoppelungen, bis es möglichst «wahr» ist. Programme für Stabilitätsberechnungen sind dabei nützliche Hilfsinstrumente, da damit verschiedene Varianten analysiert und die Sensitivität des Systems ergründet werden kann.

Messungen von Deformationen von Massen mit fraglicher Stabilität können sehr aufschlussreich sein. Sie zeigen, ob und welche Gebirgsteile sich in einem labilen Zustand befinden. Analysen von Deformationen geben Aufschluss über die Bewegungsmechanismen und deren Dynamik (Keusen 1998).

Ist die Grösse des möglichen Ausbruchs bekannt, kann der Wirkungsraum und die Intensität des Prozesses mit Modellrechnungen einigermaßen zuverlässig ermittelt werden. Unter Intensität wird die physikalische Wirkung des Prozesses auf die Umgebung verstanden (z.B. Druckwirkung).

Eine charakteristische Grösse für die Reichweite von fliessenden und stürzenden Massen ist das Pauschalgefälle (Scheller 1970 sowie Fig. 3, 4, 5 und Tabelle 1).

Tab. 1: Pauschalgefälle von Massenbewegungen

<i>Prozess</i>	<i>Pauschalgefälle</i>
Murgänge	10 - 20°
Stein- und Blockschläge	30 - 35°
Felsstürze	30 - 35°
kleine Bergstürze (2 - 10 Mio m ³)	25 - 35°
grosse Bergstürze (10 - 50 Mio m ³)	12 - 25°
sehr grosse Bergstürze (50 - 1'000 Mio m ³) *	6 - 12°

*Beispiel: Flimser Bergsturz (interglazial) 12 Mia m³, 8°.



Fig. 4: Felsstürze Randa (VS). Ausbruchnische und Schuttkegel. Das Gesamtvolumen der Felsstürze beträgt 30 Mio m³. Da die Abbrüche in kleineren Teilstürzen von <500'000 m³ erfolgten, ist das Pauschalgefälle entsprechend klein (35°). Die Ereignisse von Randa werden daher richtigerweise nicht als Bergsturz bezeichnet. Foto H.R. Keusen



Fig. 5: Fels-Eis-Schneelawine Brenva (Courmayeur) vom 18.1.1997. Ausbruchvolumen: 2 Mio m³ Fels. Ablagerung >8 Mio m³ Fels-Eis-Schnee. Pauschalgefälle 23°. Der Felssturz löste eine Eis-Schneelawine aus, welche ein Hotel zerstörte und 2 Menschenleben forderte (siehe: Courmayeur, Brenva. Eboulement du 18 janvier 1997. Rapport géologique GEOTEST 1997).

Foto H.R. Keusen

3.3 Eintretenswahrscheinlichkeit

Die Eintretenswahrscheinlichkeit gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Prozess mit einer bestimmten Intensität und innerhalb einer bestimmten Zeitperiode an einem bestimmten Ort auftritt. Im Gegensatz zu periodischen, meteorologisch korrelierten Naturereignissen wie Hochwasser und Lawinen sind Massenbewegungen Prozesse, die oft episodisch auftreten. Wasser beeinflusst aber den Ablauf von Massenbewegungen erheblich, so dass auch hier häufig ein gewisser Zusammenhang mit sich wiederholenden Witterungsbedingungen besteht.

Bei der Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit von Massenbewegungen kann der Geologe nur auf indirekte Anhaltspunkte basieren. Es sind dies Zeugen früherer Ereignisse (Ereignisdokumentation, «stumme» Zeugen im Gelände) und Deformationsmessungen. Vor einem Absturz beschleunigen sich Deformationen von geologischen Massen häufig exponentiell. Dieser Umstand kann für eine Prognose des Absturzzeitpunktes verwendet werden (Funk et al. 1998). Es ist aber auch bekannt, dass Fels- und Erdmassen über Jahrzehnte oder Jahrhunderte hinweg kriechen können, ohne abzustürzen (Terrasse von Braunwald, Grindelwald, u.v.a.). Der Gotschna-Rutsch ob Klosters und die Saaser-Rutschmasse bei Saas im Prättigau kriechen seit ca. 7'000 Jahren (¹⁴C-Datierung an Holz aus z.T. von Rutsch überfahrenen Schottern).

Trotz der Schwierigkeit, die Eintretenswahrscheinlichkeit numerisch abschätzen zu können, wird vom Geologen auch hier eine konkrete Äusserung erwartet, weil eine solche für eine vollständige Gefahrenbeurteilung erforderlich ist (Zopfi 1996). Es ist dabei wichtig, dass klar unterschieden wird zwischen der Eintretenswahrscheinlichkeit eines Prozesses und jener eines Schadens. In den Alpen treten viele Massenbewegungen auf, ohne dass ein Schaden entsteht. Auch diese Ereignisse sind aber ein wichtiges geologisches Anschauungsmaterial für das empirische Verständnis von Prozessabläufen.

3.4 Schadenpotential und Risiko

Nur dann, wenn die Naturgefahr auf einen Wert, ein Schadenpotential (Sachwert, Menschen) einwirken kann, spricht man von Risiko. Das Risiko beschreibt demnach die Grösse und Eintretenswahrscheinlichkeit eines Schadens.

Viele Ortschaften in den Alpentälern liegen im theoretischen Einflussbereich von Bergstürzen. Grosse Kubaturen führen zu kleinen Pauschalgefällen bis hinunter zu 6° (Tabelle 1) und haben entsprechend grosse Reichweiten zur Folge. Dieses Restrisiko sehr grosser aber seltener Ereignisse kann geologisch kaum erfasst werden, was wegen der möglichen immensen Zerstörungen nur schwer erträglich ist. Hier hilft aber die Tatsache, dass sich grosse Ereignisse kaum spontan, ohne längere Vorankündigung ereignen. Vorzeichen sind Deformationen und zunehmender Stein- und Blockschlag, welcher durch die fortschreitenden Entfestigung des Gebirges verursacht wird; Beispiele: Bergstürze Elm und Goldau (Heim 1932), Felsstürze Randa, Felssturz Jungfraujoeh (Keusen 1998).

4. Beeinflussen Klimaänderungen Naturgefahren?

Für die Schweiz existieren verschiedene Klima-Projektionen, basierend auf dem zunehmenden CO₂-Gehalt der Atmosphäre. Eine Verdoppelung des CO₂-Gehalts gegenüber dem vorindustriellen Ausgangswert (Jahr 1800) von 280 ppmv (parts per million volume) dürfte ca. Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht werden. Die dannzumal möglichen Temperaturen variieren - je nach Methode- zwischen +1 bis +2°C für den Sommer und +0.5 bis +1.5°C für den Winter. Die Niederschlagsprojektionen ergeben für den Winter ein sehr uneinheitliches Bild (-5 bis +20%). Mehrheitlich zeigen die Abschätzungen jedoch eine Zunahme der Niederschläge. Für den Sommer wird tendenziell eine Abnahme (0 bis -10 %) erwartet. Bei diesen Projektionen unberücksichtigt ist die abkühlende Wirkung von Sulfat-Aerosolen, welche vor allem in stark industrialisierten Regionen wirksam sind. Längerfristig muss jedoch mit einem deutlichen Überwiegen des erwärmenden CO₂-Einflusses gerechnet werden.

Was für Folgen haben diese Entwicklungen hinsichtlich der erwähnten Naturgefahren? Unter der Annahme, dass in der Schweiz Niederschlag und Verdunstung gleichmässig zunehmen, dürfte der Oberflächenabfluss im Durchschnitt gleich bleiben. Der Anstieg der Nullgradgrenze wird jedoch zur Folge haben, dass der Niederschlag auch in höheren Zonen länger in Form von Regen fällt. Im jährlichen Durchschnitt verlängert sich dadurch die Hochwassersaison und die Wahrscheinlichkeit, dass sich in diesem Zeitraum ungünstige Rahmenbedingungen einstellen können, nimmt zu. Da im Alpenraum Hochwasserereignisse oft mit einer erheblichen Umlagerung von Lockergesteinen verbunden sind, wächst die Eintretenswahrscheinlichkeit von hochwasserinduzierten Massenbewegungen wie Murgängen, Böschungserosion, Reaktivierung von Rutschungen etc. Inwieweit die veränderten Klimaverhältnisse zu bodenstabilisierenden Entwicklungen in Form von verstärkter Vegetation, Bodenbildung und Anstieg der Waldgrenze nach sich ziehen, ist ungewiss. Auch eine gegenteilige Entwicklung ist denkbar, indem sich der Zustand des Waldes zusehends verschlechtert.

Die erhöhten Temperaturen könnten zur Folge haben, dass der Boden selbst in höheren Lagen während längerer Zeit nicht gefroren ist. Während der prognostizierten, niederschlagsreicheren Winterhalbjahre dürfte somit vermehrt Niederschlag im Boden versickern und dadurch das Gleichgewicht von instabilen Hängen beeinträchtigen. Ungünstig wirkt sich in diesem Zusammenhang auch aus, dass das beachtliche Wasserbindungsvermögen der Vegetationsdecke in dieser Zeit keine Wirkung entfalten kann. Aus dieser Konstellation ist zu folgern, dass insbesondere in voralpinen Gebieten zwischen 1'000 und 1'700 m ü.M. - wo sich bereits heute die meisten sensiblen Rutschgebiete befinden - vermehrt Hanginstabilitäten auftreten könnten (Lateltin et al. 1997).

In diese Richtung weisen auch Untersuchungen im Rahmen des NFP 31 (Bloetzer et al. 1998) hin, welche das Langzeitverhalten verschiedener tiefgründiger, grossflächiger Rutschmassen im Schweizer Alpenraum anhand von Vergleichen zwischen früheren Landesvermessungen und registrierten Niederschlagsdaten über-

prüfen. So ist bei den untersuchten Rutschungen in der Westschweiz eine tendenzielle Zunahme der durchschnittlichen Bewegungen festzustellen, was mindestens teilweise mit den seit 1977 registrierten, erhöhten Niederschlagsmengen korreliert. Im östlichen Alpenraum verhielten sich die Rutschungen bislang indifferent (Novraz et al. 1998).

Die durchschnittlich höheren Temperaturen (Ansteigen der Nullgradgrenze) werden auch Auswirkungen auf die Permafrost-Regionen haben und die alpinen Eismassen weiter zum Abschmelzen bringen. Dadurch werden grosse Lockergesteinsmassen dekonsolidiert und ein Geschiebepotential bereitgestellt, welches durch Murgänge bis in tiefe Tallagen verfrachtet werden kann. Mit dem Ansteigen der Permafrostgrenze wächst auch die Gefahr, dass vorderhand noch durch Eis konsolidierte, zerklüftete Felsmassen zunehmend an Festigkeit verlieren. Dies kann vermehrt zu Sturzprozessen und zu Felssackungen sowie verstärkter Schuttproduktion Anlass geben.

Bei allen Klima-Projektionen darf allerdings nicht übersehen werden, dass die Natur an sich ein dynamisches System darstellt. Dieses System verändert sich kontinuierlich, zeitweise auch rasch und manchmal abrupt. Die Erdgeschichte gibt davon reichlich Zeugnis. So ist die Erwärmung im Alpenraum seit dem letzten Jahrhundert nicht einzig auf anthropogene Ursachen zurückzuführen. Ein wesentlicher Teil ist als natürliche Wiedererwärmung nach der ausgeprägten Kaltphase des letzten Jahrhunderts zu interpretieren.

5. Erdbeben als Auslöser von Massenbewegungen

Die Schweiz gehört im mitteleuropäischen Vergleich zu den Ländern mit erhöhter Erdbebenaktivität. Historisch sind Erdbeben praktisch aus der ganzen Schweiz belegt. Als besonders gefährdete Regionen gelten das Wallis, Basel, das St. Galler Rheintal, das Engadin, Teile der Innerschweiz und des Berner Oberlandes.

Die Intensität eines Erdbebens beschreibt - im Gegensatz zur Magnitude (\approx freigesetzte Energie) - die sinnesmässig feststellbaren Auswirkungen eines Bebens an der Erdoberfläche (Standorteinwirkung, Schadenausmass). Sie ändert sich von Ort zu Ort je nach Entfernung zum Epizentrum und der Untergrundbeschaffenheit. Bei der heute in Europa allgemein gültigen MSK-Skala treten Massenbewegungen in der Regel ab einer Intensität von VII auf. Seit 1850 ereigneten sich in der Schweiz rund 30 Beben mit einer Intensität grösser als MSK VII. Durchschnittlich tritt in der Schweiz somit etwa alle 5 Jahre ein Beben auf, das als Sekundäreffekt Massenbewegungen (v.a. Stein- und Blockschlag, Felssturz, Rutschungen) auslösen kann.

Der lokale geologische Untergrund beeinflusst die Ausbreitung der seismischen Wellen und entsprechend die Stärke von Erschütterungen. Je nach Untergrund kann die Intensität von Erdbeben lokal bis zu ca. 1.5 Intensitätsstufen von der in Abhängigkeit der Distanz zum Epizentrum zu erwartenden Intensität abweichen (Beer 1997, Säggerer & Mayer-Rosa 1978). Auch ein schwächeres, von der Eintre-

tenswahrscheinlichkeit her häufigeres Beben kann somit lokal zu Massenbewegungen führen, insbesondere beim Vorliegen ungünstiger Randbedingungen, wie zum Beispiel witterungsbedingt starker Bodensättigung oder hoher Wasserdrücke auf Klüften. In den erdbebengefährdeten alpinen Regionen der Schweiz ist die Eintretenswahrscheinlichkeit von Massenbewegungen als Folge eines Bebens innerhalb der Zeitperiode einer Generation durchaus als gross zu bezeichnen. Die Methoden der computergestützten Mikrozonierung (Beer 1997) eröffnen neue Möglichkeiten bei der Identifikation besonders sensibler Zonen.

Beispiele für durch Erdbeben beeinflusste Massenbewegungen sind Felsstürze im Friaul (Italien, 1976). Auch der Bergsturz von Six-des-Eaux Froides (Wallis 1946) wurde wahrscheinlich durch zwei innert Tagesfrist aufeinanderfolgende Beben im Mittelwallis (MSK-Intensität VIII und VII) begünstigt. Die alte Rutschung von Vaz-Obervaz bei Lenzerheide (GR) wurde 1992 in der Folge eines am 20.11.1991 erfolgten Erdbebens reaktiviert (Noverraz et al. 1998).

Zur Abschätzung der Stabilität von Hängen bei seismischer Erschütterung müssen bei der konventionellen Stabilitätsberechnung zwei zusätzliche Grössen berücksichtigt werden: Die Trägheitskräfte, die aus den zu erwartenden Beschleunigungskomponenten resultieren und der Porenwasserüberdruck, verursacht durch die zusätzliche dynamische Belastung.

6. Gefahren- und Risikomanagement

Ziel des Gefahren- und Risikomanagements ist a) die prophylaktische Verhütung von Schäden und b) der optimale Einsatz der zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel (Holenstein 1997). Das Diagramm Fig. 6 zeigt die Zusammenhänge. Massnahmen sind häufig sehr aufwendig oder haben für die Betroffenen einschneidende Konsequenzen. Sie müssen deshalb klar begründet werden und auf nachvollziehbaren, naturwissenschaftlich fundierten Grundlagen basieren. Das Gefahren- und Risikomanagement muss eine Definition der Schutzziele und Diskussion der Risikoakzeptanz beinhalten, weil eine vollkommene Sicherheit oft nicht möglich oder nur mit enormen Mitteln erreichbar ist. Schutzziele sollen flexibel gehandhabt werden, denn nicht jede Raumeinheit bedarf desselben Schutzes. Risiken müssen deshalb häufig bis zu einem gewissen Grad toleriert werden. Dabei ist es wichtig, diese akzeptierten Risiken zu beschreiben. Die Massnahmen können planerischer Natur sein (Reduktion der Exposition durch Auszonungen) oder mit baulichen technischen Mitteln die Naturgefahr eindämmen. Mit technischen Massnahmen können entweder Ereignisse in ihrer Entstehung verhindert oder deren Häufigkeit reduziert werden (aktive Massnahmen). Es kann aber auch deren Ablauf schadenarm gestaltet werden, indem die Verletzlichkeit des gefährdeten Wertes vermindert wird (passiv). Bei allen baulichen Massnahmen gilt, dass deren Wirksamkeit nur dann gewährleistet ist, wenn sie regelmässig auf ihre Funktionstüchtigkeit hin kontrolliert und unterhalten werden (z.B. Leeren von Steinschlagverbauungen, Säubern von Entwässerungsgraben).

Mit Frühwarndiensten, d.h. durch systematische Beobachtungen und Messungen, kann das Verhalten und die Entwicklung einer drohenden Naturgefahr erkannt

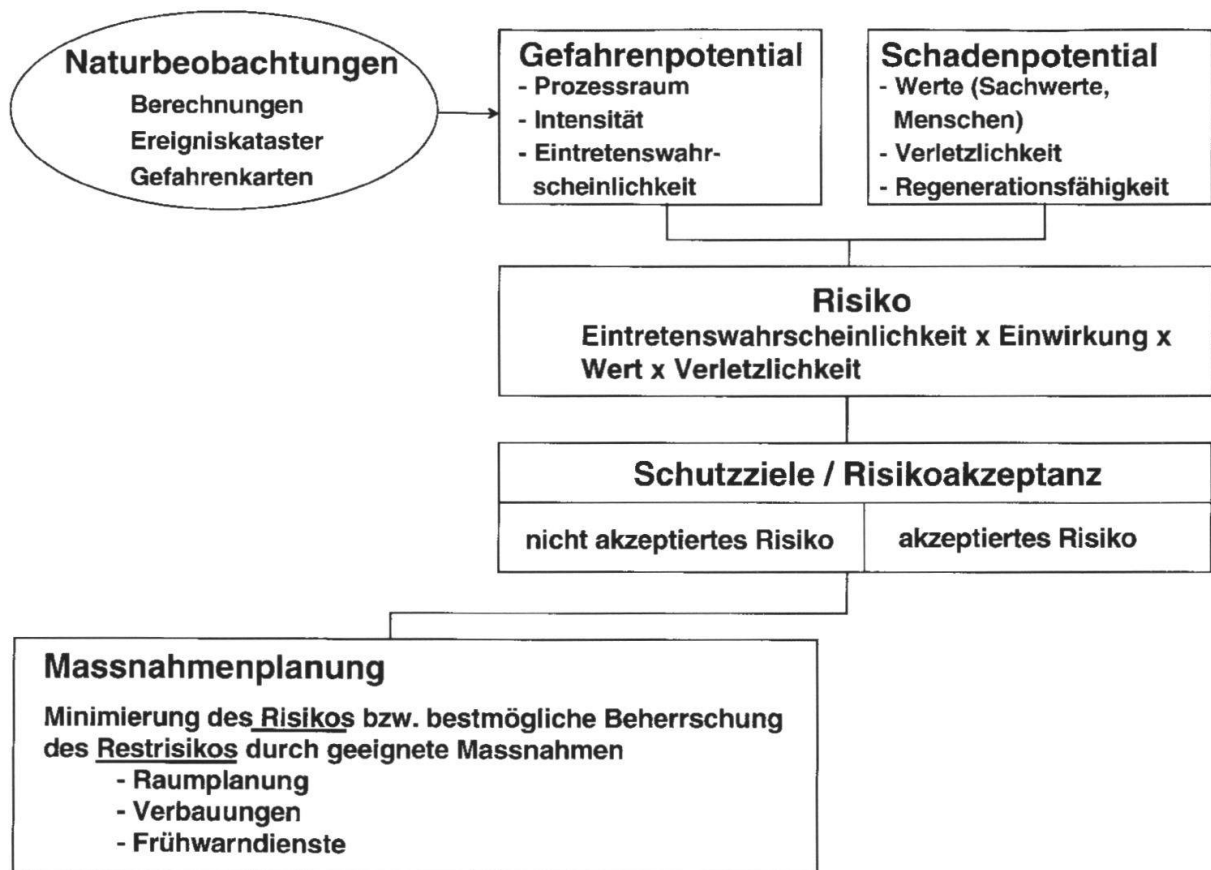


Fig. 6: Gefahren- und Risikomanagement bei Naturgefahren

werden und Schäden können so durch zeit- und sachgerechtes Handeln vermieden werden (Keusen 1998).

Glossar

Gefahrenpotential:

Zustand oder Vorgang, aus dem ein Schaden für Menschen und Sachwerte hervorgehen kann. Das Gefahrenpotential beschreibt ein mögliches Ereignis bezüglich seiner Wirkung (Raum, Intensität).

Gefährdung:

Die Gefährdung beschreibt das Gefahrenpotential unter Berücksichtigung der Eintretenswahrscheinlichkeit.

Schadenpotential:

Gesamtheit aller aus einem bestimmten Gefährdungsbild möglicherweise resultierenden Schäden.

Risiko:

Qualitative oder quantitative Charakterisierung eines Schadens hinsichtlich der Eintretenswahrscheinlichkeit und Tragweite der Schadenwirkungen.

Risikoakzeptanz: Persönliche oder kollektive Bereitschaft, ein erkanntes Risiko zu tolerieren.

Gefahren- und Risikomanagement:

Gesamtheit von Strategien und Massnahmen zur Erreichung von festgelegten Schutzzielen.

Eintretenswahrscheinlichkeit, Wiederkehrdauer:

Bezogen auf eine bestimmte Periode lassen sich Eintretenswahrscheinlichkeit und Wiederkehrperiode numerisch wie folgt verbinden:

$$p = 1 - (1 - 1/T)^n$$

wobei n der betrachtete Zeitraum, T die Wiederkehrperiode und p die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses gleich oder grösser als jenes der Wiederkehrperiode T innerhalb der betrachteten Periode darstellt. Nimmt man 30 Jahre (eine Generation) als Betrachtungszeitraum, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein 30jähriges Ereignis eintritt 64 % (oder knapp $\frac{2}{3}$), ein 100jähriges 26 % (oder ungefähr $\frac{1}{4}$) und ein 300jähriges knapp 10 %. Dieser Ansatz verdeutlicht, dass selbst bei einer relativ seltenen Wiederkehrperiode (z.B. 300 Jahre) die verbleibende Restgefährdung nicht vernachlässigbar gering ist.

Pauschalgefälle («Fahrböschung» nach Heim 1932):

Grenzneigung zwischen Ausbruch und Ablagerungsfront Das Pauschalgefälle ist eine charakteristische Grösse, welche von den Eigenschaften (und z.T. vom Volumen) des stürzenden Materials abhängig ist.

Frühwarndienste:

Systematische Beobachtungen und Messungen, die geeignet sind, das Verhalten und die Entwicklung einer drohenden Naturgefahr zu erkennen, um im Hinblick auf die Vermeidung von Schäden zeit- und sachgerecht handeln zu können (Definition in Keusen 1998).

Gefahrenhinweiskarte (GHK):

Die GHK gibt eine grobe Übersicht der denkbaren Gefahrenpotentiale durch die Naturereignisse Lawinen, Steinschlag, Murgang und Rutschung. Im weiteren zeigt sie die Konflikte dieser Gefahren mit möglichen Schadenpotentialen (Siedlungen, Verkehrswege). Die GHK stellt auf Ebene Richtplan ein wichtiges Instrument dar. Sie zeigt mögliche Konfliktstellen auf und weist auf näher abzuklärende Risiken hin.

Gefahrenkataster, Ereigniskataster (EK):

Im EK sind frühere Ereignisse von Naturprozessen zusammengestellt (BUWAL 1998). Der EK weist auf besonders gefährliche Gebiete mit häufigen Vorkommnissen hin. Aufgrund des EK können Anhaltspunkte über die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Prozesses gewonnen werden.

Gefahrenkarte (GK):

In der Gefahrenkarte sind gefährliche Naturprozesse bezüglich Eintretenswahrscheinlichkeit und Intensität dargestellt. Die Prozesse werden naturwissenschaftlich detailliert abgeklärt und modelliert. Die Gefahrenkarte scheidet rote (Verbotszone), blaue (Gebotszone, z.B. Bauauflagen) und gelbe Gebiete (Hinweiszone) aus und ist Grundlage für den eigentümerverbindlichen Nutzungsplan.

Permafrost:

Dauernd gefrorener Untergrund. Tritt je nach Exposition und Lage oberhalb von 2'000 bis 3'000 m auf. Im Permafrost tritt Wasser in Form von Eis auf (Eisgehalte bis über 50 %). Das Verhalten von Permafrost wird massgeblich von den physikalischen Eigenschaften des Eises mitbestimmt (Tendenz zum Kriechen).

«Stumme» Zeugen:

Spuren früher erfolgter Massenbewegungen im Gelände (Blöcke, Murköpfe, Waldschäden u.a.). Es ist oft möglich, anhand des Zustandes dieser Zeugen auf das Alter der Ereignisse zu schliessen.

Literaturverzeichnis

- BEER, CH. 1997: Erdbebengefährdung in Abhängigkeit vom geologischen Untergrund. Beitr. Geol. Schweiz, geotechn. Ser., 92.
- BLOETZER, W., EGLI, TH., PETRASCHKE, A., SAUTER, J. & STOFFEL, M. 1998: Klimaänderungen und Naturgefahren in der Raumplanung. Synthesebericht NFP 31. Vdf Verlag ETH Zürich.
- BUNDESAMT FÜR ZIVILSCHUTZ 1995: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine vergleichende Übersicht (KATANOS).

- BUWAL, BWB 1995: Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene, Empfehlungen (Ausgabe 1995). - EDMZ, Bestell-Nr. 310.022 d/f, Bern.
- BUWAL, BWB, BRP 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungen bei raumwirksamen Tätigkeiten.
- BUWAL, 1998: Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85.
- BWB, BRP, BUWAL 1997: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. EDMZ.
- EVED, BWB, EDI, BUWAL, LHG 1991: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 - Schlussbericht. - Mitt. der Landeshydrologie und -geologie Nr. 15.
- FUNK, M., WEGMANN, M., FLOTRON, A. & KEUSEN, H.R. 1998: Movement studies to forecast the time of breaking off ice and rock masses. Internat. IDNDR-Conference on Early Warning Systems for the Reduction of Natural Disasters. Potsdam.
- HEIM, A. 1932: Bergsturz und Menschenleben. Viertelsjahrschrift der Nat. forschenden Gesellschaft Zürich.
- HOLENSTEIN, K. 1997: Analyse, Bewertung und Management von Naturrisiken. vdf Hochschulverlag AG der ETH Zürich.
- KEUSEN, H.R. 1998: Warn- und Überwachungssysteme (Frühwarndienste). Publ. PLANAT.
- KIENHOLZ, H. 1995: Gefahrenbeurteilung und -bewertung auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept, Schweiz. Z. Forstwesen, 146.
- LATELTIN, O., BEER, CH., RAETZO, H. & CARON, CH. 1997: Landslides in Flysch terranes and climate change. Eclogae geol. Helv. 90/3.
- NOVERRAZ, F., BONNARD, CH., DUPRAZ, H. & HUGUENIN, L. 1998: Grands versants instables et climat, projet versinclin, PNR 31. Vdf Verlag, ETH Zürich.
- SÄGESSER, R. & MAYER-ROSA, D. 1978: Erdbebengefährdung in der Schweiz. - Schweiz. Bauztg. 96/7.
- SCHELLER, E. 1970: Geophysikalische Untersuchungen zum Problem des Taminser Bergsturzes (Diss. ETHZ).
- SCHINDLER, C. & GYGER, M. 1987: Die Katastrophe von Zug. Die Zuger Vorstadt. Gedenkschrift zum 100. Jahrestag der Vorstadtkatastrophe vom 5. Juli 1887.
- ZOPFI, E. 1996: Kilchenstock. Der Bergsturz in den Köpfen. Limmatverlag Zürich.

Cas concret no. 1:

Les laves torrentielles de Villeneuve du 13/14 août 1995

OLIVIER FRANÇAIS¹⁾ et OLIVIER LATELTIN²⁾

Résumé

A la suite d'un orage dans la région de Villeneuve, le Nant du Pissot sort de son lit le 13 août 1995 à minuit en propageant des laves torrentielles sur l'autoroute A9, dans les vignes et la zone industrielle. Plus de 50'000 m³ de gravats et de dépôts solides s'étendent sur une superficie de 5 hectares et dix voitures sont ensevelies. Parallèlement aux mesures d'urgence pour rétablir le trafic sur l'autoroute, une documentation détaillée des traces de l'événement et l'analyse des risques ont été entreprises. Ces études ont permis de proposer des travaux de correction du lit du Pissot et des ouvrages de protection pour assainir la situation dans le secteur. Ces travaux ont été réalisés durant les années 1995, 1996 et 1997 pour un coût supérieur à 20 millions de francs.

1. Description de l'événement

Suite à une période de fortes précipitations (8 et 11 août), un gros orage éclate dans la région de Villeneuve le dimanche soir 13 août 1995. Les eaux superficielles se concentrent dans les ravines et provoquent rapidement une saturation des sols et des terrains meubles dans le lit des torrents. Les alluvions et les éboulis sont mobilisés sous la forme de laves torrentielles par les eaux de surface dans ces terrains saturés. Entre 23h20 et 23h30, le Nant du Pissot sort de son lit et des laves torrentielles se propagent dans le cône de déjection (volume 50'000 m³) en recouvrant les deux chaussées de l'autoroute A9, la région des vignes et une partie de la zone industrielle. L'autoroute est recouverte de plusieurs mètres de gravats et les dépôts solides s'étendent sur une superficie de 5 hectares. Un bloc de 60 m³, retrouvé en aval de l'autoroute, témoigne de la capacité de transport des laves torrentielles lors de l'événement. Une dizaine de voitures sont ensevelies sous les gravats et leurs occupants sont légèrement blessés.

¹⁾ Bureau Karakas & Français SA, 1006 Lausanne

²⁾ Service hydrologique et géologique national, 3003 Berne



Fig. 1:
Vue aérienne de la zone sinistrée

2. Situation géologique

Le Nant du Pissot a un bassin-versant d'une superficie d'environ 1 km², avec son point culminant à Malatraix (altitude 1768m) et son point le plus bas à l'altitude 370m (coordonnées: 559'000/138'000). De nombreux petits affluents se déversent dans le lit principal, qui franchit une barre rocheuse et s'écoule vers l'Ouest en direction de Villeneuve. Le bassin-versant (Fig. 1) est recouvert par des forêts (couverture: environ 80 %), jusqu'au cône de déjection. Des vignes, quelques habitations et la zone industrielle de la ville de Villeneuve se sont implantées sur le cône de déjection du Nant du Pissot. L'autoroute A9 traverse cette région avec un trafic journalier important (35'000 véhicules). Le Nant du Pissot est sec durant la majeure partie de l'année. A la suite de longues périodes à fortes précipitations ou en cas d'orages très violent, le débit du torrent peut grandir très rapidement et atteindre 4 à 6 m³/s.

La géologie de ce bassin-versant montre des couches à pendage contraire (40 à 50 degrés, plongement vers le Sud-Est), qui constituent le flanc Nord-Ouest de l'anti-

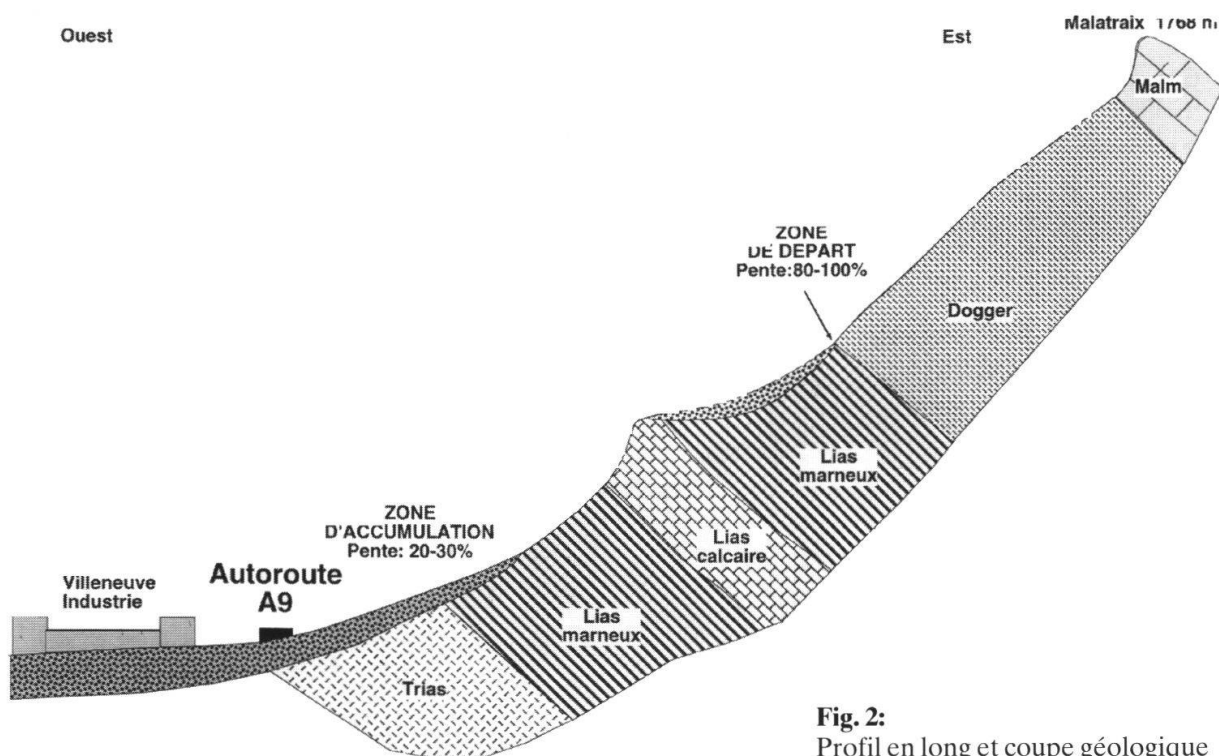


Fig. 2:
Profil en long et coupe géologique

clinal déversé de Malatraix (Préalpes Médiannes). Des éboulis et des alluvions recouvrent localement ces roches calcaires du Malm, du Dogger et du Lias (Fig. 2).

L'hydrogéologie de ce massif comprend d'importantes circulations karstiques qui se déversent à l'extérieur du bassin-versant (p.ex. source de La Lisette à Roche) et des résurgences diffuses apparaissent lors de fortes précipitations dans le Nant du Pissot dans les zones failles.

Le Nant du Pissot a connu de nombreux débordements historiques, plus particulièrement le 10 avril 1745 et le 26 juillet 1869. Les premiers travaux de protection contre les crues datent de la fin du 18^{ème} et du début du 19^{ème} siècle et ces ouvrages ont été reconstruits et complétés entre 1890 et 1926. L'agglomération de Villeneuve s'est étendue dans cette région depuis 1930 et l'autoroute A9 a été construite sur le cône de déjection à la fin des années 60. Tous les 10 à 15 ans environ, des laves torrentielles d'un volume de 2000 à 5000 m³ atteignent le cône de déjection. En 1964, la zone industrielle de Villeneuve avait été touchée localement et recouverte par 30 centimètres de boue. Le 21 août 1974, 6000 à 8000 m³ de matériaux (20% de bois) se sont accumulés en amont et sur l'autoroute A9.

En août 1989, une accumulation de 6000 m³ de gravats a également causé des dégâts dans le secteur, sans toutefois perturber la circulation sur l'autoroute.

3. Méthodes d'investigations et travaux réalisés

Suite à cet événement, des bureaux techniques ont été chargés de faire une évaluation de la situation pour proposer des mesures immédiates afin de rétablir le trafic sur l'autoroute en garantissant la sécurité des usagers. Une reconnaissance du Nant du Pissot par des géologues et des géotechniciens a permis d'identifier rapidement

certaines secteurs critiques: de très gros blocs de Malm (jusqu'à 800 m³) obstruaient encore le lit du ruisseau et menaçaient de s'effondrer à tout instant. Des spécialistes se sont chargés de dynamiter ces blocs et un système d'alerte a été établi à l'amont de la barre rocheuse pour permettre le déroulement des travaux de déblaiement du secteur dans des conditions de sécurité acceptables.

Parallèlement à cette première intervention, une documentation des traces laissées par ces laves torrentielles a été réalisée quelques heures après l'événement pour comprendre le phénomène et reconstruire les conditions hydrologiques (vitesse, débit et volume des laves torrentielles) de la catastrophe. Durant les semaines suivantes et sur mandat du canton de Vaud, une analyse détaillée des risques a été élaborée dans le bassin versant pour proposer des mesures passives et actives afin de minimiser les conséquences de laves torrentielles équivalentes au sinistre d'août 1995. Des ouvrages de protection (digue, dépotoir, système d'alerte), la correction du lit (redimensionnement de la cunette) et le réaménagement du secteur des vignes furent réalisés durant les mois d'octobre 1995 à août 1996.

4. Résultats de ces investigations

Suite à l'événement, il est apparu que de nombreux blocs constituaient une menace importante, non seulement parce qu'ils étaient mobilisables par une nouvelle crue, mais également par l'éventualité d'engendrer des phénomènes de barrage et de stockage le long du Pissot. Des mesures immédiates ont été prises et le minage d'une cinquantaine de blocs a été effectué durant les premières semaines ayant suivi la catastrophe. De plus, un important volume de blocs (env. 2'000 m³) situés dans l'axe du lit et reposant sur des blocs de faible volume (équilibre précaire → «roulement à bille») a été miné le lundi 28 août 1995.

La documentation des traces laissées par les laves torrentielles a permis d'établir, d'une façon grossière le déroulement de l'événement et d'apporter une estimation de quelques paramètres hydrologiques. La mesure de différents profils (section transversale) a permis de quantifier les processus d'érosion et de transport dans le lit du torrent. Le matériel érodé représente un volume de 35'000 m³ à 40'000 m³. Cette estimation présente une légère différence par rapport au volume accumulé dans le cône de déjection par l'effet du foisonnement. Une évaluation de la vitesse d'écoulement des laves torrentielles a été effectuée par l'application de formules empiriques et de paramètres relevés sur le terrain. Sur la base de la méthode du rehaussement de la section une vitesse comprise entre 6 et 15 m/s a été calculée pour l'événement du 13 août, en gardant à l'esprit qu'il ne s'agit pas d'une seule lave torrentielle mais plutôt d'une succession d'au moins cinq coulées de débris dans un intervalle de temps restreint. Le débit maximal pendant l'événement est également difficile à reconstituer, parce que les traces dans les rives du torrent ne sont pas toujours corrélables dans le temps avec les traces d'érosion du lit. Les sections transversales le long du torrent oscillent entre 20 et 80 m². Sur la base de ces sections transversales et des vitesses d'écoulement calculées, on peut estimer que le débit de pointe maximal doit être compris entre 150 et 200 m³/s.

5. Interprétation et modèle géologique de l'événement

Dans le domaine supérieur du bassin-versant, chaque ravine a montré des débits importants avec des traces d'érosion. Dans plusieurs secteurs, le lit du torrent a été surcreusé jusqu'à la roche et ce niveau d'érosion avait rarement été atteint précédemment. Le matériel mobilisé provient directement du lit et des berges du torrent. Suite aux passages des laves torrentielles, les berges ont montré quelques phénomènes d'instabilités. Les gros blocs de Malm, qui ont un diamètre contrastant avec la granulométrie des autres alluvions du lit, proviennent de la falaise de Malatraix. Ils se sont accumulés dans le lit du torrent à la suite d'éboulements préhistoriques ou historiques et ont été transportés localement par d'anciennes laves torrentielles. Ils ne sont pas d'origine glaciaire (pas de moraine préservée sur ces pentes raides) et certains ont été légèrement déplacés lors de l'événement d'août 1995. Quelques uns de ces blocs instables qui ne retenaient plus latéralement les éboulis de pente ont été éliminés lors du dynamitage des secteurs sensibles.

Dans le secteur aval du torrent principal, les 15 ouvrages de protection contre les crues ont été totalement détruits. Une quinzaine de gros blocs (volume de 5 à 50m³) se sont arrêtés à environ 200 mètres en amont du cône de déjection, en créant un important effet de barrage à l'écoulement. Des levées et des traces d'impact de pierres sur les arbres sont visibles sur les berges du torrent, jusqu'à une hauteur de 5 mètres. Dans le cône de déjection, le torrent est sorti de son lit en créant différentes levées. Des surcreusements («gullies», Fig. 3) dans le matériel accumulé témoignent d'événements multiples qui se sont succédés rapidement durant la nuit du 13 au 14 août 1995.



Fig. 3: Surcreusement provoqué par les laves torrentielles dans le cône de déjection

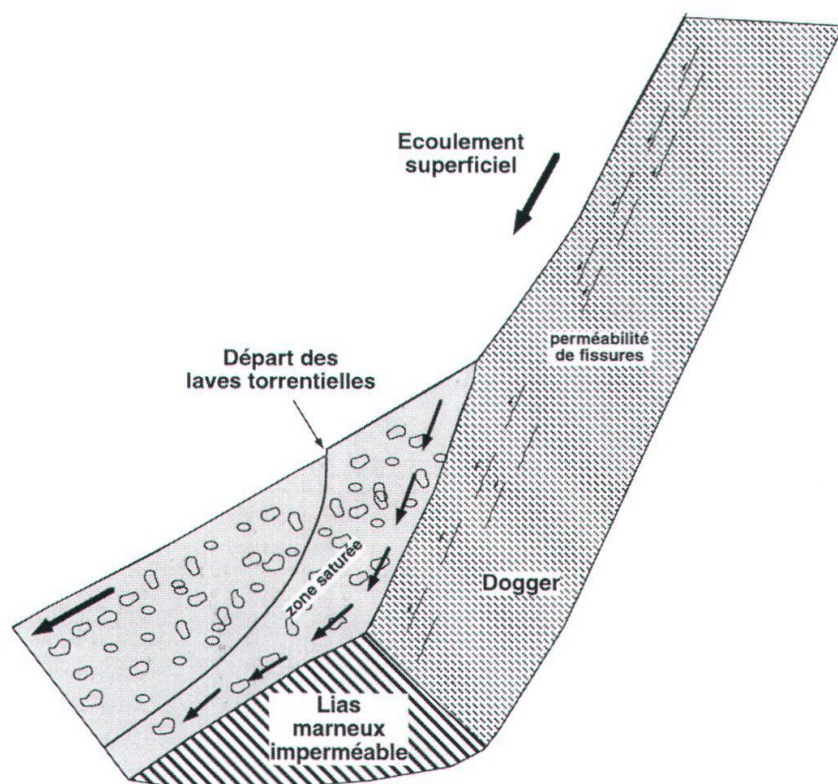


Fig. 4: Déclenchement des laves torrentielles au contact Lias/Dogger

bâcles-débâcles qui se sont succédés dans un laps de temps très court, suite à un violent orage, sur des sols saturés et en forte pente. Le déclenchement de nombreuses laves torrentielles (zone de départ) dans le versant correspond lithologiquement au passage entre les alternances marno-calcaires du Dogger (pente supérieure à 80 %) et les marnes très imperméables du Lias sommital (pente entre 60 et 80 %), entre les cotes 1250 et 1000 m. Ce contraste lithologique (Fig. 4) a une influence sur la ligne de pente (changement abrupt et dépôt des alluvions et des éboulis) ainsi que sur les propriétés hydrogéologiques du versant. Plus en aval, les faciès plus calcaires du Lias sont également responsables d'une rupture de pente importante avec la formation de gorges et stockage de gros blocs de Malm, à l'altitude 800 mètres. La géologie conditionne les différentes propriétés des roches et des terrains meubles dans ces pentes et détermine la localisation du déclenchement de phénomènes de laves torrentielles, lors de fortes précipitations.

6. Analyse préliminaire des risques

Une liste aussi exhaustive que possible des risques probables et des biens à protéger a été établie dans le but de cartographier les dangers et risques engendrés par une crue du Pissot.

Il a été fait une distinction entre la notion du danger et du risque en adoptant les définitions suivantes :

- **Danger = phénomène x intensité x probabilité**
- **Risque = danger x vulnérabilité x coût**

A l'aval du canal qui enjambe l'autoroute, un dépotoir d'une capacité de 4000 m³ a été complètement recouvert par les gravats. Le canal lui-même a été endommagé dans la partie supérieure du cône et des traces indiquent clairement que ce canal n'était pas dimensionné pour contenir les débits solides et liquides lors de l'événement.

Le déroulement des laves torrentielles du Nant du Pissot est expliqué par une série d'événements d'em-

Le recensement des biens à protéger est quantifiable en soit, par contre, l'intensité d'un événement et sa fréquence sont souvent difficiles à apprécier par le fait qu'il manque des données historiques. Dans notre cas, suite à l'étude historique, nous avons admis que la crue du 13 au 14 août 1995 avait un caractère exceptionnel du type centenaire.

La notion du risque a été prise en compte en évaluant de façon subjective la vulnérabilité d'un bien (personnes - ouvrages) et ses conséquences. Le facteur coût est parfois délicat à préciser car il est difficile de quantifier tant le coût humain (au singulier comme au pluriel) que le coût matériel.

Le tableau ci-dessous donne les résultats de l'analyse préliminaire du risque en fonction des zones spécifiques.

Situation géographique	Biens concernés	Risque en %
Combe	Chables Route forestière et sentiers Forêts	3%
Cône de déjection du 13 au 14 août 1995	Habitations Autoroute A9	60%
Ancien cône de déjection	Vignes Réservoirs hydrocarbures Lignes EOS Chemins AF routes communales	20%
Zone inondable	Ligne CFF Nappe phréatique Routes, Zone industrielle Canalisations eaux usées	15%
Hors zone	Route cantonale STEP	2%

Ainsi, on constate que d'après cette estimation l'autoroute et les habitations accumulent près de 60 % du risque total. Celui-ci est encore de 20 % sur l'ancien cône de déjection et concerne les vignes, les réservoirs d'hydrocarbures, les lignes EOS et les chemins communaux. Dans la zone inondable, le risque est encore de 15 % et tombe à 3 % pour la combe et à 2 % pour la STEP et la route cantonale.

7. Gestion des dangers

Les mesures préventives visaient à diminuer les dangers et les risques liés à la combe du Pissot, compte tenu des dégâts provoqués lors de l'événement du 13 août 1995. Celles-ci ont été réalisées par des interventions directes et indirectes de protection ainsi que par l'amélioration de l'écoulement du Pissot.

A l'amont de la chute du Pissot à 800 m environ, le minage des blocs les plus menaçants, le curage des ravines et la protection des berges constituaient les mesures directes. La surveillance à moyen et long terme de l'évolution des dépôts meubles dans les ravines fait partie des mesures indirectes.

Entre la chute du Pissot et l'autoroute A9, l'objectif était de protéger cette dernière contre les événements exceptionnels par l'amélioration de l'écoulement naturel, par la construction de deux ouvrages pour les laves torrentielles à savoir un dépotoir naturel à la cote 700 m et un dépotoir de grande capacité (Volume 20'000 m³) à la cote 500 m. La cunette qui assure la canalisation des écoulements entre la cote 500 et l'aqueduc sur l'autoroute A9 a été rehaussée et équipée d'un écrêteur de crue à la cote 456, avec réaménagement du terrain permettant un écoulement des laves sous les voies de l'autoroute (avec un mur de protection le long de l'autoroute).

Sous l'autoroute, les mesures envisagées visent à retenir les crues et les matériaux fins, avec la remise en état du dépotoir à la cote 380 m et la construction d'un décan-teur.

L'ensemble de ces travaux atteint un coût approximatif de 22 millions de francs, sans prendre en compte les charges indirectes dues à l'événement.

8. Conclusions

Suite au déclenchement de laves torrentielles, la documentation rapide et la conservation des traces d'un événement est de première importance. Les traces importantes du phénomène avaient déjà disparu deux jours plus tard, lors du déblayement de l'autoroute A9. Un géologue doit pouvoir intervenir dans l'équipe qui effectue la première vision locale et les travaux de documentation car il est le seul à pouvoir identifier le rôle de la lithologie et de la couverture quaternaire dans le déroulement des événements et la provenance du matériel accumulé en aval. Son avis est également prépondérant pour le comité de crise dans le choix des moyens à mettre en oeuvre, juste après l'événement, notamment par l'évaluation des nouvelles conditions de stabilité dans le versant (phénomènes d'érosion et d'accumulation) liées au passage des laves torrentielles. La recherche sur le terrain d'événements passés permet de se faire un modèle géologique du déroulement des phénomènes et d'estimer la période de retour de tels événements.

Lors des travaux de remise en état, le géologue et le géotechnicien peuvent apporter leurs connaissances de la géologie du sous-sol de la région et du comportement géotechnique de ces matériaux pour proposer des mesures d'assainissement.

Cas concret no. 2:

Le glissement de Cernat - La Frasse (VD)

FRANCIS NOVERRAZ*

Résumé

Le glissement de Cernat - La Frasse se situe dans les Préalpes vaudoises sur le versant rive droite de la Grande Eau, dans la vallée des Ormonts. D'un volume estimé à 60 millions de m³, ce glissement connaît des crises périodiques qui nécessitent des travaux permanents d'entretien des routes cantonales Aigle - Col des Mosses et Le Sépey - Leysin. Grâce à une nouvelle interprétation géologique et à une collaboration pluridisciplinaire, des mesures de stabilisation sont proposées pour assainir ce versant instable.

1. Un cadre géologique prédestiné

Le glissement de Cernat - La Frasse est aisément repérable dans le paysage par sa zone de tête déprimée (cirque des Rouvènes) avec zones d'arrachement en tête et latérales, et par sa zone de pied proéminente et évasée, repoussant la rivière vers la rive gauche où l'érosion permanente a créé une falaise verticale. Long de 2 kilomètres et large de 500 m à 800 m, il s'étend entre 1400 m et 820 m d'altitude, avec une pente globale de 13°. Depuis 1850, plusieurs crises ont affecté ce glissement qui est recoupé près de sa base par la route cantonale de 1ère classe 705A Aigle - Col des Mosses et vers 1'060 m par la route cantonale Le Sépey - Leysin (fig. 1)

Le glissement s'est formé au détriment des roches schisto-marneuses et gréseuses du Flysch à Helminthoïdes de la nappe de la Simme, qui occupe le coeur d'un vaste synclinal renversé formé par les roches rigides de la nappe des Préalpes Médiannes (Trias-Malm-Crétacé supérieur-Eocène). Ce synclinal de plan axial parallèle à la vallée et plongeant SE, est éventré par le glissement au niveau de son flanc renversé très mince, vers l'altitude de 1'000 m.

2. Une longue histoire

Le glissement s'est manifesté de façon concrète dès la construction de la route Aigle - Le Sépey par des dégradations périodiques de celle-ci (1848, 1860, 1861, 1877, 1913-19, 1966, 1981-82, 1994) liées à des périodes de haute activité ou de crise du glissement se concrétisant par une avance de un à plusieurs mètres par mois pendant des périodes de quelques mois.

Ces crises, tout au moins les quatre survenues au cours de ce siècle, ont chaque fois

* Laboratoire de mécanique des sols, EPFL, 1015 Lausanne

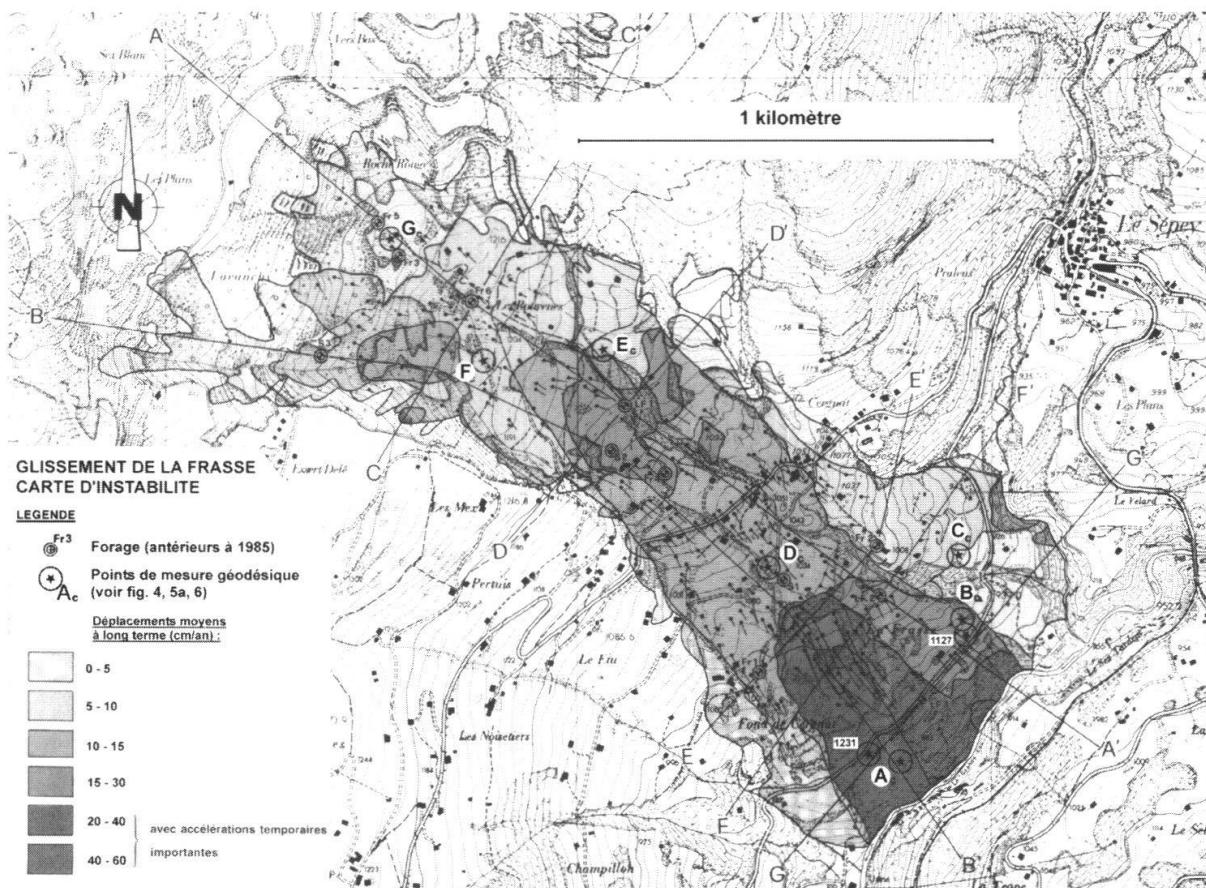


Fig. 1 : Carte du glissement avec zones d'activités différenciées et mesures de mouvements

donné lieu à des études et à des travaux d'assainissement gérés par le Département des travaux publics :

- étude et projet d'assainissement de 1868 (étude Bridel-Venetz-Pasquet)
- étude M. Lugeon et al. en 1919-22, avec 2 galeries de reconnaissance -dont l'une de 200 m- et des travaux de drainage dans la partie supérieure du glissement
- étude J. Norbert-de Cérenville SA de 1984-1988 après la crise de 1981-82 avec une dizaine de forages de reconnaissance équipés d'inclinomètres, des travaux d'assainissement superficiel de la zone basse et la construction d'un mur ancré de soutien de la route Aigle - Le Sépey
- des travaux d'endiguement de la rivière (protection contre l'érosion) en 1986-87
- des travaux de drainage par forages verticaux équipés de pompes électriques dans la partie basse du glissement à la suite de la crise de 1994 (étude J. Norbert géologue).

En outre et en marge de ces études de crises «à chaud», une vaste étude pluridisciplinaire a été menée par l'EPFL (Projet DUTI) sur ce glissement de 1980 à 1984, recourant à la réalisation de six forages de reconnaissance munis d'inclinomètres, à de très larges études géodésiques et photogrammétriques des mouvements, à des investigations géophysiques par sismique-réfraction et par profils de résistivité électrique, à des investigations hydrogéologiques et hydrologiques/climatologiques, etc. (étude DUTI de 1986).

Depuis 1993, l'étude de ce glissement a été partiellement reprise dans le cadre du projet VERSINCLIM (EPFL) pour le Projet National de Recherche 31.

3. Résultats acquis par la géologie seule au cours du siècle

La délimitation cartographique du glissement de la Frasse par le géologue spécialisé ne pose aucun problème aujourd'hui tant ce glissement est morphologiquement bien caractérisé. Il n'en a pas toujours été ainsi puisque la carte géologique «Tours d'Aï» de A. Jeannet (1912-18) ne l'avait pas du tout représenté et compris; la cartographie de M. Lugeon (1922) pour l'étude précitée n'était pas entièrement correcte, pas plus que celle de la feuille 1285 Diablerets de 1940 de l'atlas géologique au 1:25'000 de la Suisse. Il faut attendre 1975 pour la partie haute (feuille 1265 Les Mosses du même atlas), 1985 pour l'ensemble (étude DUTI) et 1990 pour la partie basse (feuille 1285 Les Diablerets, nouvelle édition, de l'atlas 1:25'000) pour arriver à un levé correct du glissement et de son environnement géologique.

4. La géologie, pilote de la pluridisciplinarité pour un résultat optimal

Les études Lugeon et al. (1922) et Bersier-Weidmann (1967) avaient tenté de fournir une représentation cartographique des zones de plus ou moins grande activité en même temps qu'une analyse du mécanisme du glissement. Ces analyses basées sur l'observation de terrain seule (données géologique et morphologique) et pourtant effectuées par des géologues réputés et de haut niveau, ont abouti à un résultat partiellement erroné tant du point de vue cartographique (étude de 1922) que pour l'explication du mécanisme. L'étude de 1967 a proposé pour la première fois un profil longitudinal sommaire du glissement utilisant les résultats des trois premiers forages réalisés et approchant d'assez près la réalité.

Mais ce n'est qu'avec l'étude DUTI, très largement pluridisciplinaire, et où la recherche a été pilotée de bout en bout par la géologie, que le mécanisme du glissement a pu être tiré au clair dans presque toutes ses composantes et qu'une modélisation dynamique à trois dimensions très détaillée et précise a pu être établie : carte d'instabilité 1:5'000 mettant en évidence sept catégories de vitesses (de 0-5 cm/an à 40-60 cm/an, voir fig. 1) réparties selon une vingtaine de zones, parfaitement étayées par les mesures quantitatives géodésiques et photogrammétriques (fig. 2); profils longitudinaux (fig. 3 et fig. 4) et en travers du glissement avec répartition des mouvements en profondeur sur la base des mesures de surface et des mesures inclinométriques.

L'étude a été conçue de telle manière que chaque nouvel élément de donnée était aussitôt exploité pour élaborer la suite des études de la façon la plus rationnelle possible. En particulier, le budget limité obligeait à tirer un parti maximal d'un nombre limité de mètres de forage.

5. D'une vision erronée à une représentation correcte par l'analyse interdisciplinaire

Une première version des profils en long du glissement a été établie sur la base du levé géologique de terrain, des deux premiers forages avec inclinomètres spécifiques à l'étude et des trois forages de 1967 ainsi que des résultats des études géodésiques et photogrammétriques, et a été exploitée par le géotechnicien du projet. Partant des valeurs d'essais géotechniques en laboratoire et de ce profil, celui-ci est

Glissement de
CERGNAT - la FRASSE

Photogrammétrie :
de gauche à droite :
déplacement annuel
moyen pour les périodes
1957-1969, 1969-1974,
1974-1980, 1980-1982

(Photo reproduite avec
l'autorisation de l'Office
fédéral de topographie)

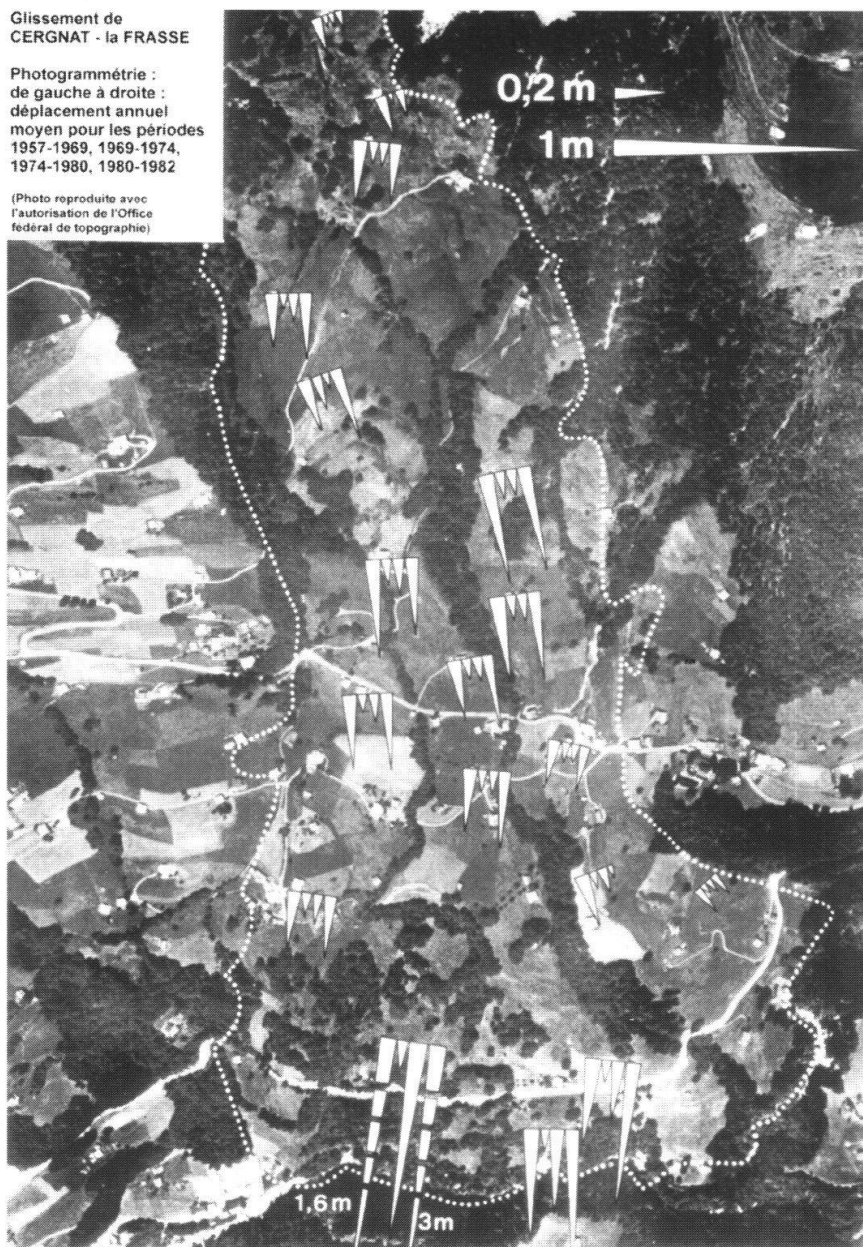


Fig. 2:
Restitution photogram-
métrique des déplace-
ments pour diverses pé-
riodes (Source: Institut
de Photogrammétrie de
l'EPFL)

arrivé à la conclusion (voir fig. 3) que la probabilité de transition de la rupture selon l'analyse probabiliste effectuée (méthode Oboni-Bourdeau), s'élevait à 90 % en amont du glissement sur la surface de glissement basale (profil supérieur fig. 3). Or une telle probabilité était incompatible avec les mouvements observés par mesures géodésiques sur la partie de tête du glissement, plus faibles qu'en aval.

Les causes de cette incompatibilité ne pouvaient résider ni dans les résultats de la mensuration ni dans le principe même de la méthode géotechnique, elles devaient donc se situer au niveau du profil géologique.

Il a dès lors été facile pour le géologue de trouver au niveau des hypothèses ayant servi à l'établissement du profil la cause du problème. La vérification de la nouvelle hypothèse (d'un seuil supplémentaire au niveau des Couches Rouges) au moyen d'un unique forage, que l'on savait devoir être court (Fr3 sur le profil du bas de la figure 3) a été facile à justifier et à budgéter.

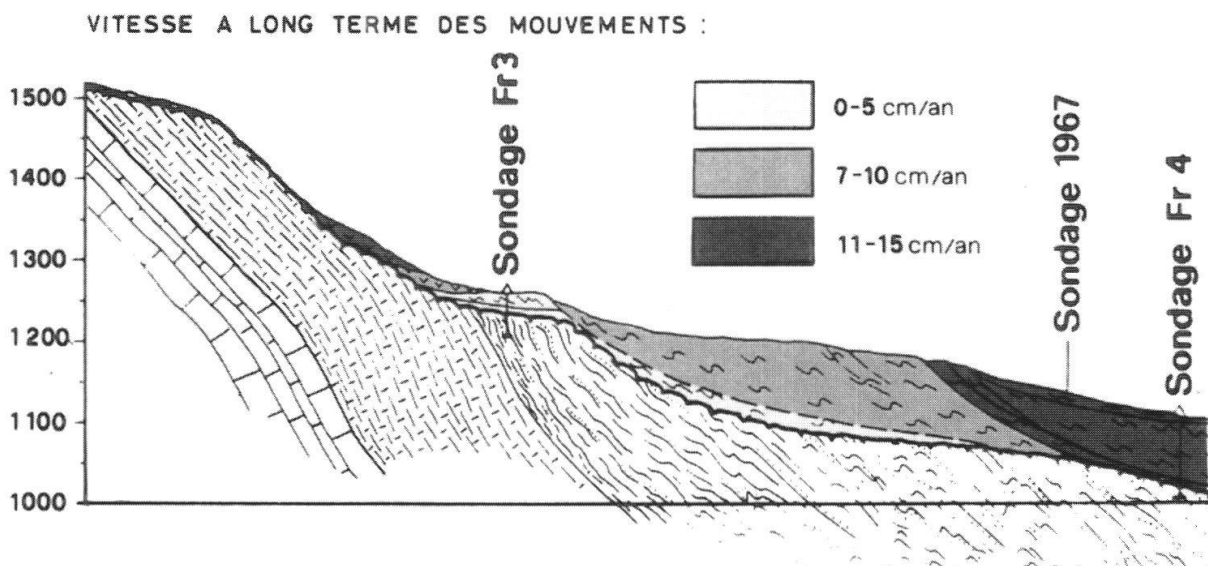
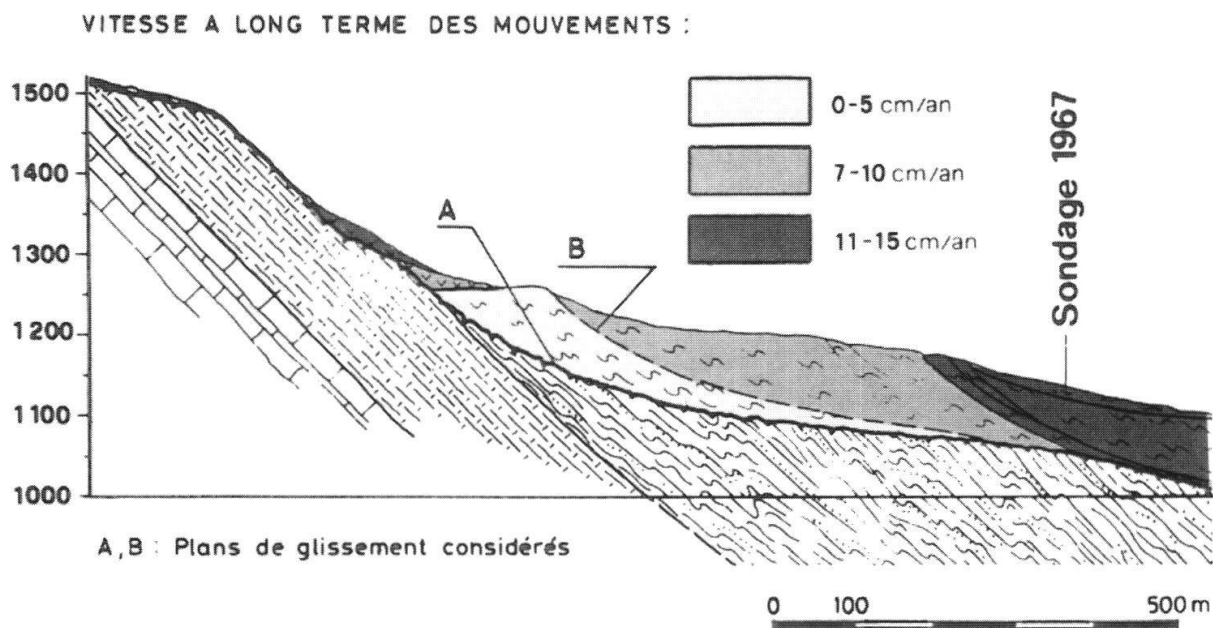


Fig. 3: Profil géologique de la partie haute du glissement avant et après reconsidération du résultat sur la base d'une analyse interdisciplinaire

Ce nouveau forage a effectivement trouvé, à peu de frais, ce seuil rocheux élevé, et une analyse probabiliste effectuée sur la base du profil modifié a vu s'abaisser la probabilité de transition à moins de 35 %, valeur qui devenait compatible.

Ce cas montre l'usage immédiat qui a pu être fait d'une collaboration tridisciplinaire, le profit en terme d'efficacité scientifique et économique qui en a été tiré, et le rôle prépondérant de la géologie dans le processus. Le résultat concret de cette opération était important puisqu'il contribuait à écarter totalement l'hypothèse d'une surcharge motrice du glissement par le haut, et partant, contribuait à orienter différemment l'explication du mécanisme du glissement, et surtout la conception de solutions d'assainissement.

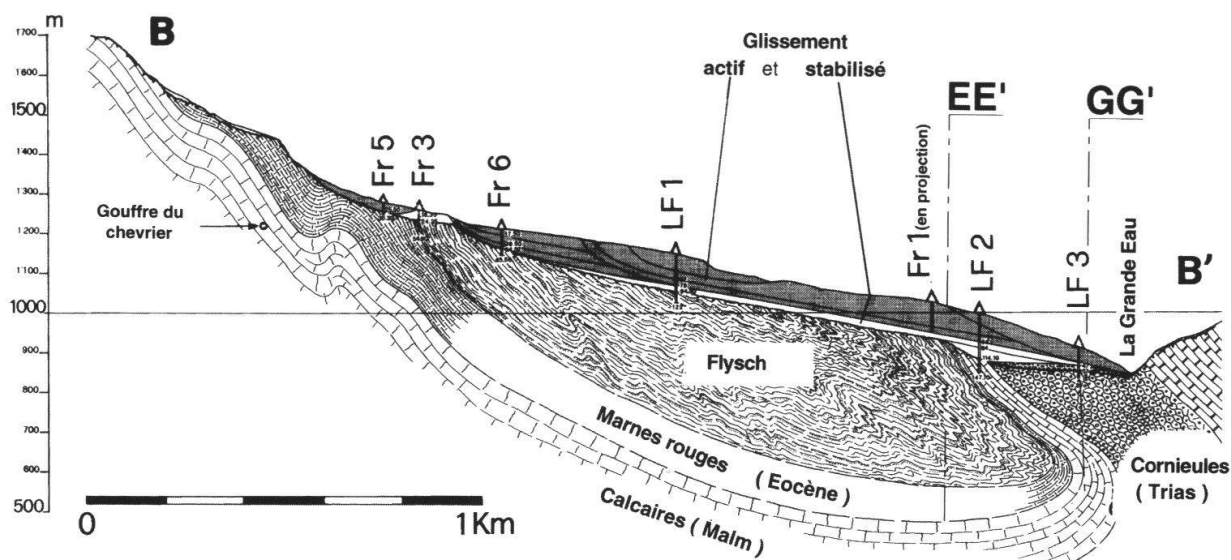


Fig. 4: Profil en long géologique du glissement

6. Reconstitution du mécanisme et des conditions d'évolution du glissement

La comparaison d'états cadastraux graphiques de 1768 et 1861, de 1838 et 1932 (partie haute du glissement), et de 1932 et 1981, ainsi que la redétermination d'anciennes polygonales (route Le Sépey-Leysin, 1951-1982, plateau des Rouvènes, 1932-1981), de repères autour de la route Aigle-Le Sépey (1966-1981/82/83), les mesures de précision à longue distance de nouveaux repères (1981/82-1985) et la détermination photogrammétrique de déplacements sur quatre périodes successives (1957-69, 1969-74, 1974-80, 1980-82, fig. 2) ont fourni les déplacements de plus de 500 points répartis sur la totalité du glissement (une sélection de ces points apparaît sur la fig. 1).

Ces déplacements de surface et en profondeur couvrent des périodes très différentes (court, moyen et long terme) sur 225 ans (fig. 5). Outre la modélisation dynamique du glissement, ils ont permis d'établir la relation apparente selon différents pas de temps avec les données pluviométriques des stations ISM toutes proches de Leysin (1930 à 1976) et du Sépey (dès 1977). Il en est résulté une première ébauche du mécanisme du glissement.

Mais cette relation pluie-mouvements rendait assez mal compte des fortes accélérations périodiques du glissement. Elle n'expliquait pas davantage la constatation, faite à partir des différentes mesures, selon laquelle les mouvements croissent plus ou moins progressivement du haut vers le bas, avec une zone très active plus ou moins indépendante du reste du glissement dans le bas (voir carte fig. 1). D'autre part, il faut relever que cette constatation était incompatible avec les hypothèses des deux études antérieures (1922, 1967/71) selon lesquelles le moteur du glissement était la surcharge créée en amont par les apports de matériaux (Couches Rouges) provenant du cirque des Rouvènes.

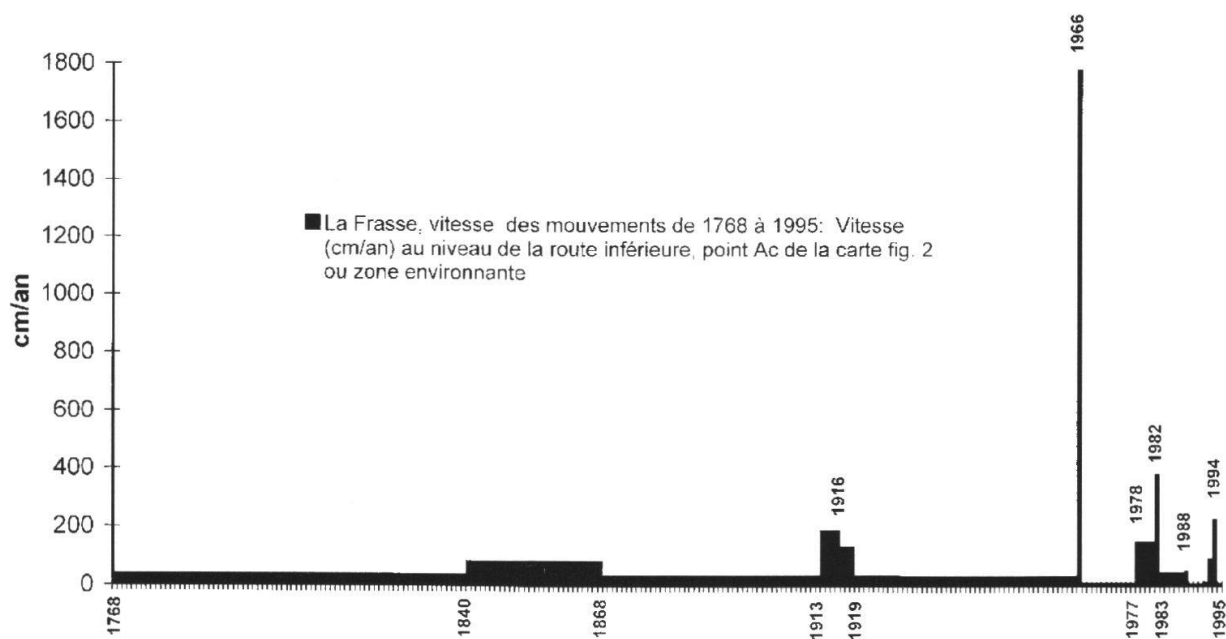


Fig. 5: Vitesse annuelle des mouvements de 1768 à 1995

Il a donc fallu analyser conjointement (fig. 6):

- les données hydrogéologiques des nombreux forages,
- les données hydrogéologiques de surface,
- les données hydrologiques et limnigraphiques avec établissement d'un bilan hydrique du bassin,
- les données pluviométriques.

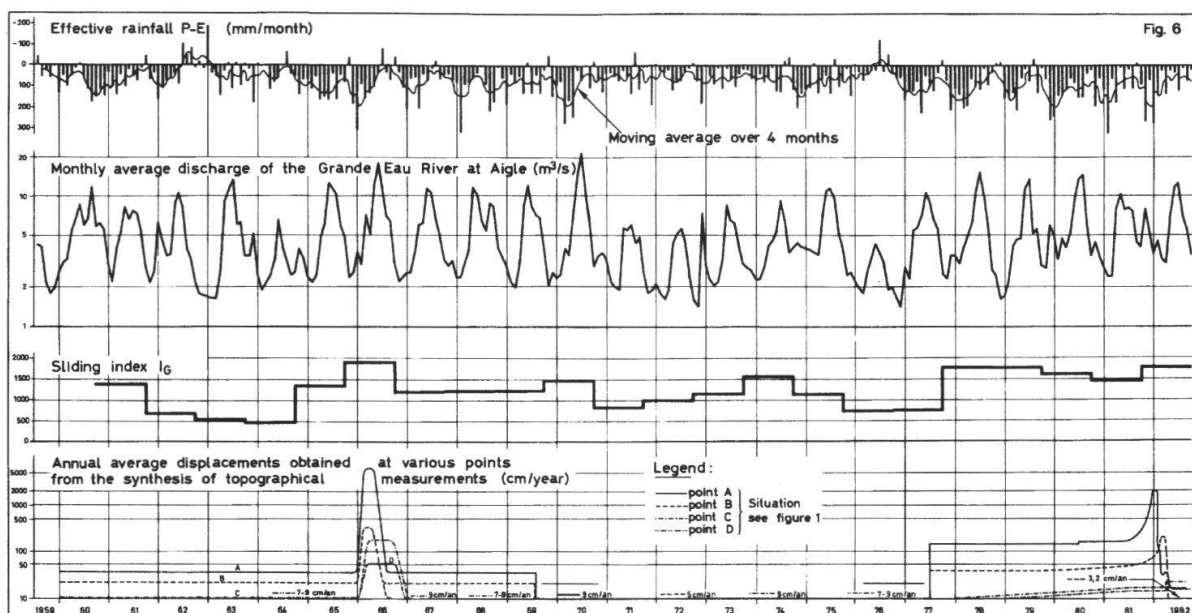


Fig. 6: Evolution comparée des mouvements, de la pluviométrie efficace, des débits de la Grande Eau, et d'un «indice de glissement» intégrant les données climatologiques, les données hydrologiques (lame d'eau écoulee sur le glissement, périodes de restitution excédentaires et déficitaires des eaux souterraines), les données limnigraphiques.

Il a fallu encore:

- examiner en forages la provenance des matériaux constituant le glissement,
- examiner par photogrammétrie l'allure du profil en long du glissement avant/après crise,
- établir un profil en long topographique de la rivière et le comparer aux profils sur d'anciennes cartes (fig. 7),

pour parvenir à expliquer le mécanisme du glissement et les causes des fluctuations très importantes de l'activité de celui-ci.

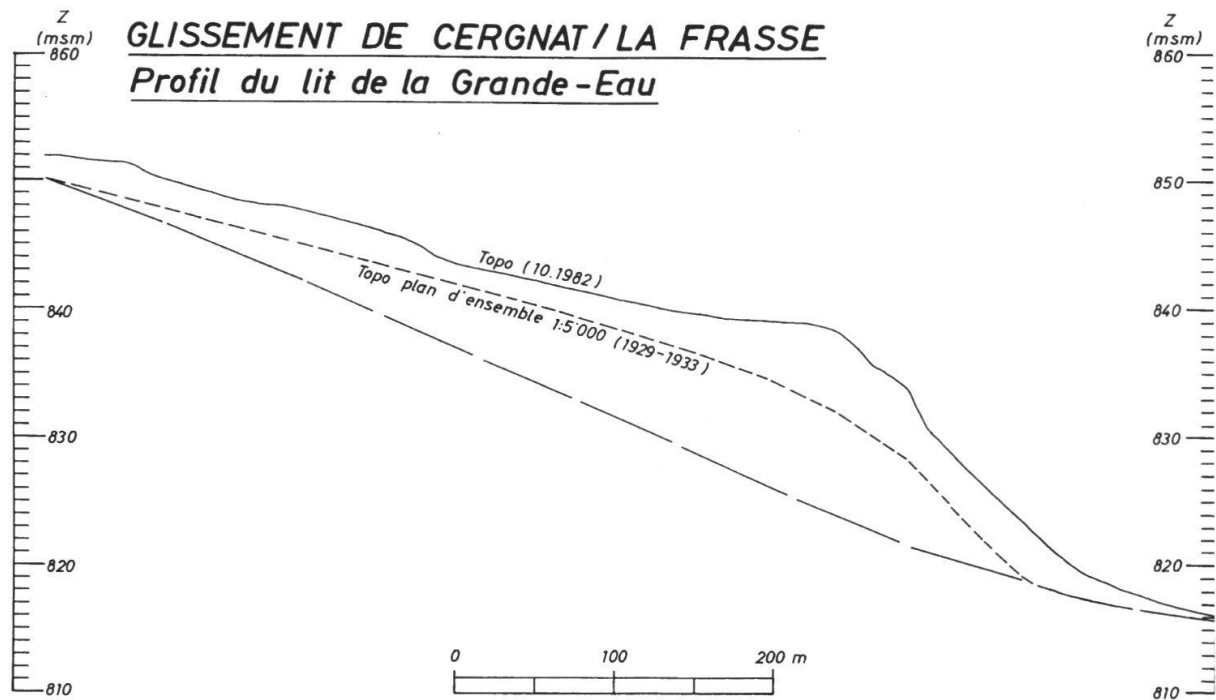


Fig. 7: Evolution comparée du profil en long de la Grande Eau

Il a fallu enfin analyser les données récentes des mesures faites bisannuellement depuis la crise de 1982 par le Service des Routes et la nouvelle crise de 1994 (fig. 8) pour étayer définitivement la thèse précédemment pressentie pour expliquer ce mécanisme.

7. Un mécanisme cyclique

- Le glissement de la Frasse parvient en état de crise potentielle lorsque son niveau de base a été suffisamment abaissé par l'érosion de la Grande Eau pour que les conditions d'équilibre de la partie basse rapide du glissement deviennent critiques;
- dès ce moment, un événement pluvieux important (sur un, deux ou trois mois) mais non exceptionnel (période de retour pluriannuelle) suffit à déclencher la crise;
- celle-ci sera d'autant plus forte que la période d'érosion sans crise aura été plus longue et que le niveau de base du glissement aura été davantage abaissé (ex.:

très fortes crise en 1966 avec 12 m de déplacement, après 47 ans sans crise; crise moindre en 1981/82 avec 4.5 m de déplacement malgré des pluies plus intenses et beaucoup plus prolongées, mais après seulement 15 ans sans crise, dito en 1994) (fig. 6 et 8);

- chaque crise a pour effet de remonter fortement le niveau de base du glissement rapide et de la rivière; celle-ci mettra ensuite une à plusieurs décennies pour évacuer les matériaux et recréer des conditions d'équilibre précaires et propices à une nouvelle crise;
- en même temps, chaque crise abaisse la zone supérieure du glissement rapide ré-activé, ce qui modifie l'état d'équilibre des masses exerçant un effet stabilisant en pied pour le corps principal du glissement de la Frasse; celui-ci se réactive alors à son tour avec un décalage dans le temps de quelques mois à une année, dans une proportion bien moindre que le glissement rapide de la zone basse (1 m environ en 1966);
- après ces périodes de crise, les mouvements ralentissent très rapidement (fig. 8) et l'ensemble du glissement est quasiment stable, ne réagissant pas même aux conditions pluviométriques les plus extrêmes. Cette période de stabilité permet à l'érosion par la rivière de prendre le dessus sur les apports de matériaux par le glissement.

Parallèlement, l'ensemble du glissement subit pendant cette période une compression conduisant à un gonflement de la partie centrale (autour du plateau de Cernat) qui se traduit par une surélévation de celle-ci avant les grandes crises (de 1 à 1,5 m par exemple entre l'état 1957 et l'état 1969, soit avant et après la crise de 1966, tel que vérifié par photogrammétrie).

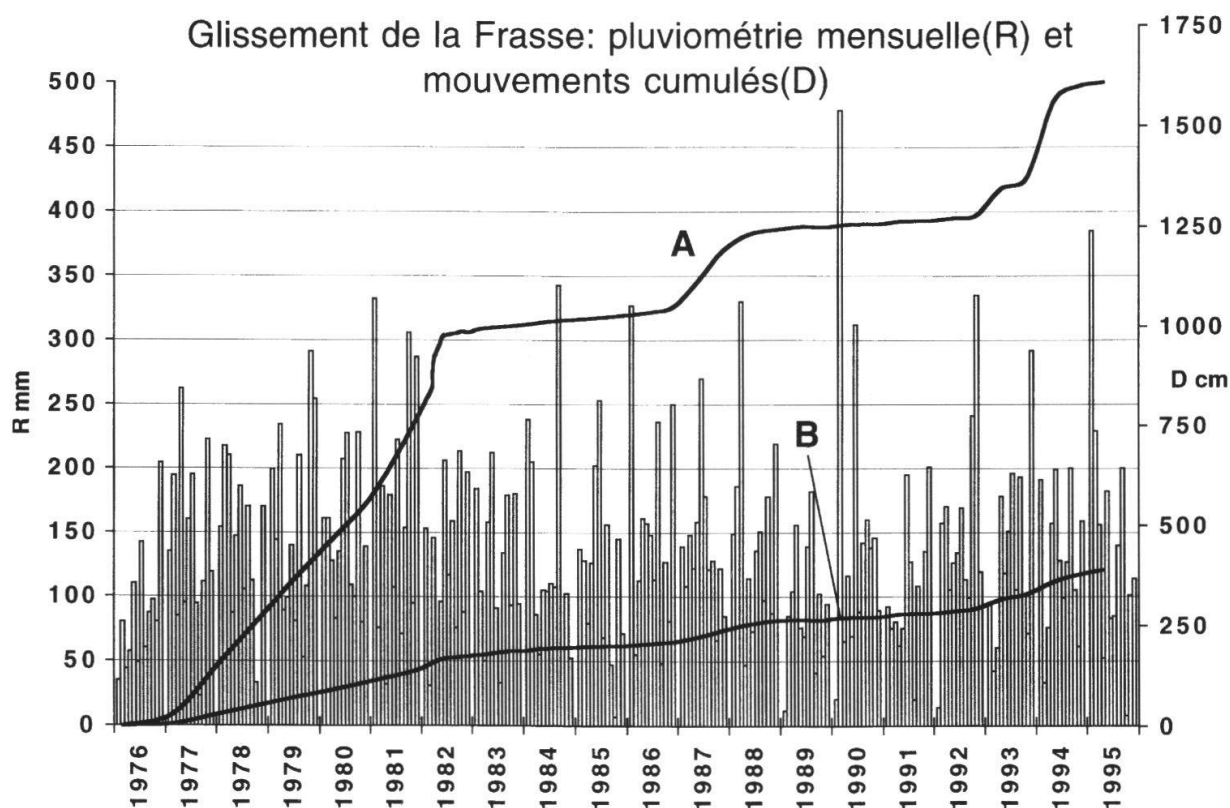


Fig. 8: Evolution comparée des mouvements de 1976 à 1995 et de la pluviométrie mensuelle (station ISM du Sépey); points A et B: voir fig.1

Cette double modification lente du profil en long du glissement conduit ainsi à une dégradation progressive des conditions d'équilibre générales de celui-ci, préparant les conditions d'une nouvelle crise.

- ces cycles durent de une à quelques décennies selon l'importance de la pluviométrie et selon le nombre de périodes de crue de la rivière;
- les conditions hydrogéologiques générales du glissement ne sont pas déterminantes lorsque les conditions du profil d'équilibre du glissement ne sont pas propices au déclenchement d'une crise. Ce fait est confirmé par l'état sous-saturé et drainant permanent du massif rocheux (Trias) dans la zone du glissement inférieur rapide par lequel débutent pourtant les crises, alors que, parallèlement, des conditions fortement artésiennes permanentes ont été mises en évidence dans la partie centrale (Flysch) du glissement principal, par lequel s'effectue l'alimentation en eau souterraine du glissement rapide inférieur.

8. Mesures d'assainissement envisageables

Dans le cas du glissement de la Frasse, le mécanisme implique les mesures de stabilisation suivantes:

- Le lit de la rivière doit être stabilisé en position haute (c'est-à-dire en position d'après-crise) de manière à maintenir l'activité du glissement inférieur rapide à son niveau le plus bas (de l'ordre de 7 à 9 cm/an), tel qu'on l'observe pendant un certain nombre d'années après chaque crise, sachant que ce niveau est peu gênant pour la route et les infrastructures;
- cette correction du lit peut être obtenue de manière classique au moyen de seuils; ces seuils devraient être très massifs (béton armé), solidement accrochés à la paroi calcaire stable de la rive gauche, mais ils ne devraient en revanche offrir qu'un minimum de résistance à la poussée du glissement, afin d'éviter leur écrasement: ce résultat peut être obtenu par exemple en réalisant des seuils se terminant en fuseau sur rive droite, de manière à poinçonner la masse glissée; il appartiendrait à la rivière d'éliminer au fur et à mesure les matériaux glissés submergeant l'aile droite des seuils ainsi conçus. La construction d'ouvrages destinés à lutter contre l'érosion latérale (ouvrages parallèles au lit de la rivière) est en revanche inappropriée en raison des poussées du glissement, qui subsisteront même en cas de réduction de l'activité de celui-ci; il est d'autre part contre-indiqué de chercher à supprimer l'évacuation des matériaux glissés par la Grande Eau, si une galerie de dérivation de celle-ci n'est pas préalablement réalisée. Cette dernière option, déjà évoquée et condamnée dans le rapport Lugeon et al. de 1922, n'est pas sans dangers dans le cas de la Frasse.
- l'activité du glissement étant ainsi maintenue à son plus faible niveau dans la zone de pied du glissement, il resterait alors à réduire l'activité de l'ensemble du glissement principal, qui est, elle, régie par les eaux souterraines et sur laquelle les travaux précités n'auraient que peu d'effets à long terme. Les mesures à prendre, plus coûteuses mais moins urgentes, consisteraient à réduire les sous-pressions et les principaux apports d'eau, observés dans le massif rocheux (Flysch) sous la partie centrale du glissement.
- Ces mesures ne peuvent consister qu'en la réalisation de galeries de drainage si-

tuées dans le massif rocheux en place, à l'abri des mouvements, une dizaine de mètres sous le glissement; ces galeries devraient avoir un diamètre suffisant pour permettre la réalisation de forages drainants remontant en direction de la surface de glissement la plus profonde, destinés à capter les eaux circulant à la base du glissement

Ces mesures d'assainissement, dont le coût est à l'échelle du glissement, c'est-à-dire élevé, permettraient de réduire les mouvements de celui-ci à un niveau très bas et vraisemblablement sans inconvénients pour les deux routes cantonales et pour les bâtiments, avec une probabilité de réussite élevée.

9. Conclusions

Ces résultats difficiles à établir n'ont pu être obtenus que grâce à une collaboration pluridisciplinaire étroite et continue dans laquelle le géologue et la géologie jouaient un rôle indispensable dans la coordination et dans la synthèse des résultats. Ils ont amenés à la conclusion que la «gestion» du mécanisme du glissement était assurée par le travail d'évacuation des matériaux par la rivière d'une part pour ce qui concerne les cycles d'activité, par les conditions hydrogéologiques dans la partie médiane du glissement, d'autre part pour l'alimentation en eaux souterraines du glissement nécessaire à l'entretien d'une activité permanente et de crise. Par contre, l'hypothèse d'une surcharge en matériaux dans la partie haute du glissement, évoquée comme moteur de l'activité par les précédentes études, s'est révélée incorrecte.

D'une manière générale, ces conclusions concernant le mécanisme du glissement sont impossibles à établir à partir d'une simple étude de terrain, dans le cas du glissement de la Frasse comme dans la plupart des cas de grands glissements. Elles exigent non seulement le concours du géologue, mais nécessitent de la part de celui-ci une bonne préscience de ce que l'on doit chercher à établir et une connaissance de ce que l'on peut obtenir par le recours à d'autres disciplines. C'est au géologue qu'incombe la coordination interdisciplinaire si l'on veut que celle-ci reste tendue vers le but qui consiste à expliquer un mécanisme de nature essentiellement géologique. De l'explication de ce mécanisme découleront les solutions d'assainissement, de stabilisation ou d'adaptations constructives aux mouvements et aux autres conséquences de l'activité du glissement.

Références bibliographiques

- BERSIER, A., WEIDMANN, M. 1970 : Le glissement de terrain de Cergnat-la Frasse (Ormont-Dessous, Vaud). Bull. Soc. Vaud. Sc. nat., 334, 7.
- BONNARD CH., NOVERRAZ F., PARRIAUX A. 1987: Origin of Groundwater likely to affect a large landslide. Proc. IXth Eur. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Dublin.
- BRIDEL G., VENETZ O., PASQUET X. 1868: Rapport sur le glissement de terrain «à la Frasse», archives Serv. des Eaux, (inédit).
- DUTI 1985: Les travaux de mensuration en terrains instables, EPFL.
- DUTI 1986: Le glissement de Cergnat-la Frasse; analyse pluridisciplinaire. Dossier final d'études. EPFL.
- ENGEL, TH. 1986: Nouvelles méthodes de mesure et d'analyse pour l'étude des mouvements du sol en terrains instables. Thèse No 601, DGRG, EPFL.
- LUGEON, M., PASCHOUD, E. & ROTHPLATZ, A. 1922 : Rapport d'expertise sur le glissement des Frasses. Etat de Vaud, Dpt des Trav. Publics, Serv. des Routes (non publ.).

Cas concret no. 3:

Glissement de la Cornalle

AURELE PARRIAUX*

Résumé

Le glissement de la Cornalle - Les Luges est un cas typique des mouvements de terrains affectant l'adret lémanique, parcourant le versant des crêtes du bassin jusque dans le lac. Cette masse instable, allongée, est apparue au dernier retrait glaciaire. Elle a causé périodiquement des difficultés sur les voies de communication. Dans les années septante, des travaux de génie civil pour la construction de l'autoroute du Léman ont permis de bien connaître la nature géologique des mouvements, de concevoir et de construire des ouvrages de stabilisation qui sont toujours efficaces aujourd'hui. C'est l'histoire d'un succès de la collaboration étroite géologue - ingénieur civil.

1. Le cas et de ses enjeux

Le versant de Lavaux est connu de la population pour ses paysages idylliques et pour ses vins. Le géologue les connaît aussi, mais sous un aspect moins réjouissant : leur grande instabilité résultant de phénomènes de toutes sortes (glissements anciens prêts à se réactiver à la moindre petite entaille, éboulement de falaises de poudingue menaçant les nombreuses constructions, coulées boueuses etc). Le glissement de la Cornalle - Les Luges (fig. 1) est l'un de ces cas, qui s'est distingué toutefois par une activité importante au cours de l'histoire et qui cause encore des dégâts permanents aux murs de vignes à l'est d'Epesses et aux routes cantonales

C'est le chemin de fer qui fut la première infrastructure importante à devoir défier ces phénomènes. Dans la seconde moitié du siècle dernier, des travaux importants ont été consacrés au franchissement de ces glissements par les deux lignes : Lausanne - Berne à mi-coteau et la ligne du Simplon au pied du versant. Mais à l'époque, la connaissance que l'on avait de ces phénomènes géologiques était encore embryonnaire et les techniques de l'ingénieur n'étaient pas aussi performantes que celles d'aujourd'hui. En particulier, les difficultés d'évacuation des terres expliquent pourquoi les dépressions ont été franchies par des remblais provenant de la creuse des tranchées et tunnels. Or, on sait que les remblais sont en principe défavorables à la stabilité des terrains dans le sens où ils surchargent les masses en glissement potentiel.

* Ecole polytechnique fédérale, Laboratoire de géologie, 1015 Lausanne

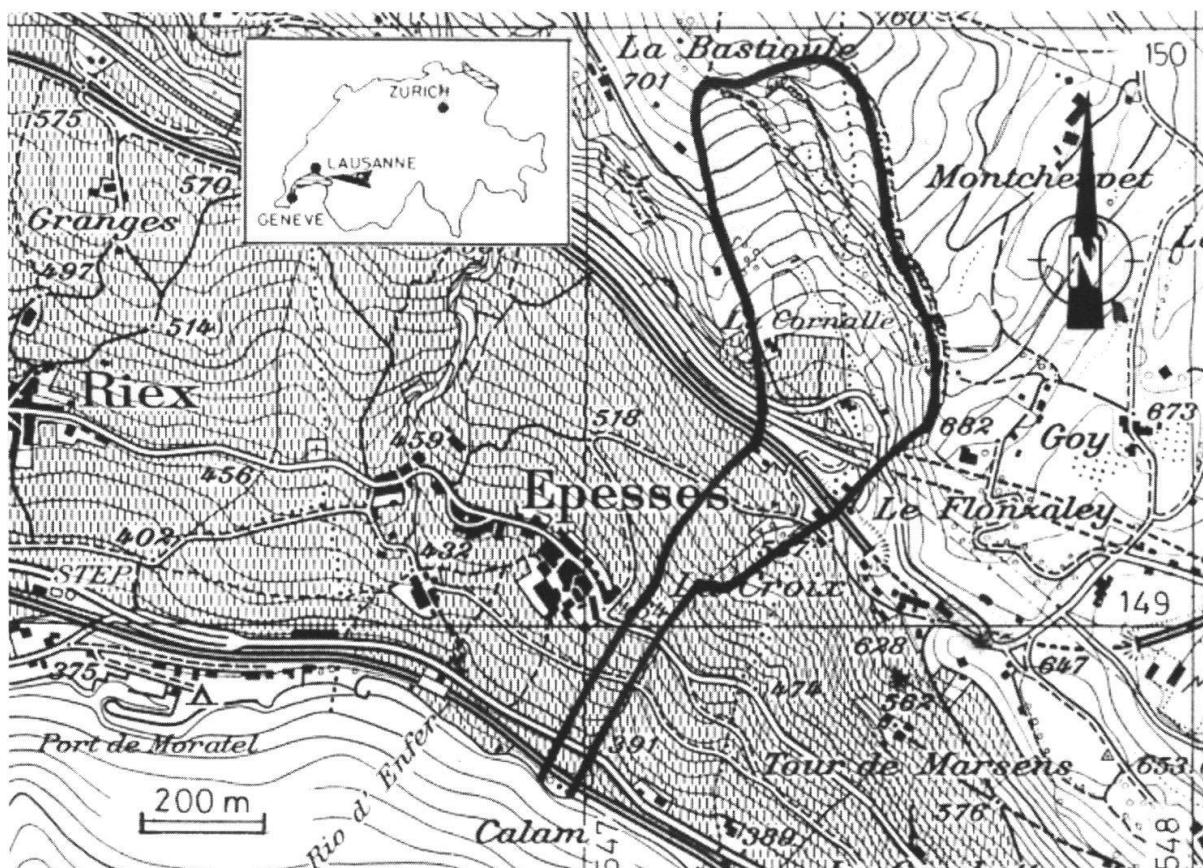


Fig. 1: Le glissement de la Cornalle - Les Luges, un étroit «chenal» instable qui se jette dans le Léman.

Ce n'est qu'un siècle plus tard environ que fut construite la deuxième grande infrastructure : l'autoroute du Léman. Entre Chexbres et Lausanne, les tunnels et viaducs se succèdent traversant de nombreuses zones instables qui parcourent le versant tout entier, depuis la crête jusqu'au Léman. Elle parcourt le versant à mi-hauteur, un peu en amont de la ligne CFF.

Le franchissement du glissement de la Cornalle par ces deux vecteurs de trafic d'époque si différente est très instructif sur l'interaction géologie - génie civil. Nous verrons les apports des reconnaissances géologiques dans le choix de solutions constructives adéquates.

Si le présent article traite du glissement La Cornalle - Les Luges dans son entier, il se concentre toutefois sur le site de franchissement par l'autoroute. Il s'agit en effet des travaux les plus importants effectués dans cette zone et c'est à ces travaux-là qu'a participé personnellement son auteur.

2 Conditions géologiques

2.1 Contexte général

Le glissement de la Cornalle résulte de l'altération des molasse subalpines du Chatien (Weidmann 1988), qui forment le substrat rocheux de Lavaux depuis Vevey jusqu'à Belmont. Au droit de la Cornalle, la roche en place se présente sous la for-

me d'un empilement régulier de couches de marnes, de microgrès et de grès dont l'épaisseur ne dépasse que rarement trois mètres. Elle est parcourue par une fracturation intense provenant de sa mise en place au front des Alpes. Près de la surface, les mécanismes de l'altération agissent avec efficacité : les grès perdent en partie leur cohésion par la dissolution de leur ciment calcaire en contact avec les eaux acides du sol; les marnes et les grès marneux se fragmentent en raison de leur sensibilité à l'eau et au gel; elles acquièrent ainsi un comportement plastique.

La plupart des glissements de Lavaux se sont déclenchés lors du dernier retrait glaciaire de la dépression lémanique, il y a une quinzaine de milliers d'années.

2.2 Conditions locales

Le glissement de la Cornalle, dans sa morphologie actuelle, est marqué à son sommet par un paquet de roches qui s'est affaissé d'une trentaine de mètres (fig 1), à la faveur d'une direction de fissuration privilégiée. La structure stratifiée originelle est peu perturbée par ce mécanisme. Puis, ce paquet passe peu à peu à des masses plus informes dans lesquelles l'arrangement sédimentaire est progressivement détruit. Finalement, au droit des fondations de l'autoroute, le glissement est constitué d'une pâte homogène isotrope d'argile à blocs de grès épars, sans aucune structure. Cette masse glisse en profondeur sur les couches de la roche en place par l'intermédiaire d'une surface lustrée et striée.

Le substrat rocheux joue ici un rôle particulièrement défavorable en raison du pendage des couches (voir 2.4) et des propriétés hydrogéologiques qui sont celles d'un aquifère fissural typique de la molasse subalpine (Parriaux et al. 1990). Des sources alimentant Epesses sont du reste captées dans ces roches sous le glissement. Durant les périodes à forte hydraulicité, les diaclases ouvertes exercent une forte charge hydrostatique sous la masse glissée qui tend à la déstabiliser.

2.3 Méthodes d'investigation en vue de la construction

Les reconnaissances géologiques nécessaires pour résoudre le problème de l'autoroute ont été effectuées par le Professeur Arnold Bersier et ses collaborateurs. Elles ont permis d'identifier la géométrie et la nature du glissement, de sa source au tronçon à franchir. On a fait appel à toutes les méthodes géologiques adaptées à ce genre de problème. Un accent particulier a été mis dans la cartographie géologique de détail qui a donné d'excellents renseignements sur la géométrie et la dynamique des masses instables. De nombreux sondages mécaniques ont précisé la taille de ces masses et la nature des terrains en mouvement. Le caractère aquifère des terrains glissés et du substratum ont été confirmés.

A l'endroit du franchissement du glissement par l'autoroute, la masse instable est large d'environ 130 mètres. Son épaisseur varie entre une dizaine de mètres à l'amont et sur la rive ouest et plus de 20 mètres sur le côté est et à l'aval.

Un modèle infographique tridimensionnel (fig. 2) sert de support à cette géométrie et montre également comment les ponts autoroutiers ont été fondés.

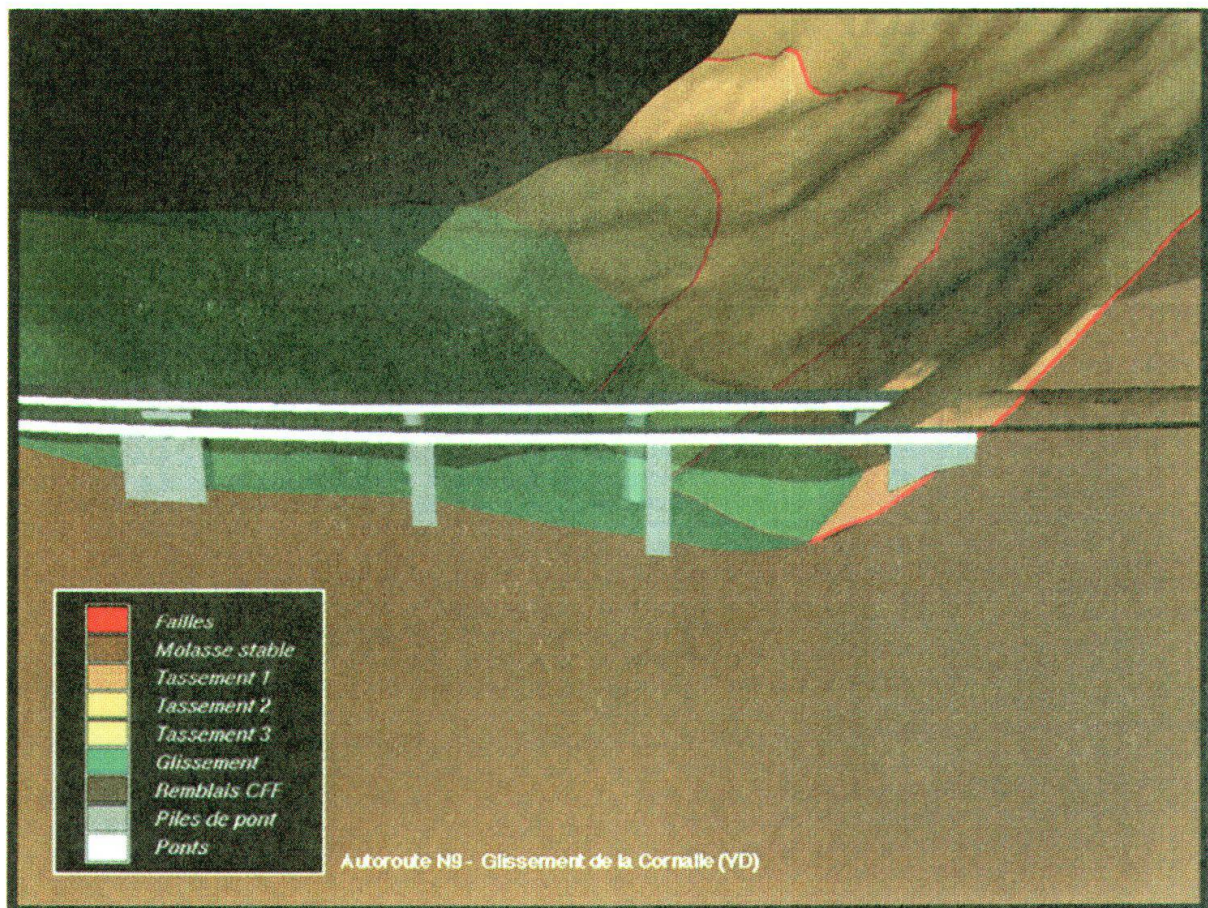


Fig. 2: infographie géologique tridimensionnelle du glissement de la Cornalle dans la zone du franchissement par l'autoroute N9 (tiré de Mayoraz 1993).

2.4. Causes de l'instabilité

Quelles sont les causes de ce glissement qui parcourt ainsi le versant, des crêtes jusqu'au lac ? On pourrait dire, par analogie avec la médecine, que le Lavaux souffre des glissements de manière endémique. Ceci provient d'une manière générale des facteurs géologiques suivants :

- la pente très raide du versant taillé par le glacier du Rhône, qui agit comme effort moteur des mouvements
les plaquages glaciaires posés en position d'équilibre limite sur le substrat rocheux
- le pendage des couches souvent orienté vers la pente
l'altérabilité du substratum rocheux par les phénomènes de décalcification, de sensibilité à l'eau et au gel ainsi que par la forte fracturation
- le caractère plastique des résidus d'altération des roches molassiques marneuses, donc mouvements de fluage si la teneur en eau est suffisante
- la présence de nappes souterraines fissurales dans les couches de grès du substrat, qui favorise par le bas l'imbibition permanente et la plasticité des masses glissées et des poussées hydrostatiques

En résumé, le glissement de la Cornalle - Les Luges montre une instabilité particulière qui provient surtout des grands paquets de roche affaissée du haut du versant;

ils sont une source abondante de matériel plastique qui ne trouve jamais sa stabilité avant d'atteindre le lac.

2.5 Les risques

Le danger «glissement de terrain» a préoccupé de tout temps les habitants de la région et les ingénieurs des voies de communication. Les études historiques et la datation de débris de bois rapportées dans Bersier et al (1975) semblent montrer que le glissement Cornalle - Les Luges n'a subi que de rares mouvements vraiment catastrophiques à l'échelle de la masse entière. Leur période de retour est de l'ordre de une à deux fois par millénaire; par contre, des accélérations locales du mouvement général lent reviennent plusieurs fois par siècle.

Cette histoire du comportement «naturel» du glissement a rapidement convaincu les ingénieurs du 19 et du 20e siècle que la probabilité du danger était trop importante pour y exposer leurs ouvrages sans tenter de réduire artificiellement le danger. On n'ose songer aux effets d'une coupure de plusieurs mois de la ligne Lausanne - Berne.

3. Travaux de génie civil

Les ingénieurs des chemins de fer ont utilisé au mieux les techniques du génie civil du milieu du 19e siècle. Le remblai utilisé pour franchir le glissement de la Cornalle a été muni semble-t-il d'énormes piles en maçonnerie (Bersier et al., 1975) servant d'«armature». Par les drainages profonds, ils arrivèrent à modérer suffisamment les mouvements pour que ceux-ci soient compensés par la recharge périodique du ballast à la surface du remblai. Cette technique n'est évidemment pas applicable à une autoroute.

Le franchissement du glissement de la Cornalle par la N9 a été un défi pour les ingénieurs du Bureau des autoroutes. Une quinzaine d'années avant l'étude, un mouvement très actif dans cette zone avait bouleversé sa topographie. Les travaux de stabilisation entrepris au siècle dernier par les CFF avaient semble-t-il évité une propagation massive du déplacement vers l'aval. Vu la longueur importante de l'intersection avec le glissement, il s'avérait difficile de construire des ponts sans appuis au droit de la masse instable. En outre, les appuis rocheux de part et d'autre du glissement sont affectés par une tectonisation importante côté Lausanne et des signes d'affaissements légers à l'entrée du tunnel en direction de Vevey.

Pour résoudre l'interaction glissement - ponts, les travaux de construction de l'autoroute ont été basés sur deux principes : la stabilisation de la masse et des fondations spéciales.

3.1 Stabilisation la masse en glissement au droit des fondations du pont.

Le franchissement du glissement par l'autoroute ne nécessitait pas une stabilisation de toute la langue, du sommet du versant au niveau du lac. Il s'agissait plutôt de sécuriser une zone comprenant les fondations du pont et une zone tampon en amont des ouvrages permettant de retenir des mouvements venant du haut. A l'aval, la zone du remblai des CFF avait montré un effet de retenue assez convaincant lors des

Pour ce faire, il a fallu drainer les eaux profondes par une galerie nouvelle implantée dans l'axe de la masse glissée, à cheval sur la surface de cisaillement. Elle capte ainsi à la fois la base du glissement et la roche en place (fig 3). Des puits forés depuis la surface et remplis de béton poreux amènent encore à la galerie les eaux rencontrées dans la masse glissée elle-même.

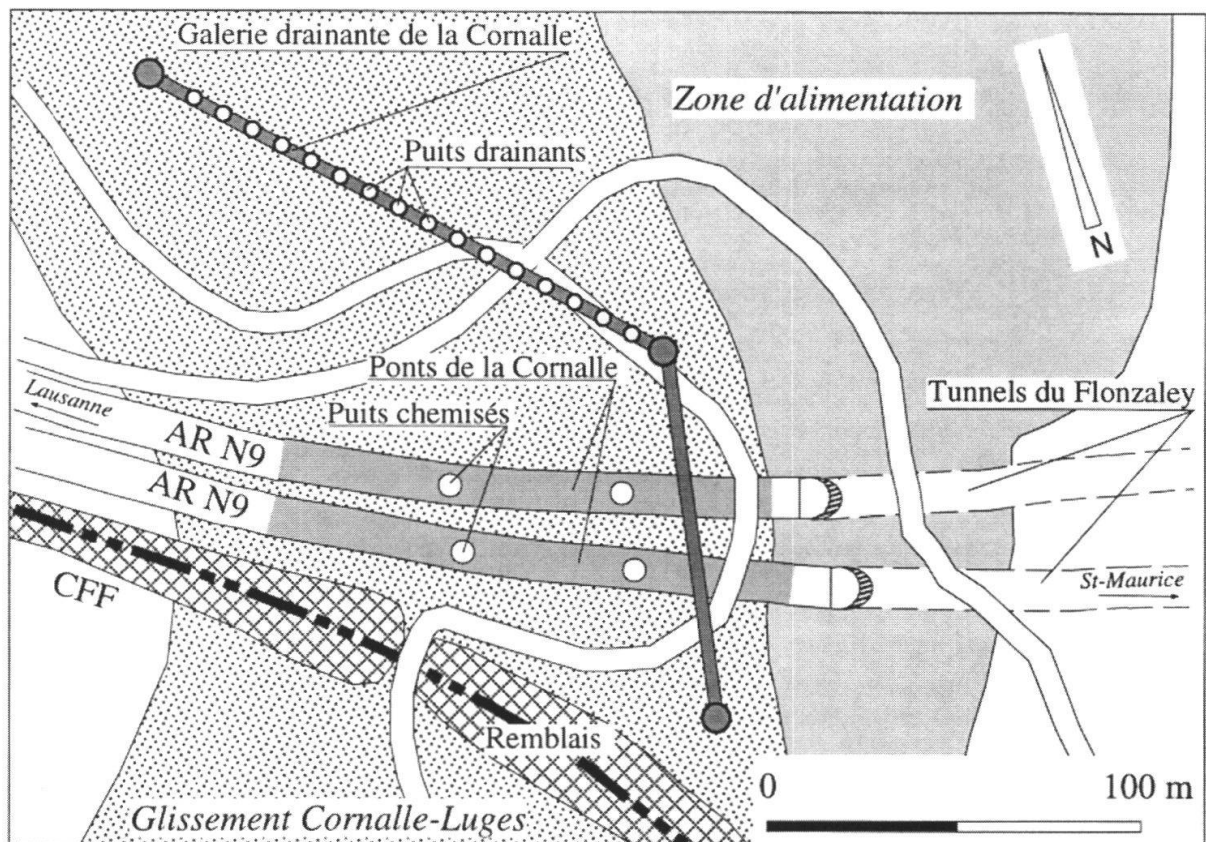


Fig. 3: galerie de rabattement des eaux souterraines, avec puits drainants (d'après documentation du Bureau des autoroutes du canton de Vaud).

Les fondations des deux viaducs franchissant le glissement ont prévenu toute éventualité de déplacement grâce à la technique des piles chemisées (fig 4). L'espace entre le puits, solidaire du glissement, et la pile implantée dans la roche en place permet d'absorber un éventuel déplacement résiduel et d'intervenir le cas échéant avant que la fondation du pont ne se déplace.

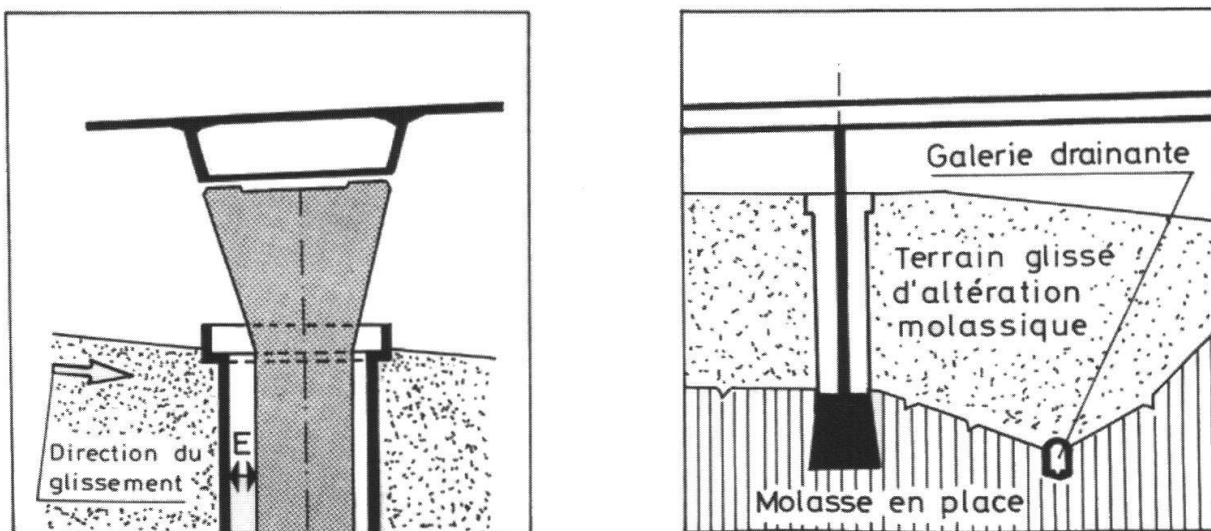


Fig. 4: piles chemisées dans les puits de fondation du pont; l'espace E permet un éventuel déplacement du glissement sans mettre en péril gravement l'ouvrage (d'après documentation du Bureau des autoroutes du canton de Vaud).

4. Résultats des travaux

Il y a maintenant environ 25 ans que ces ouvrages de stabilisation ont été construits. Les contrôles effectués par le Bureau des autoroutes n'ont montré aucun mouvement notable susceptible de détériorer cette voie de communication importante. Durant les dernières dix années au minimum, les CFF n'ont pas eu à recharger particulièrement leur remblai. Pourtant, plusieurs mouvements ont été observés durant cette période plus en amont, dans la zone d'alimentation du glissement. Le concept de stabilisation a donc fait ses preuves sur un quart de siècle.

La partie inférieure de la langue glissée (Les Luges) est restée en activité ces dernières années. Les travaux qui y ont été entrepris en tout temps n'ont pas obtenu de stabilisation généralisée. Actuellement, le bureau Karakas et Français exécute des travaux de confortation dans la partie médiane.

Après la réalisation de ces travaux, comment évaluer le risque que courent la ligne CFF et l'autoroute ? Il est en principe possible de calculer un risque (produit de la probabilité d'un événement catastrophique et de son coût). Cette opération est cependant extrêmement difficile surtout en raison des critères permettant de déterminer la période de retour d'un événement de glissement qui rendrait inutilisables ces infrastructures.

Plutôt que de se hasarder dans des nombres fortement contestables, nous dirons que les travaux de construction de l'autoroute ont fortement amélioré les conditions naturelles et qu'ils constituent la meilleure sécurité raisonnablement possible. Il reste toutefois que la probabilité d'un événement destructeur n'est pas nulle. En effet, les processus d'accumulation de matière instable en amont du site continuent. Dans ce sens, on ne peut que recommander aux responsables des voies de communication de mettre en place un réseau d'observation géologique, topographique et hydrogéologique, dont les mesures devraient être intensifiées durant les périodes de précipitations exceptionnelles.

5. Conclusion

Lors du franchissement du glissement de la Cornalle par deux voies de communication, les méthodes du génie civil se sont attaquées avec succès aux instabilités naturelles. Cette victoire dure depuis 140 ans pour le train, 30 ans pour la route. Quand et comment la nature reprendra-t-elle ses droits ? Difficile à prédire. Mais facile à surveiller.

Remerciements

L'auteur tient à remercier pour leurs informations M. B. Graf, ingénieur au Bureau des autoroutes VD, M. A. Gertsch, ingénieur aux CFF, ainsi que MM. K. Karakas et O. Français, ingénieurs

Bibliographie

- BERSIER A., BLANC P., WEIDMANN, M.: Le glissement de terrain La Cornalle - Les Luges (Epesses, Vaud, Suisse)
- MAYORAZ, R. 1993: Modélisation et visualisation de structures tridimensionnelles et de propriétés géologiques. Thèse No 1127, EPFL, Lausanne.
- PARRIAUX A., DUBOIS J.D., MANDIA Y., BASABE P. & BENSIMON M. 1990: The AQUITYP project: towards an aquifer typology in the alpine orogen. Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, EPFL, Lausanne, Part 1, 254-262.
- WEIDMANN M. 1988: Feuille Lausanne de l'Atlas géologique de la Suisse.

Fallbeispiel Nr. 4:

Murgang von Selzach 1970

PETER JORDAN*

Zusammenfassung

Die Ereignisse von 21./22. April 1970 zeigen, dass grössere Murgänge auch im Jura möglich sind. Kurz nachdem ein Erdrutsch eine enge Schlucht verstopft hatte, lösten sich aus den durch Schneeschmelze und Starkregen aufgeweichten Massen mehrere Murgänge. Die Murgänge überfluteten verschiedene Ortsteile von Selzach, unterbrachen wichtige Bahn- und Strassenverbindungen und erreichten schliesslich die rund 5 km entfernte Aare.

Die unmittelbar nach dem Rutsch einsetzenden geologischen Untersuchungen brachten nicht nur Licht in die Ursachen und Abläufe der Ereignisse, vielmehr klärten sie die kurz- und mittelfristigen Gefahrenszenarien ab und zeichneten Sanierungsmöglichkeiten auf. Entgegen der landläufigen Meinung wurde nicht das Rutschgebiet vom April 1970, sondern benachbarte Regionen als potentielle Ausbruchgebiete zukünftiger Ereignisse erkannt. Seither werden regelmässig hydrogeologische und geodätische Messungen und periodisch Erfolgskontrollen der Sanierungsmassnahmen durchgeführt. Im potentiellen Ablagerungsgebiet wurde eine Gefahrenzone ausgeschieden.

1. Ereignisse

Nach einer Periode starker Niederschläge, welche die einsetzende Schneeschmelze überlagerte, lösten sich ab dem 17. April 1970 am Schauenburgschwang (Landes-Koordinaten 599700 / 231500) grössere Erdmassen und verstopften die südlich gelegene, an der Basis kaum 5 m breite Lochbachklamm bis zu einer Höhe von über 20 Metern. Am 21. April löste sich aus dieser angestauten Masse der erste, am 22. April der zweite und grösste Murgang. In den Tagen darauf folgten noch einige kleinere Murgänge. Schon der erste Murgang überflutete, obwohl grössere Massen in den dazwischenliegenden Wäldern zurückgehalten wurden, den 2 km entfernten Selzacher Ortsteil Chänelmoos mit Schlamm, Steinblöcken, Eisschollen und Holzstämmen (Figur 1). Spätere Murgänge durchbrachen den Selzacher Dorfkern, überfluteten die Kantonsstrasse und die Eisenbahnlinie Grenchen - Solothurn und erreichten schlussendlich die Aare bei Altreu. Die Gesamtkubatur der Murgänge wird auf 100'000 bis 120'000 m³ geschätzt. Neben dem Unterbruch der wichtigen Verkehrsachsen waren namhafte Schäden an Gebäuden und eine grossräumige, dezimeterhohe Übersarung des landwirtschaftlichen Kulturlands festzustellen. Dank rechtzeitiger Warnung waren keine Menschenleben zu beklagen.

* Amt für Wasserwirtschaft, Rötihof, 4500 Solothurn



Fig. 1: Häuser von Chänelmoos nach dem Murgang (Zeitungsbild Oltener Tagblatt vom 24. April 1970).

Im Anschluss an den Murgang stellten sich verschiedene geologische Fragen:

- a) Wie können die noch in und hinter der Lochbachklamm verbliebenen Massen stabilisiert werden?
- b) Welches waren die Ursachen für die Rutschung?
- c) Sind weitere Erdrutsche und somit weitere Murgänge zu erwarten?
- d) Wie können weitere Ereignisse vermieden werden?
- e) Welche Gebiete sind durch Rutschungen und Murgänge bedroht?

2. Geologische Situation

Der Selzacher Murgang fand im Bereich der hier südlichsten Jurakette, der Weissenstein-Antiklinale statt (Figur 2). Das Abrissgebiet liegt im kleinen Hochtal von Schauenburg. Diese Combe aus Callovien- und Effinger-Mergeln ist eingebettet zwischen dem etwa 60° südfallenden Haupttrogensteinzug der Stallflue (1409 m ü.M.) im Norden und dem Felsband des Burgbühls im Süden, das von steilstehenden Schichten der Balsthal- und Reuchenette-Formation („Malmkalk“) gebildet wird und in das sich der Lochbach eine tiefe Kerbe eingeschnitten hat. Die Lochbachklamm zeichnet eine wichtige, NNW-SSE-streichende tektonische Störung nach, die offensichtlich auch den Westrand des nördlich davon gelegenen Abriss-

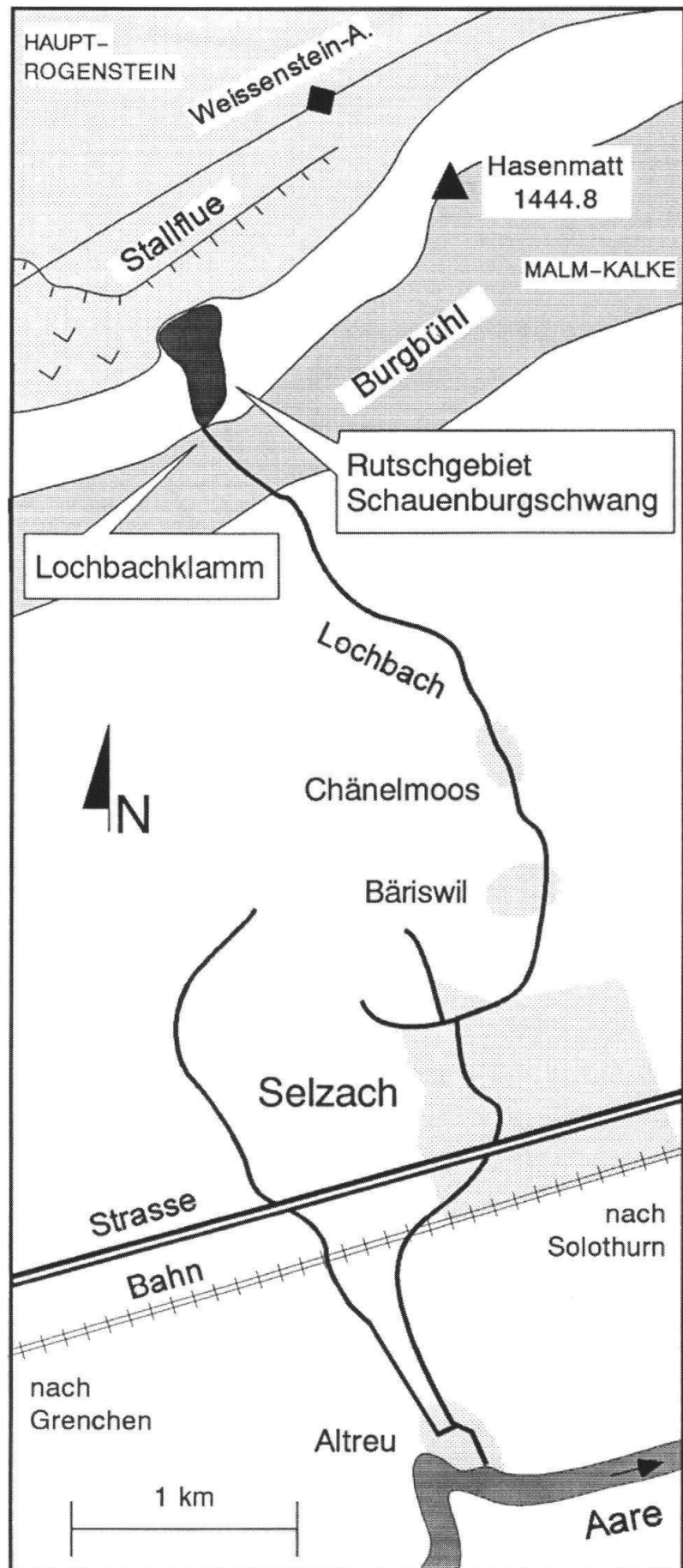


Fig. 2:
Übersichtsskizze Selzach -
Schauenburg: Vom Murgang
betroffen waren insbesondere
der Weiler Chänelmoos, die
Bahn- und Strassenverbin-
dung Solothurn-Grenchen-
Biel, das Landwirtschaftsland
südlich Selzach und der Weiler
Altreu.

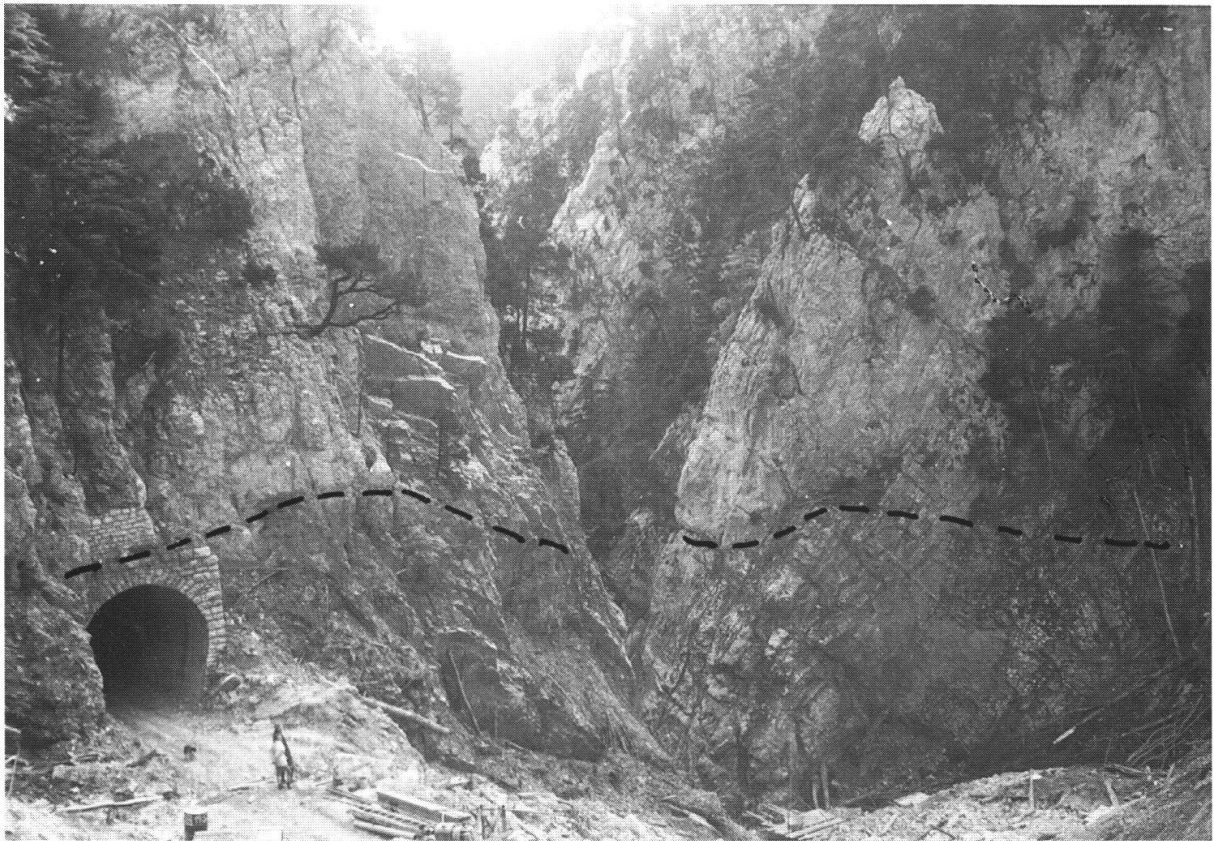


Fig. 3: Die Lochbachklamm und der Strassentunnel nach der Räumung, Sicht von Norden. Die gestrichelte Linie bezeichnet die Höhe der Ablagerungen vor dem Murgang (Foto H. Fröhlicher, 1. November 1970).

gebietes markiert. Die Störung trennt den normalliegenden Südschenkel der Weissenstein-Antiklinale im NE (Hasenmatt) vom zunehmend überkippten im SW (Bettlachstock).

Das eigentliche Abrissgebiet, der Schauenburgschwang, befindet sich im oberen Teil der Combe, gegenüber der Lochbachklamm, und reicht von ca. 1150 m ü.M. bis zum Fuss des Haupttrogensteins bei ca. 1250 m ü.M. Das Gebiet war bewaldet. Die Basis der Lochbachklamm liegt bei 975 m ü.M. Etwa 20 Meter über der Basis wird die östliche Flanke von einem Tunnel durchquert, der von den Rutschmassen zugestopft wurde (Figur 3). Die Distanz von der Lochbachklamm bis zum rund 400 m tiefer gelegenen Weiler Chänelmoos beträgt 2 km, was einer Neigung der Fliessbahn des Murganges von 20 % entspricht. Vom Chänelmoos bis zur nochmals 2 km entfernten Bahnlinie beträgt die Neigung noch 10 %, von dort bis zur rund 1 km entfernten Aare knapp 1 %. Das Tal des Lochbaches war bis zum Weiler Chänelmoos bewaldet. Es ist hier, wie auch unterhalb des Weilers, relativ eng und öffnet sich erst innerhalb des Dorfkerns von Selzach. Südlich von Selzach erstreckt sich die Verlandungsebene des Solothurner Sees, die landwirtschaftlich intensiv genutzte Witi.

Weder aus dem Gebiet Schauenburg-Selzach noch aus angrenzenden Gebieten sind historische Erdbeben vergleichbarer Grösse dokumentiert. Verschiedene Berichte, so z.B. aus den Jahren 1813, 1859 und 1882, erzählen jedoch von Übersarungen, die durchaus auf Murgänge zurückgeführt werden können.

3. Durchgeführte Untersuchungen

Am 24. April 1970 besichtigte Dr. H. Fröhlicher, der geologische Berater des Kantons Solothurn, vorerst noch aus Eigeninitiative, das Rutschgebiet. Wie weit seine damaligen Beobachtungen die rasch einsetzenden Aufräumarbeiten beeinflussten, ist heute nicht mehr nachvollziehbar. Neben den Arbeiten im Murganggebiet, konzentrierten sich die Anstrengungen vor allem auf das Entfernen der in der Lochbachklamm verbliebenen Massen und die Planierung des Abrissgebietes. Fröhlicher versuchte durch Begehungen, vor allem aber auch durch Befragungen das Szenario des Rutsches zu rekonstruieren. Es gelang ihm dabei, dank den noch frischen Erinnerungen der Förster, Anwohner und der später an der Sanierung Beteiligten, die Vorgänge zwischen dem 17. und 22. April recht genau zu erfassen, was wertvolle Aufschlüsse, nicht nur über den Rutschhergang selber, sondern auch über das Gefahrenpotential der noch ob der Lochbachklamm verbliebenen Rutschmassen und der benachbarten Gebiete, ergab.

Im Spätfrühling führte Fröhlicher im Auftrag des Kantons eine geologische und hydrologische Detailkartierung im Masstab 1:5'000 sowie, in kritischen Gebieten, 1:2'000 durch. Diese hält die sichtbaren Fest- und Lockergesteine sowie sämtliche Quellen, vernässten Stellen und oberirdischen Wasserläufe fest.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Geländeänderungen während und nach dem Sturzereignis gelegt. Dazu wurde das Gebiet noch vor den Planierungsarbeiten neu nivelliert und vermessen und sodann mit älteren Aufnahmen verglichen. Zwischen dem 30. April und 10. August wurden 13 Fixpunkte von zwei stabilen Referenzpunkten regelmässig geodätisch vermessen. Nach der Planierung wurde die Nivellierung wiederholt. Die Kontrolle der Fixpunkte wurde in grösseren Abständen bis heute fortgesetzt.

Im Herbst 1970 schloss sich unter der Leitung von Prof. H.J. Lang vom IGB der ETH Zürich und unter Begleitung durch Dr. H. Fröhlicher eine grössere Bohrkampagne an. Es wurden insgesamt zehn Bohrungen, jeweils bis in den stabilen Fels, durchgeführt. Die Bohrungen wurden mit Piezometerrohren versehen. Der Grundwasserstand wurde regelmässig vermessen, an einer Stelle später sogar permanent aufgezeichnet.

Die Feldkartierung wurde aufgrund der Bohrresultate und der geodätischen und hydrologischen Messungen ergänzt. Die verfügbaren meteorologischen Daten wurden kompliert. All diese Daten flossen schlussendlich in Überlegungen ein, die als Vorgänger der heutigen geologischen Modelle und Risikoabschätzungen bezeichnet werden können.

Im Sommer 1980 und im Herbst 1986 wurden Erfolgskontrollen durchgeführt, die eine Neukartierung, zusätzlich Messungen, eine umfassende Auswertung der bislang gesammelten Daten und eine Beurteilung der Sanierungsmassnahmen wie auch der allgemeinen Situation umfassten.

4. Resultate der Untersuchungen

Die Detailkartierungen ergaben, dass der Untergrund des eigentlichen Abrutschgebietes grösstenteils aus annähernd hangparallel einfallenden Callovien- und Oxfordtonen besteht (Figur 4). Die spezielle Geometrie und die unerwartet grosse

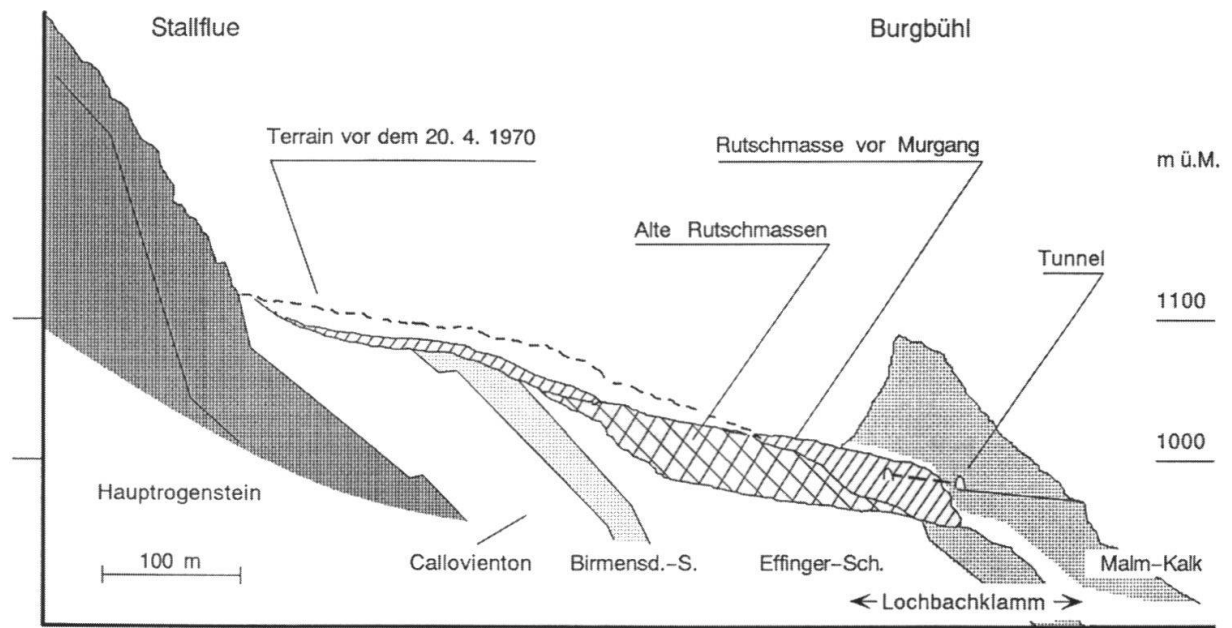


Fig. 4: Vereinfachtes Querprofil durch das Abriss- und Ablagerungsgebiet des Rutsches von Schauenburgschwang nach Fröhlicher, Bericht 1971 (verändert). Die Rutschmasse ist in ihrer Position in und vor der Lochbachklamm eingezeichnet. Aus dieser Masse löste sich der Murgang von Selzach.

Ausbissfläche dieser eher geringmächtigen Formationen ist durch eine (vorher unbekannte) Parasitärfaftung bedingt. Über diesen Tonen lag ursprünglich ein bis zu 15 m mächtiger, mit Bergsturzmateriel vermengter Gehängeschutt, der praktisch ausschliesslich aus Hauptrogensteintrümmern der nahen Stallflue bestand.

Die Bohrungen zeigten, dass das unterliegende (mittlere) Gebiet stabil war und von den Rutschmassen nur überflossen wurde. Völlig unerwartet bestand hier der Untergrund jedoch nicht aus Effingerschichten, sondern aus einer mächtigen älteren (eiszeitlichen?) Sackungsmasse, die ausschliesslich aus Gesteinen der Effinger- und Birmensdorferschichten besteht. Der anstehende Fels (Effingerschichten) wurde erst in einer Tiefe von 35 bis 40 m angetroffen.

In der Lochbachklamm liegen unter den rezenten, vor dem Abgang der Murgänge über 20 m mächtigen Schuttmassen ältere Rutschmassen, die ebenfalls Hauptrogensteintrümmern enthalten.

Aufgrund der Befragungen konnte festgestellt werden, dass die ersten Bewegungen am 17. April im Bereich der Callovientone stattfanden. Das Anrissgebiet dehnte sich dann rasch auf eine Breite von 250 m aus. Gegen unten verengte sich die insgesamt 500 m lange Gleitfläche dann auf 100 bis 120 m. Schuttablagerungen fanden sich nach dem Ereignis im oberen und unteren Teil, während der mittlere Teil (Geländekante) praktisch vollständig entblöst wurde. Im oberen Teil wurde ein Versatz von 50 bis 60 m, im untersten von mindestens 300 m gemessen. Das Volumen der Rutschmasse wurde auf 200'000 bis 250'000 m³ geschätzt, davon gingen rund die Hälfte als Murgänge ab.

Die ersten geodätischen Messungen ergaben, dass am Fuss der oberen Rutschmasse noch Bewegungen stattfanden, während die übrigen Teile und die Nachbargelände offensichtlich stabil waren. Diese Bewegungen klangen bis Anfang Juli prak-

tisch gänzlich ab. Ein einzelner Messpunkt zeigte noch Verschiebungen von > 1 cm pro Tag. Die Untersuchungen konzentrierten sich dann insbesondere auf die Frage, ob sich die in den Bohrungen festgestellte, bis 40 m mächtigen ältere Rutschmasse ebenfalls bewegt hatte oder gar noch in Bewegung war. Dies konnte beides nach eingehenden Messungen im Sommer 1971 verneint werden.

Allerdings wurden Hinweise gefunden, dass benachbarte Gebieten, wie z.B. der westlich anschliessenden Wagnerban, wo ebenfalls Gehängeschutt über hangparallel einfallenden Tonschichten liegt, bei ähnlich ungünstigen Witterungsbedingungen in Bewegung geraten könnten. Man entschloss sich deshalb sicherheitshalber, ein bis heute unterhaltenes, geodätisches Messnetz zu installieren. Es konnten tatsächlich auch periodisch Bewegungen, sowohl in der bekannten Rutschzone von 1970, als auch in westlich angrenzenden Gebieten verzeichnet werden, die allerdings bislang noch nie beunruhigende Masse angenommen haben.

Erwartungsgemäss erwiesen sich die hydrogeologischen Verhältnisse als äusserst komplex. Einige Bohrungen zeigten korrelierbare Spiegel, andere in unmittelbarer Nachbarschaft waren trocken, dritte wiederum wiesen mehrere (lokale) Druckniveaus auf. Vor allem nach der Schneeschmelze stieg der Grundwasserspiegel regelmässig stark an, während Starkniederschläge ausserhalb der Schneeschmelze kaum einen messbaren Einfluss hatten. Aus heutiger Sicht wurden die Piezometer jedoch durchwegs mit zu grosskalibrigen Rohren ausgerüstet. Die Grundwasserganglinien sind dementsprechend träge und dürften die tatsächlichen Verhältnisse im Untergrund nur annähernd widerspiegeln.

5. Geologisches Modell, Mechanismen, Kausalität

Der Erdrutsch des Schauenburgschwangs, der den Murgang von Selzach ausgelöst hat, ist geologisch vorgezeichnet: Die Hangneigung beträgt 15° bis 40° . Hangparallel einfallende, undurchlässige Tonschichten werden von Gehängeschutt überlagert, dessen Mächtigkeit und Gewicht im Lauf der Jahre durch Steinschlag und Bergsturz zunimmt. Innerhalb der Rutschmassen kann sich lokal, bedingt durch die Vermengung von durchlässigen und undurchlässigen Partien, kritische Wasserdrucke aufbauen.

Für die Auslösung eines Murganges besteht im Gebiet Schauenburg ebenfalls eine lehrbuchmässige Konfiguration: Hinter einer äusserts engen Schlucht, der Lochbachklamm, befindet sich ein ideales, knapp 1 km^2 grosses Liefer- und Akkumulationsgebiet für Murgangmassen (s.o.). Die Südabdachung des Jura zeichnet sich durch hohe Niederschlagswerte, sowohl bei Einzelereignissen wie auch bei der Jahressumme, aus. Die Neigung zwischen der Klamm als Startgebiet und den Schutzgütern (Siedlungsgebiete, Verkehrsachsen etc.) beträgt 10° bis 20° .

Der Rutsch und der Murgang von Selzach dürften ursächlich auf die extrem ungünstigen Witterungsverhältnisse im Februar und April 1970 zurückzuführen sein. Im Februar überstieg die Niederschlagsmenge das langjährige Mittel etwa um das Vierfache. Auf der ersten Jurakette fiel ungewöhnlich viel Schnee, der durch Verwehungen im Kessel unter der Stallflue, dem Bereich des späteren Erdrutsches, akkumuliert wurde. Fröhlicher schätzt, dass hier im April noch 5 bis 6 m Schnee lagen. Nach einem eher niederschlagsarmen März setzte Mitte April stärkerer Regen ein, der die zwischenzeitlich eingesetzte Schneeschmelze akzentuierte. Dieser gros-

se Anfall an Schmelz- und Regenwasser kann als eigentlicher Auslöser der Rutschung bezeichnet werden. Der im Laufe der Jahrtausende akkumulierte Gehängeschutt unterhalb der Stallflue und die im selben Bereich angehäuften Schneemassen dürften die Situation allerdings schon vorgängig destabilisiert haben. Wie weit die in den Jahren 1952 bis 1960 erfolgte Erschliessung des Schauenburgschwanges mit Strassen und Forstwegen ebenfalls zur Destabilisierung beitrug, blieb umstritten. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass das entsprechende Erschliessungsprojekt von den Subventionsbehörden mit Hinweis auf die bekannte, aber nicht im später eingetretenen Umfang erwartete Rutschneigung des Terrains abgelehnt wurde.

6. Risikoanalyse

Eine eigentliche Risikoanalyse im heutigen Sinn wurde weder 1970/71 noch bei den Erfolgskontrollen von 1980 und 1986 durchgeführt. Trotzdem lassen sich aus den geologischen Expertenberichten Aussagen zur Eintretenswahrscheinlichkeit und zum Risiko folgender Szenarien herauschälen:

- 1) Murgang aufgrund der Reaktivierung der verbliebenen Rutschmassen vom April 1970
- 2) Murgang aufgrund der Reaktivierung der älteren (eiszeitlichen?) Rutschmassen
- 3) Murgang aufgrund Rutschungen in Nachbargebieten, insbesondere im Wagnerban
- 4) Unterbruch der durch das Rutschgebiet führenden Zugangsstrasse

Bei den Murgangsszenarien musste zur Abschätzung des Risikos das mögliche Gefahrengbiet abgegrenzt werden.

Das Szenarium 1 wurde nach den sofort nach dem Ereignis vom April 1970 ergriffenen Sanierungsmassnahmen und den danach gesammelten Messwerten als unwahrscheinlich, das Risiko also als inexistent angesehen. Trotzdem blieb dieses Szenarium lange ein Politikum und rechtfertigte in den Augen der Behörden als einziges die nachlaufenden Messungen.

Das Szenarium 2 wurde aufgrund der Resultate der Bohrungen und geodätischen sowie hydrologischen Messungen ebenfalls als eher unwahrscheinlich bezeichnet, aufgrund des grossen Schadenpotentials muss aber trotz der geringen Eintretenswahrscheinlichkeit mit einem gewissen Risiko gerechnet werden.

Das Szenarium 3 wurde aufgrund von Analogieschlüssen und Feldbeobachtungen als durchaus möglich bezeichnet. Es besteht jedoch der Unterschied, dass sich im westlich anschliessenden Wagnerban nur geringfügig Gehängeschutt akkumulieren kann und im östlich angrenzenden Gebiet eine deutlich geringere Hangneigung besteht. Ohne zusätzliche menschliche Eingriffe ist die Eintretenswahrscheinlichkeit somit sicher $< 1\%$. Das Schadenpotential entspricht in etwa dem Ereignis vom 21. April 1970. Das Risiko ist somit als mittel zu bezeichnen.

Das Szenarium 4 wurde als wahrscheinlich bezeichnet. Kleinere Rutschbewegungen, auch in angrenzenden Gebieten, wurden insbesondere durch die Erfolgskontrolle bestätigt. Das Schadenpotential ist jedoch vergleichsweise gering. Zudem handelt es sich um eine Gefahr, die im Juragebiet durchaus allgegenwärtig ist.

7. Gefahrenmanagement

Fröhlicher schlug zur Stabilisierung des Rutsches von 1970 und der benachbarten Gebiete folgende Massnahmen vor:

- Drainage der Sackungsmasse und des angrenzenden Gebietes
- Aufforstung
- Verbot von neuen Erschliessungswegen, Aufschüttungen und Materialentnahmestellen
- Höherlegung der Erosionsbasis in der Lochbachklamm

Die von verschiedenen Seiten vorgeschlagene Verbreiterung der Lochbachklamm lehnte Fröhlicher kategorisch ab. Er schlug im weiteren regelmässige Messungen und Begehungen zu Erfolgskontrolle fest.

Von diesen Massnahmen wurden die ersten drei, zum Teil etwas halbherzig, umgesetzt, die vierte aus Kostengründen nicht realisiert. Zusätzlich wurde das Gebiet unterhalb der Lochbachklamm bis zum Chänelmoos als Gefahrengebiet bezeichnet.

Schon zehn Jahre später wurden Stimmen laut, die Kontrollmessungen einzustellen und das Gefahrengebiet aufzuheben. Der Schauenburgschwung und seine Nachbargebiete haben sich bis heute ruhig verhalten.

8. Schlussfolgerungen

Erst der Beizug von Geologen und Geotechnikern hat zu einer realistischen und umfassenden Betrachtung der Situation geführt. Vorgängig hielten sich Schreckensszenarien und Verharmlosungen die Waage. Die angewandten Untersuchungsmethoden, wenn auch vom Prinzip her aktuell, sind heute zum Teil überholt. Dies gilt insbesondere für die geodätischen, geotechnischen und hydrogeologischen Messungen und die Risikoanalyse. Die vorgeschlagenen Massnahmen erscheinen auch heute noch sinnvoll. Leider wurden sie nicht konsequent durchgeführt und unterhalten. Weitreichende Auswirkungen hatte die Katastrophe von Selzach auf den Forstwegbau im Kanton Solothurn, der seither erst nach Begutachtung durch den Geologen erfolgen darf. Andererseits fokusierte der Murgang von Selzach die Furcht der Öffentlichkeit vor Naturgefahren auf ein bestimmtes Objekt. Für Gefahrenanalysen über das ganze Kantonsgebiet fehlte lange das Gehör bei den zuständigen Behörden.

Fallbeispiel Nr. 5:

Einzugsgebiet der Gürbe im Gebirge (Berner Voralpen)

DANIEL BOLLINGER*

Zusammenfassung

Komplexe Wechselwirkungen zwischen Rutschgeschehen, Wildbachaktivitäten und Waldzustand kennzeichnen das Einzugsgebiet der Gürbe. Die Massnahmenplanung bedingt einen interdisziplinären Ansatz und eine systemare Betrachtung. Die grossräumigen Instabilitäten erfordern eine Konzentration der beschränkten finanziellen Mittel auf klar definierte Schutzziele, insbesondere den Schutz von Siedlungen, Verkehrseinrichtungen und Kulturland. Diese Ziele werden primär durch die räumliche und zeitliche Konzentration von wasserbaulichen Massnahmen (Murgangleitdämme) realisiert. Wichtig ist ferner die Erkenntnis, dass natürliche Prozesse nicht um jeden Preis gestoppt werden müssen, selbst wenn sie ein Gefahrenpotential beinhalten.

1. Ausgangslage

Die Gürbe entspringt an der Nordflanke der Stockhorn-Gantrisch-Kette auf 1685 m Höhe. In den obersten 5 Kilometern durchfliesst sie als Wildbach ein gemeinsam mit ihren zahlreichen Seitenbächen erodiertes, steiles Tal. Auf Kote 785 tritt die Gürbe auf einen ausgedehnten Schuttkegel über, um nach einer Fliessstrecke von 2.5 km als kanalisierter Fluss innerhalb einer breiten Schwemmebene zu fliessen. Nach weiteren 21 km mündet der Fluss südlich von Belp in die Aare. Das Einzugsgebiet der Wildbachstrecke umfasst rund 14 km² mehrheitlich dicht bewaldetes, in höheren Lagen (ab ca. 1300 m) alpwirtschaftlich genutztes Gebiet.

Das Einzugsgebiet der Gürbe war in der Vergangenheit wiederholt Schauplatz von zum Teil verheerenden Naturereignissen: Unwetter verbunden mit Hochwasser führten zu Überschwemmungen von Siedlungsgebieten und Kulturland und durch Rutschungen wurden Wald, Strassen und Sperrenbauten zerstört. Mit verschiedenen Massnahmen wurde seit der Mitte des letzten Jahrhunderts versucht, diesen Naturgefahren Herr zu werden. In diesem Zusammenhang wurden praktisch ununterbrochen Wildbachsperrern erstellt und Rutschgebiete entwässert. Um die Jahrhundertwende wurden im Bereich der Gurnigelkette über 1000 ha durch Raubbau und ungeregelte Beweidung entwaldete Flächen aufgeforstet. Trotz dieser Mass-

* Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern

nahmen kam es wiederholt zu Hochwassern und grossflächigen Rutschungen. Das verheerende Unwetter vom 29. Juli 1990 bildet nur das letzte Glied in der Kette solcher Ereignisse.

Grossflächiger Rutschungen wegen beauftragte das Tiefbauamt des Kantons Bern und der zuständige Wasserbauverband bereits 1987 eine Ingenieurgemeinschaft - bestehend aus Geologe, Wasserbau- und Forstingenieur - mit einer gesamtheitlichen, integralen Beurteilung für das Einzugsgebiet der Gürbe im Gebirge und der Ausarbeitung von Sanierungsvarianten (Integralprojekt Gürbe). Mit den Sanierungsmassnahmen sollten folgende Zielsetzungen erfüllt werden:

- Schutz des Siedlungsgebietes, des Kulturlandes und der Verkehrswege vor Überschwemmungen, Geschiebeablagerungen und Übermurungen;
- Erhaltung und Förderung der Schutzfunktion des Waldes;
- Erhaltung einer angepassten Forst- und Alpwirtschaft;
- Erhaltung der natürlichen und landschaftlichen Werte des Gebietes.

2. Geologische und hydrologische Situation

Das Gebiet weist einen komplexen geologischen Aufbau mit folgenden tektonischen Einheiten auf (von unten nach oben):

- **Subalpine Molasse:** äusserst verwitterungsanfällige Mergel mit harten, oft stabile Geländerippen bildenden Sandsteinsequenzen;
- **«Wildflysch»:** stark verschuppte und zerbrochene, geringmächtige Abfolge von tonigem Flysch mit grossen Schürflingen und Linsen aus Kalk und Gips. Wegen seiner starken Verwitterung ist der Flysch nur sehr selten aufgeschlossen. Er bildet einen wichtigen Quellhorizont;
- **Gurnigel-Flysch:** in sich verfaltete und verschuppte Abfolge aus groben, Blockschutt bildenden Sandsteinen sowie mächtigen, verwitterungsanfälligen Mergel- und Tonschiefererien;
- **Klippen-Decke:** stark verwitterungsanfälliger Gips, vermengt mit Rauhwacke (Basis der Klippen-Decke), überlagert von verwitterungsresistenten Kalken, Mergelkalken und Dolomiten (nur im oberen Bereich der orographisch rechten Talseite ausgebildet).

Das Gebiet befindet sich in einer Zone intensiver Niederschläge. Je nach Höhenlage und Exposition fallen pro Jahr bis zu 2000 mm. Im Sommer sind 40-50 mm pro Tag nicht selten. Anlässlich des Unwetters vom 29. Juli 1990 wurden innerhalb von 4-5 Stunden 270 mm gemessen, ein in der Schweiz bislang nie registrierter Wert. Im Frühjahr führen anhaltende Niederschläge in Kombination mit Schneeschmelze oft zu einer Intensivierung des Rutschgeschehens.

Die geologische, hydrologische und topographische Situation begünstigt ein aktives Rutschgeschehen. Die Gleitflächen der Rutschungen liegen meist auf der durchnässten Felsoberfläche, in Tiefen bis zu ca. 20-30 m. Die Rutschmassen bestehen aus sehr schlecht entwässerbarem Gehängelehm (toniger Silt), durchmischt mit Steinen und Blöcken. Sie werden oft von Blockteppichen (Sandsteine des Gurnigel-Flysches und Kalke/Dolomite der Klippen-Decke) überlagert, in welche das Oberflächenwasser infiltriert. Zusätzlich werden die Rutschmassen durch Was-

serzuflüsse aus dem Fels und insbesondere aus dem «Wildflysch» durchnässt. Die kritischen Gleitwinkel der Rutsche entsprechen ungefähr den Hangneigungen. Grosse Teile der Lockergesteinsbedeckung befinden sich somit in einem labilen Gleichgewicht. Erosion durch die Gürbe oder durch einen der zahlreichen Seitenbäche führt regelmässig zu Rutschungen und Reaktivierungen.

Bedingt durch die seit Mitte des letzten Jahrhunderts ausgeführten Verbauungen wurde das Bett der Gürbe künstlich angehoben. Der Fels trat nur an wenigen Stellen zutage. Viele Sperren waren deshalb im Lockergestein fundiert. Durch das Unwetter vom 29. Juli 1990 wurden mehr als 80 Sperren bzw. rund 2/3 aller Verbauungen ausgeräumt. Die verbleibenden, zumeist nach 1965 in massiver Betonbauweise erstellten Sperren hielten Stand, wurden jedoch beschädigt oder teilweise unterspült. Die Tiefenerosion der Gürbe erreichte über grosse Strecken mehrere Meter, im Maximum bis zu 8 m. Nach dem Unwetter trat im Gürbebett verschiedenorts der Fels zutage.

Anlässlich dieses Unwetters kam es in der Gürbe zu murgangähnlichen Transportmechanismen. Murgangspuren auf dem Schuttkegel und in den grösseren Seitenbächen (z.B. steckengebliebene Murköpfe) dokumentieren die generelle Disposition zu Murgängen.

3. Arbeitsmethodik und durchgeführte Untersuchungen

Erste Untersuchungen konzentrierten sich auf zwei grosse Rutschungen (Tiefengraben, Meierisli) auf der linken Gürbeseite, welche im Frühjahr 1987 eine starke Reaktivierung erfuhren. Schwerpunkt der Untersuchungen bildete eine detaillierte geologische Kartierung 1:2'000, auf deren Basis anschliessend 4 Bohrungen bis in den stabilen Felsuntergrund abgeteuft wurden. Zwecks Identifikation der Gleitflächen und Messung der Verschiebungsraten wurden die Bohrlöcher mit Inklinometern und für die Überwachung des Hangwasserspiegels mit Piezometerrohren ausgestattet. Mit seismischen Untersuchungen wurde der Verlauf der Felsoberfläche näher bestimmt.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen wurde das gesamte Einzugsgebiet der Gürbe im Gebirge flächendeckend durch eine geologisch-geomorphologische sowie eine hydrologische Kartierung (1:5'000) erfasst. Letztere hält das gesamte Gewässernetz (inkl. Drainagen, Entwässerungsgräben, Kännel), Quellen, vernässte Stellen, mutmassliche Infiltrations- und Exfiltrationsstrecken von Bächen, künstliche Durchlässe bei Forstwegen, natürliche Bachengnisse etc. fest. Sie gibt zudem eine qualitative Beurteilung über den Zustand der zahlreichen, künstlich geschaffenen Gerinne. Parallel dazu wurde das Gebiet pflanzensoziologisch kartiert (Standortkarten 1:5'000 für Wald und Grünland). In wasserbaulicher Hinsicht wurden verschiedene Sperren auf ihre Stabilität hin überprüft (Geotechnik und Statik). Zur Ermittlung der hydrologischen Verhältnisse konnte auf bestehende Messstationen (Niederschlag, Abfluss) zurückgegriffen werden. Innerhalb des Untersuchungsgebietes wurden zusätzlich ein Pluviograph und an der Gürbe bzw. an den wichtigsten Seitenbächen insgesamt 12 einfache Abflussmesspegel installiert. Durch das verheerende Unwetter wurde ein Teil dieser Einrichtungen indessen zerstört.

Parallel zu den Kartierungsarbeiten wurden 10 geodätische Messprofile festgelegt und periodisch vermessen. Damit konnten die Bewegungen der drei grössten Rut-

sche sowie ein Teil der Gürbeflanke überwacht werden. Um allfällige Verschiebungen von im Lockergestein fundierten Sperren festzustellen, wurden zahlreiche Sperrenflügel in ein weiteres Messdispositiv einbezogen.

4. Untersuchungsergebnisse

Im folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt:

Rutschungen und Murgänge

- grosse Gebiete des Einzugsgebietes der Gürbe im Gebirge sind tiefgründig verrutscht;
- die Hauptanrisse der grossen Rutschungen befinden sich im Bereich des Wildflysches und der Basis der Klippen-Decke, wo Wasserzutritte aus dem Fels erfolgen;
- die Rutschintensitäten sind sehr verschieden und umfassen nahezu die gesamte Skala von wenig aktiv (substabil) bis stark aktiv;
- die Disposition zu periodischen Reaktivierungen ist allgemein gross. Dabei können innert weniger Tage bis Wochen Verschiebungen von mehreren Metern auftreten;
- das Rutschgeschehen wird beeinflusst durch Schneeschmelze, anhaltende Niederschläge und die erosive Tätigkeit der verschiedenen Bäche;
- aus den Seitenbächen können Murgänge bis in die Gürbe und dort bis auf den Schuttkegel gelangen.

Wasserbau

- die früher angenommene Überfallmenge von 90 m³/s muss auf 200 m³/s erhöht werden;
- die Sperrenflügel müssen zusätzlich auf Stoss durch Murgang dimensioniert werden;
- der fehlenden Hangstabilität und der Gefahr von Auskolkung durch den Überfallstrahl sind vermehrt Rechnung zu tragen;
- viele Sperren sind in rutschanfälligem Lockergestein fundiert.

Wald

- es dominieren ältere (60-90 Jahre), relativ gleichförmige, flachwurzelnde Fichten-Baumhölzer aus der ersten Aufforstungsgeneration;
- die erste, nur wenig gepflegte Baumgeneration ist besonders labil;
- die Weisstanne als tiefwurzelnder und ökologisch wertvoller Vertreter des voralpinen, auf Flyschuntergrund stockenden Schlusswaldes ist stark untervertreten;
- dank pfleglicher Forstwirtschaft bestehen verschiedenorts Ansätze von Stufigkeit und Naturverjüngung;
- jüngere Rutschgebiete sind vielfach der natürlichen Sukzession überlassen.

5. Interpretation

Das Einzugsgebiet der Gürbe im Gebirge zeigt die typischen Erscheinungsformen von Hanginstabilitäten eines voralpinen Flyschgebietes. Die natürlichen Prozesse der Verwitterung und Erosion sind durch keine Massnahme zu stoppen. Der anhaltende Verbau der Gürbe führte zu einem künstlich angehobenen Gerinne. Dadurch konnte sich über Jahrzehnte hinweg Verwitterungsschutt im Bachbett (v.a.

Hinterfüllung von Sperren) und an den Talflanken akkumulieren. Es bedurfte des extremen Hochwassers vom 29. Juli 1990 (mutmassliche Jährlichkeit > 100 Jahre), um den (z.T. künstlich) zurückgehaltenen Verwitterungsschutt zu Tale zu befördern. Ohne den massiven Verbau der Gürbe hätte davon ausgegangen werden können, dass längs des Gerinnes wohl mehr Instabilitäten in Form von oberflächennahen Böschungsrutschungen aufgetreten wären, das abgerutschte Material indessen durch die Wildbachaktivität sukzessive und in kleineren Mengen wegtransportiert worden wäre.

Der Wald mindert durch sein beträchtliches Wasserrückhaltevermögen Hochwasserspitzen und schützt das Gebiet vor Erosion und oberflächlichen Rutschungen. Die Wirkung des Waldes ist am Waldzustand zu messen, weshalb zu folgern ist, dass durch Überführung des mancherorts labilen Waldes in stabile, naturnahe Wälder ein erhebliches, hangstabilisierendes Potential genutzt werden kann.

6. Gefahrenbeurteilung

Rutschungen: Für grosse Gebiete des Einzugsgebietes besteht die Gefahr von zum Teil erheblichen Schäden am Wald, an Forstwegen sowie an Bachverbauungen und Entwässerungssystemen. Unter Umständen kommt es zu Zerstörungen von Bachverbauungen und Entwässerungen. An der Gürbe und in den Seitenbächen existiert Bachstaugefahr (inkl. anschliessender Wasserausbruch, evtl. in Form eines Murganges). Die alpwirtschaftlich genutzten Flächen sind bei Extremniederschlägen disponiert zur Bildung von Hangmuren («Hautrutsche», Flow Slides).

Hochwasser, Überflutung und Murgang: Durch Ablagerung von Geschiebe (inkl. Wildholz) ausgangs der Wildbachstrecke und Überflutung sind Siedlungsgebiete, Verkehrswege, Kulturland und Wald gefährdet. In diesem Zusammenhang kritisch ist der Übergang von der steilen Wildbachstrecke zum flachen Schuttkegel. Dort entwässern sich auch Murgänge, deren maximal mögliches Volumen auf ca. 100'000 m³ geschätzt wird. Im Unterlauf der Gürbe bestehen stellenweise unzureichende Abflusskapazitäten.

7. Gefahrenmanagement

Gemäss den eingangs erwähnten Zielsetzungen, welche nach dem Unwetter vom 29. Juli 1990 um die Forderung nach der Erhaltung der nicht zerstörten Sperren ergänzt wurden, standen verschiedene Sanierungsvarianten zur Diskussion. Sie reichten von der Schaffung eines mit Passivmassnahmen in den Siedlungsgebieten verbundenen Naturschutzgebietes bis hin zu einer Vollsanierung mit aufwendigen wasserbaulichen Massnahmen und Rutschsanierungen. Die Maximalvariante wurde aus Gründen des Realisierungszeitraumes (ca. 50 Jahre), der Kosten sowie Aspekten des Natur- und Landschaftsschutzes verworfen. Ferner beinhaltet sie die Gefahr von erhöhten Abflussspitzen aus den mit Entwässerungsgräben durchsetzten Rutschgebieten und entsprechenden Auswirkungen auf den ohnehin durch unzureichende Abflussquerschnitte charakterisierten Unterlauf der Gürbe. Eine schwierig abschätzbare Gefahr besteht zusätzlich darin, dass die zahlreichen Massnahmen eine Selbstregulierung des Systems stören. Das heisst: Durch die anhaltende und nicht zu stoppende Verwitterung laden sich die Talflanken unweigerlich mit

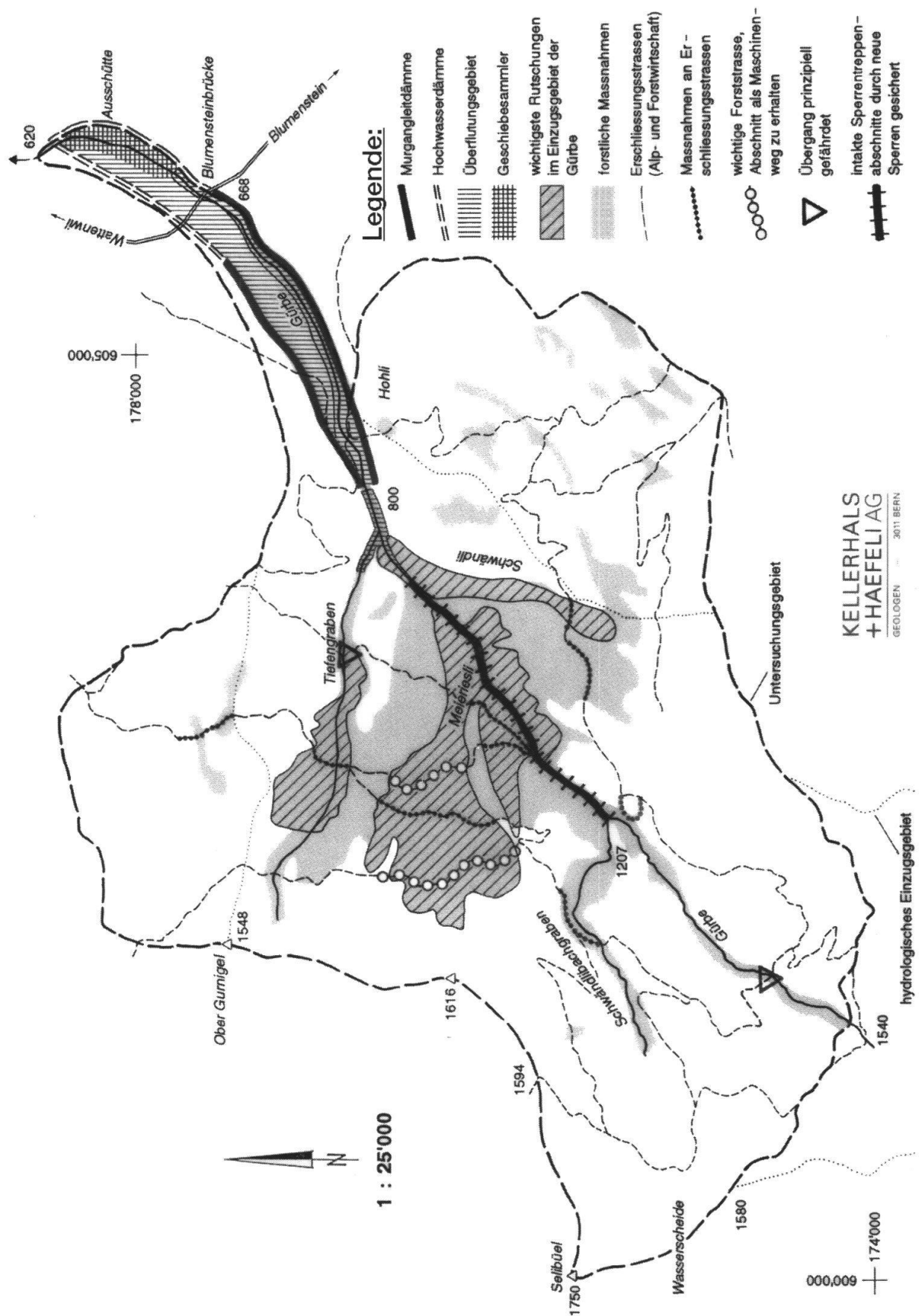


Fig. 1: Integralprojekt Gürbe: Sanierungsmassnahmen.

Lockergesteinen auf. Infolge der zahlreichen Massnahmen werden kleinere und häufige, die Massenbilanzen periodisch ausgleichende Ereignisse unterbunden. Dadurch wächst die Gefahr, dass durch ein extremes Ereignis plötzlich enorme Lockergesteinsmassen mobilisiert werden können. Die Minimalvariante wurde einerseits aus politischen Gründen (fehlende Akzeptanz durch die örtliche Bevölkerung), andererseits der stark eingeschränkten, forstlichen Nutzungsperspektiven wegen fallengelassen.

Aus den verschiedenen Varianten wurde jene gewählt, welche innerhalb eines vernünftigen Zeitraumes (ca. 15 Jahre) realisierbar ist und deren Kosten tragbar sind (ca. 56 Mio. Fr., bzw. 3.7 Mio. Fr. pro Jahr). Kernstück bilden zwei ca. 1.5 km lange Murgangleitdämme im oberen Teil des Schuttkegels. Sie bilden einen bis zu 200 m breiten Korridor, innerhalb dem die Geschiebmassen kanalisiert sowie Murgang- und Schuttrückhalteräume geschaffen werden. Dabei wurde versucht, den Wildbachaktivitäten wenigstens einen kleinen Teil des natürlichen Prozessraumes auf dem Schuttkegel zurückzugeben. Ferner sollen die nach dem Unwetter noch intakten Sperrentreppenabschnitte mittels einiger neuer, nach Möglichkeit auf Fels fundierter Sperren gesichert werden.

Im forstlichen Bereich sind Waldsanierungen und -wiederherstellungen im Bereich der grossen Rutschgebiete sowie die Instandstellung bzw. Offenhaltung der wichtigsten Erschliessungsstrassen, zumindest als Maschinenwege, projektiert. Zur Erreichung des letzteren Zieles sind punktuell auch Massnahmen an den Seitenbächen vorgesehen (forstlicher Wasserbau).

Unter der Einsicht, dass viele Rutschungen nicht oder nur mit unverhältnismässigem Aufwand saniert werden können (z.B. Tiefendrainagen bis auf die Felsoberfläche) wird auf Massnahmen an den Rutschungen verzichtet. Davon ausgenommen sind ganz punktuelle Eingriffe zur Aufrechterhaltung der erwähnten Erschliessungsstrassen und einfache Massnahmen (offene Entwässerungsgräben) auf den waldbaulichen Sanierungsflächen, ferner auch lokale Massnahmen zur allfälligen Sicherung gefährdeter Sperren. Es wird bewusst in Kauf genommen, dass eine Rutschung im Extremfall einen Bachstau und letztlich einen Murgang in der Gürbe auslösen kann. Gerade unter Berücksichtigung einer solchen Gefahr wurden die wasserbaulichen Massnahmen auf dem Schuttkegel auf ein Murgangvolumen von rund 100'000 m³ dimensioniert.

8. Schlussfolgerungen

Die "Sanierung" eines in verschiedenen Beziehungen komplexen und instabilen Einzugsgebietes strapaziert die finanziellen Möglichkeiten der öffentlichen Hand und fordert - allen divergierenden Interessen zum Trotz - einen breiten Konsens zwischen den Beteiligten (Wasserbaupflichtige, Gemeinden, Verbände, Grund- und Waldeigentümer sowie kantonale und eidgenössische Fachstellen) voraus. Massgebend ist auch die Erkenntnis, dass Massenbewegungen natürliche, für voralpine Flyschgebiete typische Prozesse sind, welche nicht um jeden Preis gestoppt werden müssen. Wesentlich ist ferner die systemare, interdisziplinäre Betrachtung, welche sich nicht nur auf das zu sanierende Gebiet konzentriert; sondern auch die Auswirkungen auf darunterliegende Gebiete miteinbezieht. In diesem Sinne hat das Integralprojekt zur beschleunigten Ausarbeitung eines Gewässerrichtplanes für den Unterlauf der Gürbe Anlass gegeben.

Fallbeispiel Nr. 6:

Das Steinschlaggebiet Abendberg / Eyewald im Diemtigtal Risikoanalyse und Schutzmassnahmen

HANS RUDOLF KEUSEN*

Zusammenfassung

Das Gebiet Abendberg / Eyewald ist bekannt für Stein- und Blockschläge. 1962 zerstörte ein Blocksturz ein Wohnhaus und verletzte die Bäuerin, 1994 wurde ein Stall schwer beschädigt. Die Aufnahme eines Ereigniskatasters ergab, dass im Gebiet mehr als 20 Blockschläge bekannt sind. Quelle des Blockschlages ist die ca. 200 m hohe, z.T. sehr brüchige Südwand des Abendberges. Bedroht sind mehrere Bauernhäuser sowie die Kantonsstrasse.

Für die Beurteilung des Gefahrenpotentials und die Planung von Schutzmassnahmen wurde eine 3D-Steinschlagmodellierung mit dem Programm Zinggeler/GEOTEST durchgeführt. Hierzu wurden im ganzen Gebiet die Rauigkeit und Dämpfung des Untergrundes, der Waldbestand und die zu erwartenden Blockgrössen erhoben. Die Steinschlagmodellierung ergab eine sehr gute Übereinstimmung mit früheren Ereignissen. Aufgrund des Befundes, dass alle 30 - 100 Jahre mit Blockschlägen mittlerer bis starker Intensität (>300 kN) zu rechnen ist, d.h. Menschen auch in Wohnhäusern gefährdet sind, wurde ein Rückhaltedamm erstellt. Dessen Projektierung (Lage, Höhe) basierte auf den Ergebnissen der Steinschlagmodellierung.

Résumé

La région Abendberg / Eyewald est connue pour ses chutes de pierres et de blocs. En 1962, une chute de blocs détruisit une maison d'habitation et blessa une paysanne. En 1994, une écurie fut gravement endommagée. L'élaboration d'un cadastre des événements montra plus de 20 chutes de blocs connues dans le secteur. La source des blocs est constituée par la face Sud de l'Abendberg, haute de 200 m environ et par endroit très fracturée. Plusieurs fermes ainsi que la route cantonale sont menacées.

Un modèle de simulation des chutes de pierres en trois dimensions fut élaboré à l'aide du programme Zinggeler/GEOTEST pour l'évaluation des aléas et la planification des mesures de protection. A cet effet, un levé de la rugosité et de l'amortissement du terrain, de l'état de la forêt et de la taille potentielle des blocs fut effectué dans l'ensemble du secteur. Une très bonne correspondance fut constatée entre le résultat de la modélisation et les événements observés jusqu'à maintenant. L'étude indiqua qu'une chute de blocs d'intensité moyenne à forte (>300 kN) pouvait se produire tous les 30 à 100 ans, ce qui signifie que les personnes sont menacées même à l'intérieur des maisons. Les résultats de la simulation ont servi de base au dimensionnement et à la réalisation d'une digue d'arrêt (situation, hauteur).

* Geotest AG, Birkenweg 15, 3052 Zollikofen

1. Einleitung, Ereignisse

Im Jahre 1962 ereignete sich am Abendberg ein Blocksturz, welcher ein Bauernhaus zerstörte und die in der Küche arbeitende Bäuerin verletzte. Der Besitzer errichtete unmittelbar neben dem zerstörten, bis heute unangetasteten Haus einen neuen Wohnsitz. 30 Jahre später, 1994, beschädigte ein Blockschlag einen Stall desselben Bauern.

In der Folge beauftragte die Einwohnergemeinde Oey-Diemtigen den Geologen mit einer umfassenden Abklärung des Gefahrenpotentials in Form einer Gefahrenkarte.

2. Geologisch- und morphologische Übersicht

Die Südseite des Abendberges besteht aus einer markanten, z. T. senkrecht abfallenden, über 200 m hohen Felswand aus horizontal geschichteten Malmkalken. Bedingt durch eine ausgeprägte vertikale Klüftung gliedert sich die Wand in viele Türme. Vielerorts ist der Fels äusserst gebräch und produziert häufigen Stein- schlag. Zahlreiche Schutthalden belegen diese starke Aktivität (Fig. 1).

Die Hangtopographie weist folgende Charakteristiken auf:

- | | |
|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| – 1600 - 1800 m. ü.M: | Felswand, Neigung 60 - 90° |
| – 1400 - 1600 m. ü.M: | Wald, Schutthalden, Neigung ca. 36° |
| – 1200 - 1400 m. ü.M: | Wald, Neigung ca. 29° |
| – Siedlungsgebiet Ennetgrabe 1000 m ü.M.: | Weidland, Neigung ca. 22° |



Fig. 1: Blick von Süden auf Abendberg und das Siedlungsgebiet Ennetgrabe. In der Bildmitte das 1965 zerstörte Bauernhaus (links davon der in der Folge erstellte Neubau). Der 1994 stark beschädigte Stall ist in der rechten Bildmitte erkennbar.

Das Siedlungsgebiet Ennetgrabe liegt auf einer flachen Hangschulter, welche extensiv landwirtschaftlich genutzt wird. Talabwärts der Terrasse fällt der Hang erneut steil gegen den Fildrichbach ab. Hier verläuft die Kantonsstrasse des Diemtigtales.

3. Ereignisdokumentation

Die Dokumentation früherer Naturereignisse ist für den Geologen ein sehr wichtiges Element im Hinblick auf die Einschätzung von Gefahrenpotentialen und Eintretenswahrscheinlichkeiten. Die Erfahrung zeigt aber, dass solche Ereignisse von der Bevölkerung relativ rasch vergessen werden. Es ist deshalb wichtig, Naturereignisse systematisch aufzuzeichnen. Das BUWAL erstellte deshalb jüngst die Grundlage für eine EDV-gestützte Ereignisdokumentation.

Im vorliegenden Fall zeigte sich, dass bei der Gemeinde praktisch keine Aufzeichnungen über frühere Naturereignisse bestehen. Die Ereignisdokumentation musste deshalb durch Befragungen erarbeitet werden. Dabei konnten auf der linken Talflanke des Diemtigtales zwischen Horboden und Zwischenflüh 40 Ereignisse eruiert werden. Es zeigte sich, dass im Gebiet des Abendberges eine Häufung von Blockschlägen (mindestens 15 Ereignisse, siehe Tabelle 1 und Fig. 2) zu verzeichnen ist.

Die Ereignisse lassen sich etwa 40 Jahre zurückverfolgen.

Tab. 1: Ereignisdokumentation Gebiet Abendberg (Ort siehe Fig. 2)

Nr.	Jahr	Blockgrösse	Schäden
1	?	0.7 m ³	—
2	1994	0.1 m ³	—
3	1984	0.1 m ³	—
4	5. 1962	6 m ³ + weitere Blöcke	Wohnhaus zerstört, Bäuerin verletzt
5	ca. 1955	1 m ³	—
6	ca. 1980	2 m ³	—
7	4. 1994	3 m ³	Stall schwer beschädigt
8	ca. 1960	0.5 m ³	—
9	1980	0.3 m ³	—
10	jährlich	1 m ³	Kantonsstrasse
11	1958	0.5 m ³	Beschädigung Wohnhaus
12	1960	mehrere Blöcke	—
13	?	2 m ³	—
14	?	0.5 m ³	—
15	1987	0.5 m ³	Auto beschädigt

4. Gefahrenpotential

Die dominierende Gefahr ist Blockschlag. Mit dem Programm Zinggeler/GEO-TEST wurde eine 3D-Simulation von Blockschlag-Sturzbahnen durchgeführt. Als Quellgebiet wurde die Felsflanke des Abendberges eingegeben und eine Block-

grösse von 4 m^3 angenommen. Der Untergrund wurde aufgrund der Kartierung mit einer entsprechenden Dämpfung eingeführt und der Wald als Hindernis berücksichtigt. Das Geländere relief bündelt die Sturzbahnen der Blöcke teilweise stark (Fig. 2). Es ergibt sich eine auffallend gute Übereinstimmung mit den früheren Ereignissen, indem jene vor allem dort verzeichnet werden, wo infolge des Reliefs ausgeprägte Bündelungen der Sturzbahnen auftreten.

Das Modell liefert neben den Flugbahnen auch Sturzenergien und Sprunghöhen (Fig. 3 und 4).

Das Steinschlagsimulationsmodell Zinggeler/GEOTEST

Der Sturz eines Blockes wird als Abfolge von Kontaktreaktionen und Flugparabeln sowie einer Rollbewegung modelliert. Es werden folgende Parameter berücksichtigt:

- Geländetopographie
- Blockgrösse, Blockform (Masse, Rotationsfähigkeit)
- Dämpfung des Untergrundes: Fähigkeit, des Untergrundes, sich zu deformieren mit entsprechendem Energieverlust
- Wald: für kleinere und mittlere Blockgrössen bedeutet ein gesunder Wald ein starkes Hindernis. Der Wald fliesst anhand der Stammkennzahlen ins Programm ein.

Das Berechnungsmodell ist als 3D-Modell konzipiert und erlaubt flächendeckende Berechnungen von Sturzbahnen, ausgehend von definierten Startpunkten. Für spezielle Fragestellungen kann auch eine 2D-Simulation durchgeführt werden (siehe Fig. 6 und 7), wobei die Information für eine bestimmte Profilstelle stark erhöht werden kann (z.B. Häufigkeit einer auftretenden Energie oder Sprunghöhe im Hinblick auf die Dimensionierung eines Rückhaltebauwerkes).

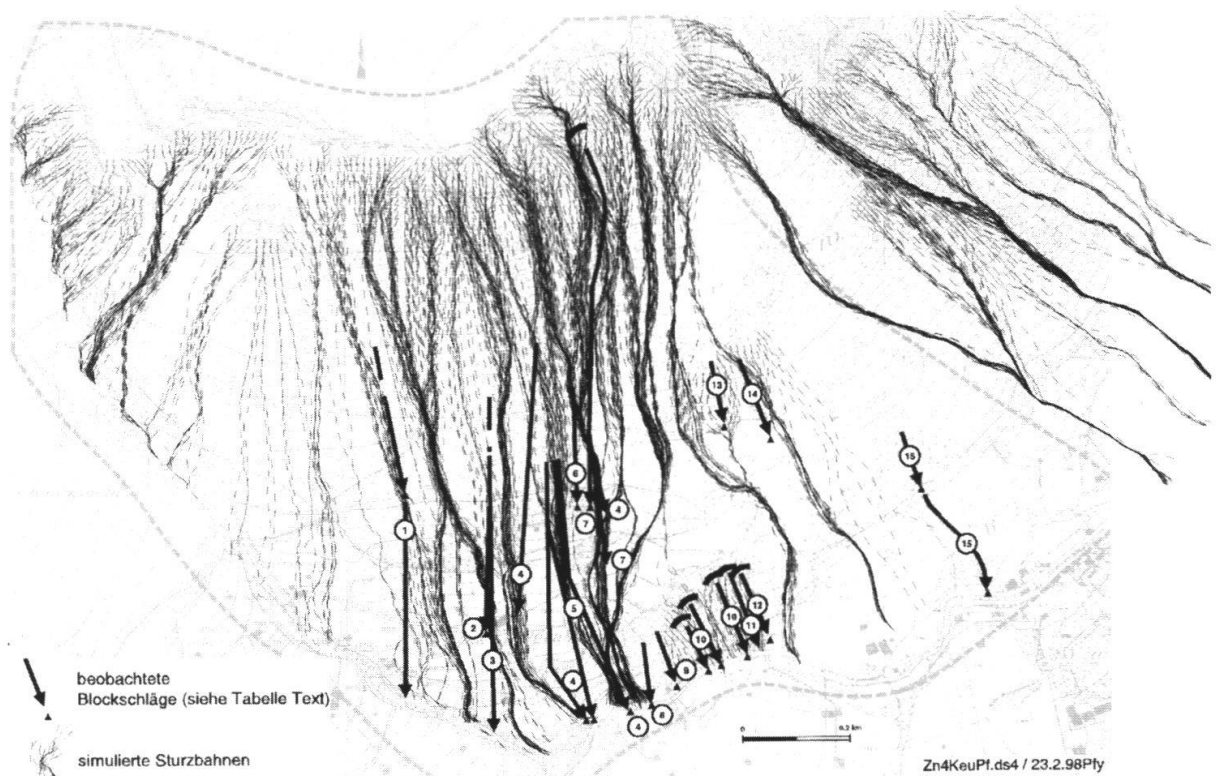


Fig. 2: Ereignisdokumentation (frühere Blockschläge) und mit dem Modell Zinggeler-Geotest berechnete Sturzbahnen von Blockschlägen und frühere Ereignisse.

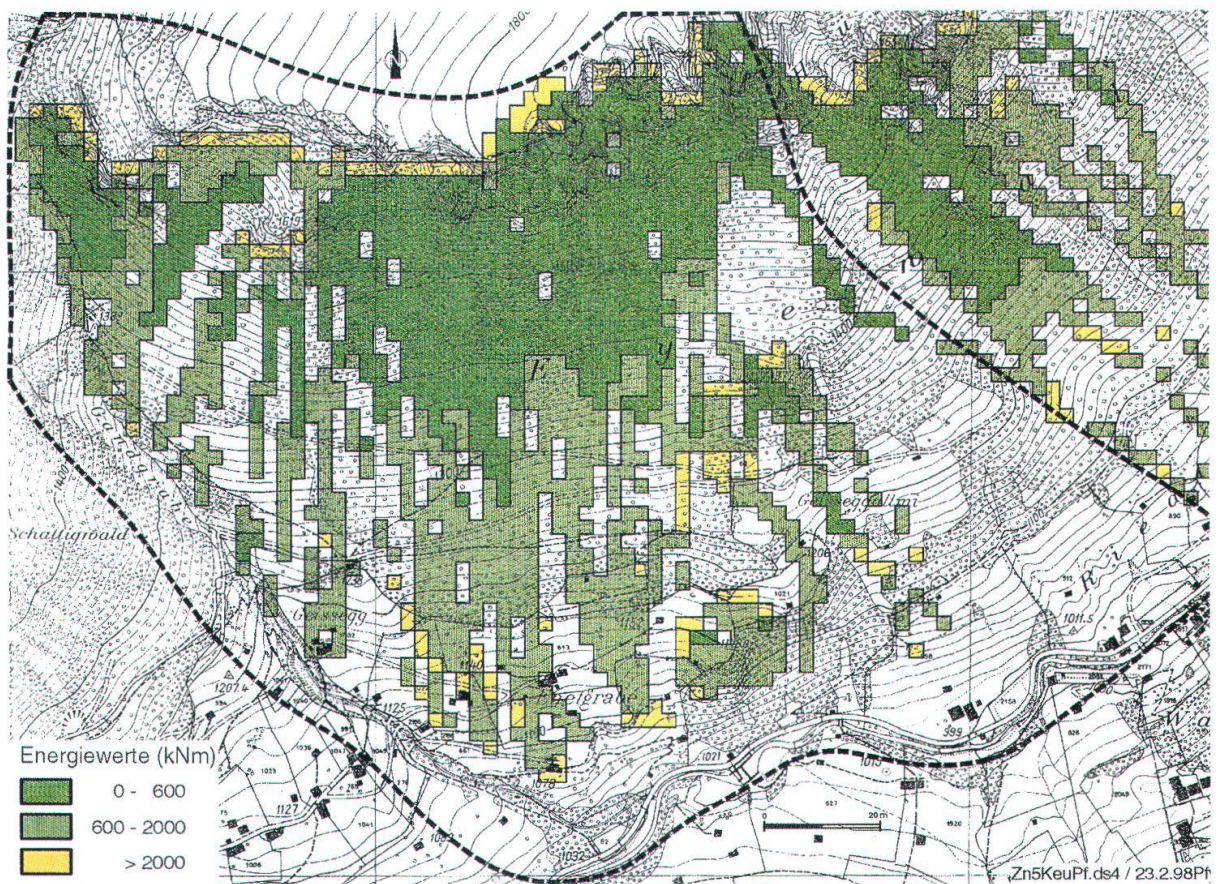


Fig. 3: Berechnete Sturzenergien für Blöcke 4 m³

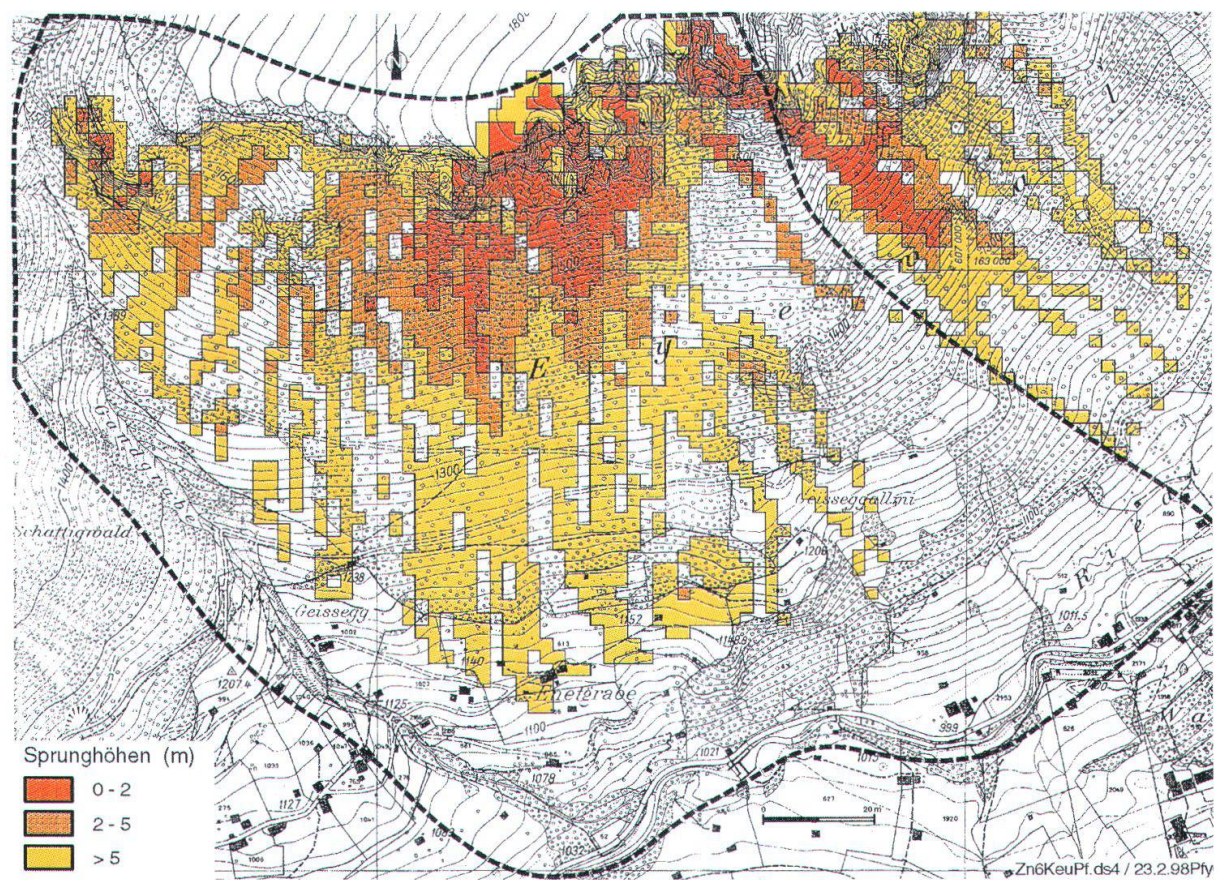


Fig. 4: Berechnete Sprunghöhen für Blöcke 4 m³

5. Gefahrenkarte

Auf der Basis der Empfehlungen des BUWAL 1997 wurde die steinschlaggefährdete Talflanke unterhalb des Abendberges in den blauen und roten Gefahrenbereich gelegt (häufige bis mittlere Eintretenswahrscheinlichkeit, hohe Energiewerte). Im roten Gefahrenbereich befinden sich sechs Wohnhäuser.

6. Gefahrenmanagement, Massnahmen

Aufgrund des grossen Risikos für die Siedlung ergab sich ein zwingender Handlungsbedarf für Schutzmassnahmen. Diese bestehen aus folgenden Elementen:

- a) **Raumplanung:** Bauverbot im roten Gefahrenbereich.
- b) **Waldpflege:** Der bestehende Wald erfüllt eine äusserst wichtige Schutzfunktion. Blöcke bis zu 4 m^3 werden durch den Wald zurückgehalten. Ohne Wald wäre die Siedlung einem sehr häufigen Blockschlag ausgesetzt. Der Pflege und Verjüngung des Waldes wurde deshalb eine grosse Priorität eingeräumt.
- c) **Schutzdamm:** Zum Schutz der am stärksten gefährdeten Wohnhäuser wurde ein 300 m langer und 4 m hoher Schutzdamm erstellt. Dessen Schutzwirkung ist auf Fig. 5 dargestellt. Die Gefahrenkarte konnte in der Folge entsprechend abgeändert werden, indem der rote Gefahrenbereich unterhalb des Dammes zu blau rückgestuft werden konnte.

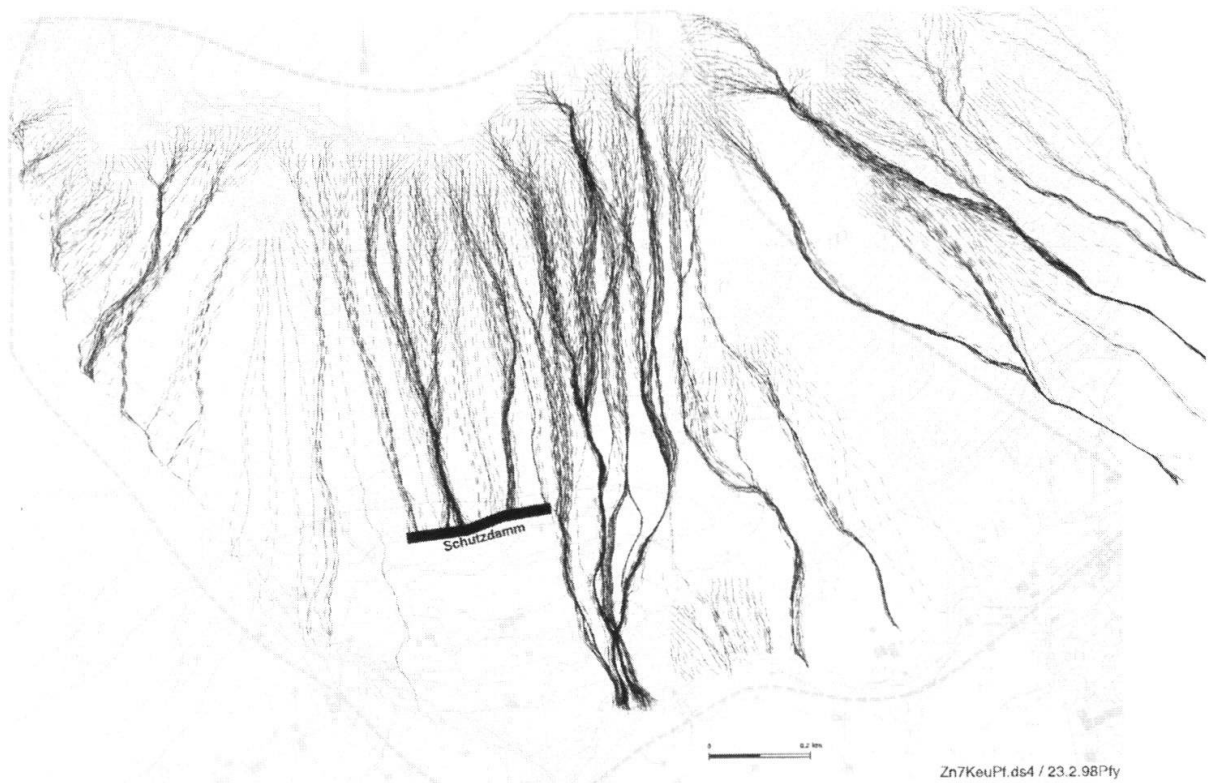


Fig. 5: Schutzdamm mit Schutzwirkung

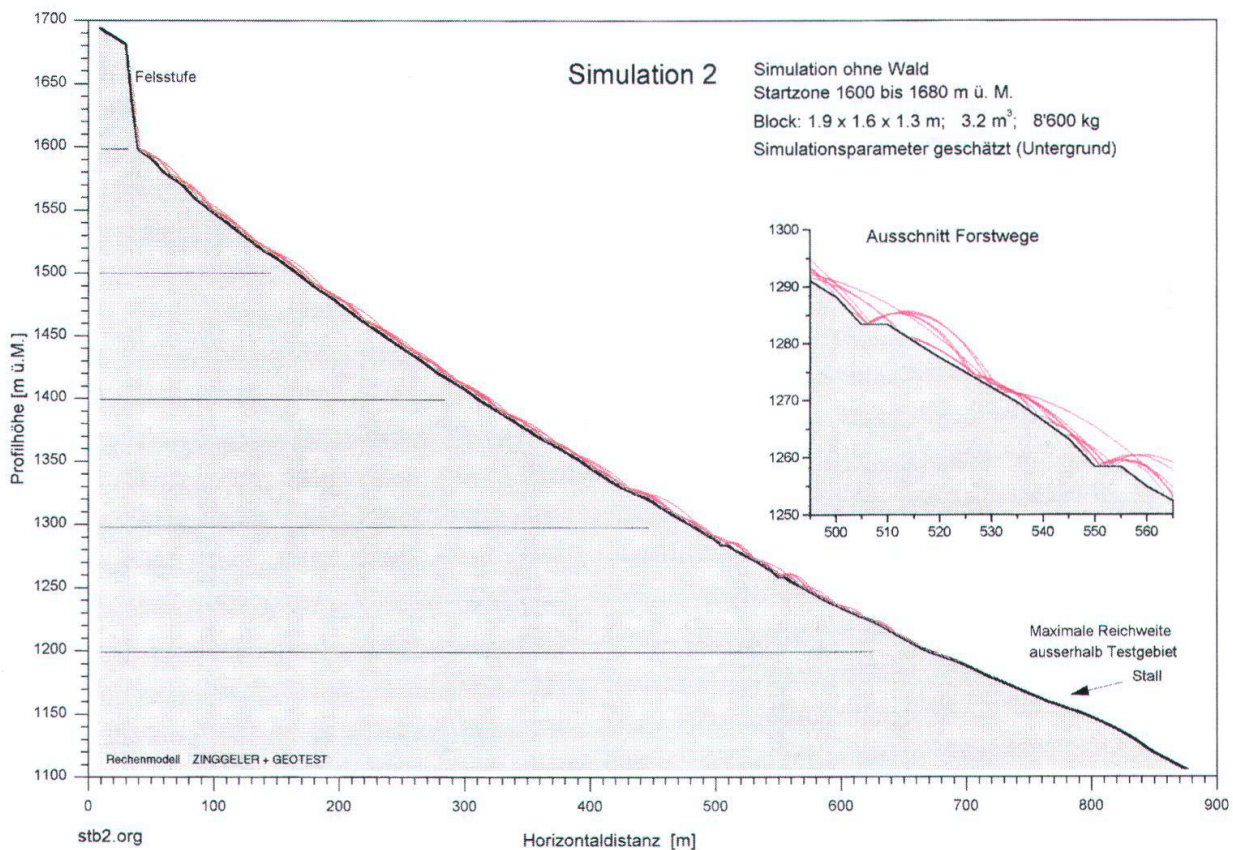


Fig. 6: 2-D-Simulation im Profil

- d) **Schutznetze** unmittelbar oberhalb von drei gefährdeten Wohnhäusern wurde mittels Drahtseilnetzen (Typ Geobrugg) ein Objektschutz erstellt.
- e) **Frühwarndienst Felssturz:** Ein labiler Felsturm in der Wand des Abendberges wird durch systematische Messungen überwacht.

7. Wichtigste Aspekte des Fallbeispiels

Die gute geologische Datengrundlage (geologisch-morphologische Kartierung, Ereignisdokumentation, Simulationsmodell) ergibt eine fundierte und nachvollziehbare Beurteilung des Gefahrenpotentials und der vorhandenen Risiken. Die Ereignisdokumentation ist im vorliegenden Fall von grosser Bedeutung für die Einschätzung der Gefahren. Die Modellrechnung wird durch die früheren Ereignisse bestätigt. Sie stellt ein wichtiges Element für die Ausscheidung besonders gefährdeter Gebiete und die richtige Dimensionierung von Rückhaltmassnahmen dar.

Simulation 2 Simulation ohne Wald;
 Block : 1.9 x 1.6 x 1.3 m; 3.2 m³; 8'600 kg
 Simulationsparameter geschätzt

Legende für Diagramme 1, 2 und 3

Werte, die von
 50% 20% 0%
 der simulierten Blöcke überschritten werden

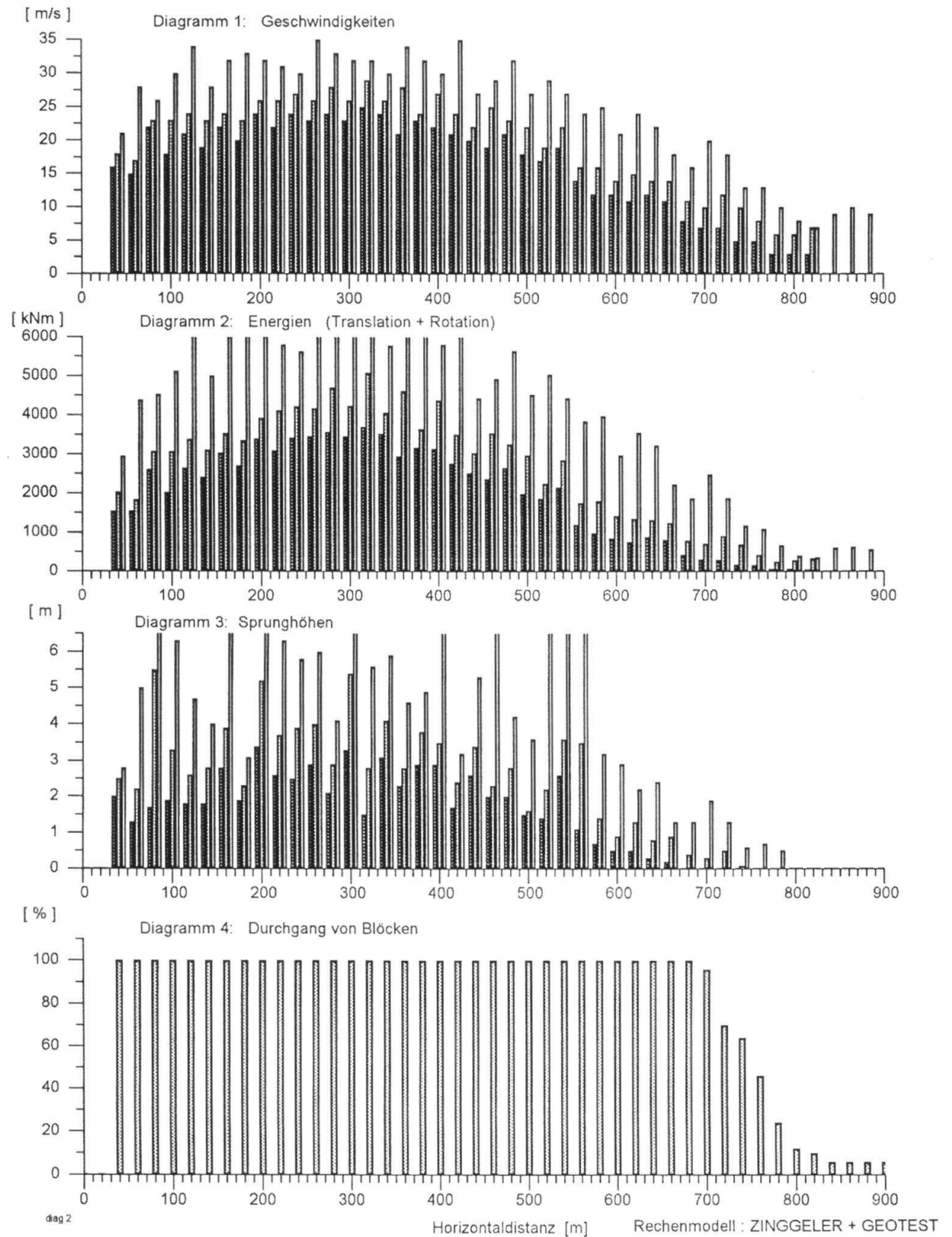


Fig. 7: 2-D-Simulation, Analyse von Geschwindigkeiten, Energien, Sprunghöhen und Frequenzen.

Fallbeispiel Nr. 7:

Das Rutschgebiet Bodmi, Gigental (UR)

PETER HALDIMANN*

Zusammenfassung

Im ernerischen Gigental über dem Vierwaldstättersee konnte ein altes Rutschgebiet dank einer sorgfältigen geologischen Kartierung und der darauf abgestützten Lagebeurteilung saniert werden. Die Sanierung erfolgte gemäss einem etappierten Massnahmenplan in Form einer umfassenden Gebietsentwässerung und der Umleitung des erodierenden Gigenbaches in ein neues Gerinne. Die Rutschbewegungen sind heute praktisch zum Stillstand gekommen und die Gefahr von Murgängen für die Unterlieger ist gebannt.

1. Ausgangslage und Problemstellung

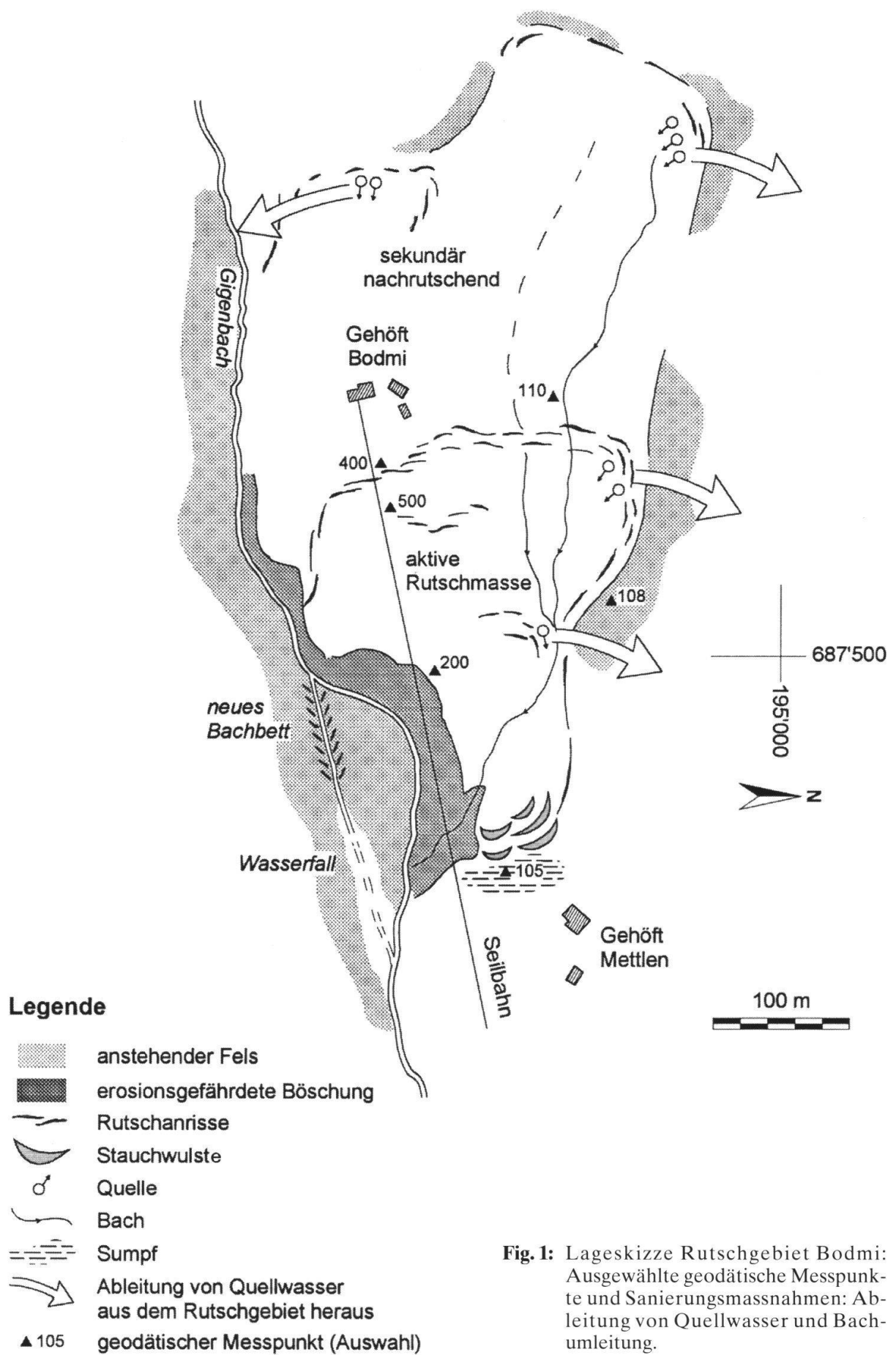
Im steilen Hanggebiet von Bodmi im Gigental über dem linken Ufer des Urnersees in Seedorf (Koord. 687'300/194'700) fanden auf einer Fläche von etwa 150'000 m² seit jeher Terrainbewegungen statt. In Mitleidenschaft gezogen wurden das Gehöft Bodmi, die umliegenden Hausgärten und Alpweiden sowie die zum Gehöft führende Seilbahn. Da der Hangfuss durch den Gigenbach ständig erodiert wurde, herrschte auch eine latente Gefahr, dass Murgänge (Rüfen) ausgelöst wurden. Dieser Gefahr waren alle Unterlieger ausgesetzt, namentlich die Wohnhäuser auf dem Delta des Gigenbaches am Urnersee, die Kantonsstrasse Seedorf-Bauen und schliesslich auch die Nationalstrasse A2.

Um die vorhandenen Gefahren zu vermindern, wurden im Laufe der 80er Jahre unter der ständigen Beratung und Begleitung durch den Geologen zielgerichtete Untersuchungen ausgeführt und umfangreiche Massnahmen zur Sanierung des Rutschhangs getroffen.

2. Geologische Situation

Das Rutschgebiet Bodmi liegt im Bereich des nordhelvetischen Flysches; der anstehende Fels wird durch eine Wechsellagerung von Tonschiefern, Mergeln und Sandstein- (Quarzit-) Schichten aufgebaut (Formation des Altdorfer-Sandsteins). Die Schichtfolge ist in diesem Bereich tektonisch sehr stark gestört, d.h. verfaultet und von Klüften durchschlagen. Die Strukturen des anstehenden Felses sind zumeist

* Dr. Heinrich Jäckli AG, Limmattalstrasse 289, 8049 Zürich



regellos und nicht prognostizierbar. Im eigentlichen Rutschgebiet ist der Schichtkomplex tiefgründig verwittert. Die verlehnten Tonschiefer bilden eine Masse von geringer Scherfestigkeit, worin die Sandsteine und Quarzite in Form aufgelöster Blöcke «schwimmen».

Die Rutschmasse wird durch den Gigenbach am Hangfuss schräg angeschnitten. Mit der Bacherosion wird hier laufend Schutt abgetragen. Rutschen, Bacherosion am Hangfuss und Nachrutschen waren in der Vergangenheit sich ständig folgende Phänomene.

3. Durchgeführte Untersuchungen, Ergebnisse, Beurteilung

1977 fand eine erste Begehung des Rutschgebietes durch den Geologen statt. Ab 1978 folgten systematische Bewegungsmessungen von versetzten Messpunkten und eine geologische Kartierung (Fig. 1), welche eine Analyse der Bewegungsabläufe und eine Unterscheidung der Rutschmasse in einen aktiv rutschenden und einen sekundär nachrutschenden Bereich erlaubte.

Eine sorgfältige Erhebung aller Quellen und Wasserläufe zeigte zudem, dass sowohl im Abrissgebiet als auch innerhalb der Rutschmasse Quellen mit einer saisonal stark schwankenden Schüttung von durchschnittlich etwa 700 l/min austraten. Diese nährten Bäche, welche im Rutschschutt wieder versickerten. Insgesamt gelangte in der Rutschmasse nebst dem Niederschlagswasser Quell- und Bachwasser in der Grössenordnung von etwa 400'000 m³ pro Jahr zur Versickerung.

4. Geologisches Modell, Mechanismen, Kausalität

Gestützt auf die geologischen Untersuchungen wurde ein geologisches Modell des Rutschgebietes entwickelt, und als Ursache der Rutschbewegungen konnten folgende Faktoren und deren Zusammenspielen identifiziert werden:

- die geringe Scherfestigkeit des verwitterten Flysches,
- die Quellwasseraustritte im Bereich der Rutschanrisse,
- die Versickerung von Quell- und Bachwasser im Bereich der Rutschmasse,
- die damit verbundene Reduktion der Scherwiderstände auf den Gleitflächen,
- die Erosion des Gigenbaches am Hangfuss.

5. Gefahrenmanagement, Sanierungsmassnahmen und Erfolgskontrolle

Das Gefahrenmanagement war von Anfang an auf eine pragmatische Sanierung des Rutschhanges in mehreren Etappen ausgerichtet.

1. Errichten eines geodätischen Überwachungsnetzes mit periodischer Vermessung der Rutschbewegungen sowie eines Alarmdispositivs in kritischen Phasen,
2. Fassen aller vorhandenen Quellen,
3. Dichte Ableitung allen Quell- und Bachwassers aus der Rutschmasse heraus,
4. Verlegung des Gigenbaches aus dem erosionsgefährdeten Hangfussbereich,
5. Aufbringen einer Fussbelastung durch Auffüllung des alten Bachbettes.

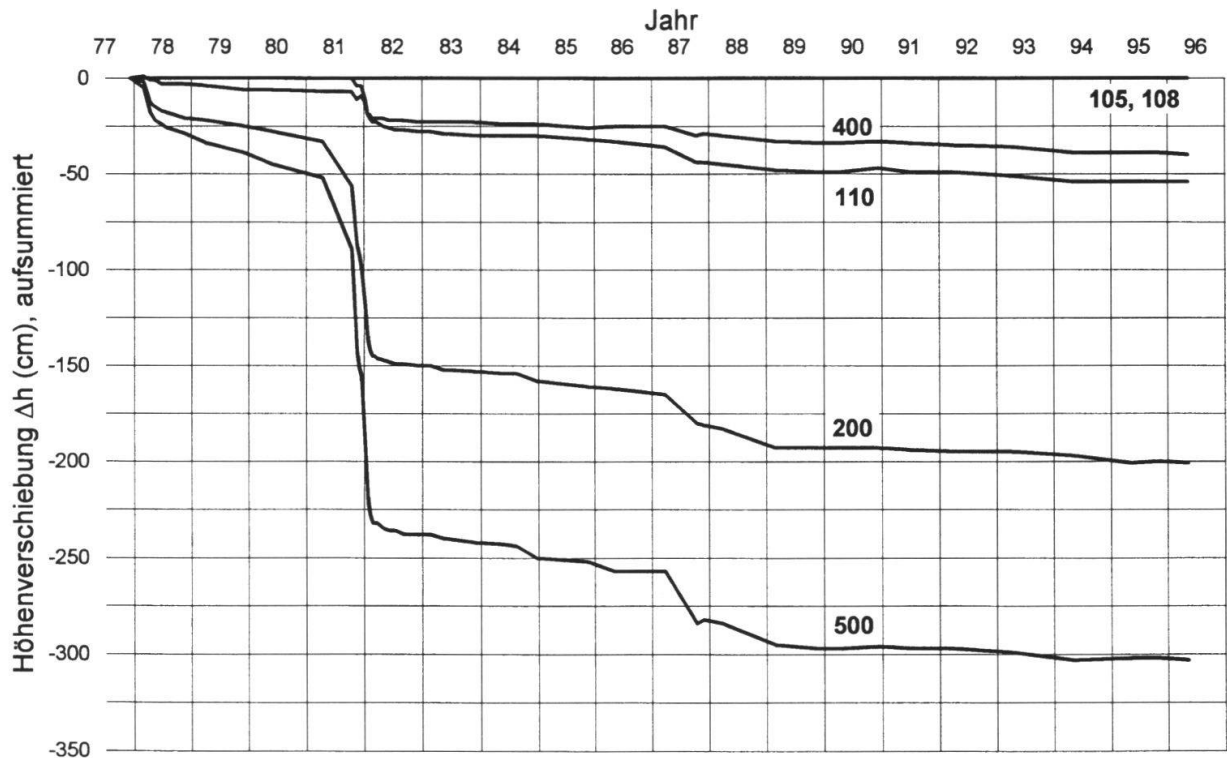


Fig. 2: Vertikalverschiebungen ausgewählter Messpunkte als Erfolgskontrolle der durchgeführten Sanierungsmassnahmen.

Bereits 1978 wurde im Rutschgebiet ein Messdispositiv für geodätische Messungen installiert, welches in der Folge eine sehr präzise periodische Überwachung der Rutschbewegungen erlaubte. Diese Messungen zeigten bis im Herbst 1981 Verschiebungen in der Grössenordnung von 10 cm pro Jahr (horizontal) resp. 15 cm pro Jahr (vertikal). Im Winter 1981/82 zeichnete sich eine markante Beschleunigung der Rutschbewegungen ab (Fig. 2) und gleichzeitig öffneten sich die wichtigsten Rutschanrisse in bedrohlichem Mass. Es musste mit einem plötzlichen Abrutschen der ganzen bewegten Masse in den Gigenbach gerechnet werden. Bei gleichzeitiger Hochwasserführung des Baches hätte sich ein Murgang mit gravierenden Folgen für alle Unterlieger entwickeln können. Dieser Gefahr wurde kurzfristig mittels eines Mess-, Beobachtungs- und Alarmdispositivs Rechnung getragen.

Im Frühjahr 1982 wurde die erste Sanierungsetappe in Angriff genommen. Dabei wurden rund 15 Quellen gefasst und in dichten, flexiblen Rohrleitungen aus dem Rutschgebiet abgeleitet. Zwei dieser Quellen wurden als Trinkwasserfassungen erstellt und versorgen seither die Liegenschaften Bodmi und Mettlen mit sauberem Trinkwasser. Die abgeleitete Quellwassermenge beläuft sich auf durchschnittlich etwa 500 l/min. Die Fassungsarbeiten konnten im Herbst 1982 abgeschlossen werden.

Der Erfolg dieser Entwässerungsmassnahmen zeigte sich sehr rasch in einer spürbaren Beruhigung der Bewegungen ab Mitte 1982. Die Bewegungen dauerten aber in vermindertem Mass weiter an, nunmehr noch mit einer Rate von etwa 4 cm pro Jahr horizontal, resp. 8 cm vertikal (Fig. 2).

Im Laufe des Jahres 1988, nachdem wieder eine kurzfristige Beschleunigung der Bewegungen eingetreten war, wurde die zweite Etappe der Sanierung in Angriff genommen. Die spezielle topographische und geologische Situation erlaubte es, für den Gigenbach in einem anstehenden Felssporn südlich des alten Bachbettes ein neues Bett anzulegen und damit den Bach aus dem Bereich des erosionsgefährdeten Hangfusses wegzuleiten. Seit dem Herbst 1989 fliesst der Bach durch das neu geschaffene Bett. Dem Beobachter vom Urnersee her bietet sich seither das Bild eines menschengemachten Wasserfalles, welchem das künstliche Gerinne absolut nicht anzusehen ist (Fig. 3).

Seit Herbst 1989 war also jede Bacherosion am Hangfuss unterbunden, was sich in einer weiteren, nachhaltigen Beruhigung der Rutschbewegungen äusserte. Die Rutschmasse verhielt sich seither weitgehend stabil, es war höchstens noch ein Nachrutschen einzelner Partien zu verzeichnen.

Die letzte Phase der Sanierung erfolgte 1993/94, als das alte Bachbett mit Tunnelausbruchmaterial aus einem nahen Strassentunnel aufgefüllt wurde. Damit wurden auch die letzten Instabilitäten, die in der einstigen Böschung noch bestanden hatten, eliminiert (Fig. 4).

Das Rutschgebiet Bodmi kann dank der durchgeführten Massnahmen heute als weitgehend saniert betrachtet werden. Den einzigen Gefahrenpunkt bildet noch ein etwa 160 m langer Gebietsstreifen mit einer lokalen Felssturzgefahr am rechten Bachufer oberhalb der neu geschaffenen Umleitstrecke, wo lose Felsmassen ins



Fig. 3: Neues Bachbett im anstehenden Flysch, Blick von Osten.

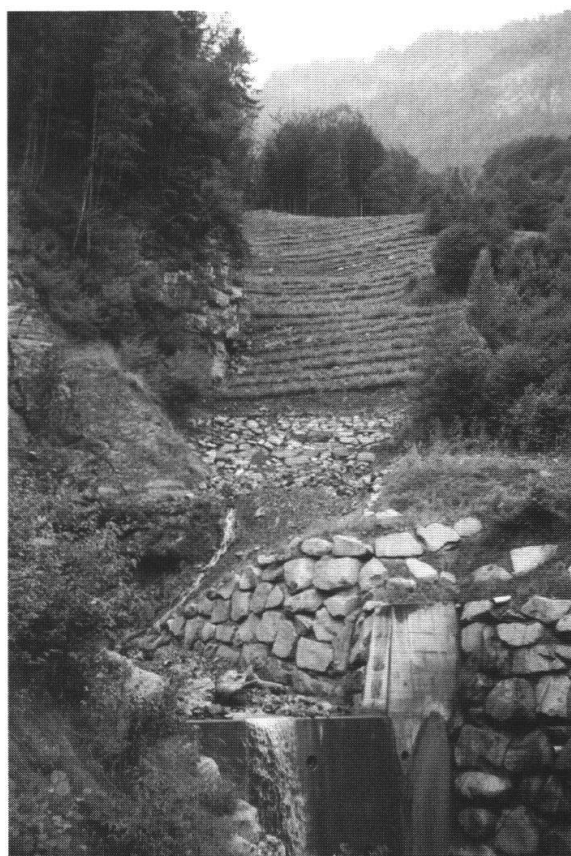


Fig. 4: Das alte Bachbett wird aufgefüllt, Blick von Osten.

Bachbett abstürzen und bei Hochwasser mobilisiert werden können. Dieses potentielle Gefahrengebiet wird überwacht; die Wahrscheinlichkeit eines nicht angekündigten, grösseren Felssturzes bei gleichzeitiger Hochwasserführung des Gigenbaches wird als gering beurteilt.

Die Gefahr eines grösseren Murgangs im Gigenbach konnte mit den getroffenen Massnahmen substanziell verringert werden, und das ehemalige Rutschgebiet Bodmi kann wieder gefahrlos bewirtschaftet werden.

6. Wichtige Aspekte des Fallbeispiels

Im vorliegenden Fall spielte die exakte geologische Kartierung des Rutschgebietes eine ausschlaggebende Rolle für die Beurteilung des Gefährdungsbildes und für die Massnahmenplanung. Die Beobachtung des Geologen, dass die Abrisskante der Rutschung an einen Quellhorizont im anstehenden Fels gebunden war, und dass das austretende Quellwasser sowie weiteres Bachwasser im Rutschschutt wieder versickerte und die Gleitflächen «schmierte», war der Schlüssel für die Planung der wichtigsten Massnahme: Fassung und Ableitung allen Quellwassers aus der Rutschmasse. Allein schon die Hangentwässerung bewirkte eine markante Beruhigung der Rutschbewegungen.

Da der Böschungsfuss der Rutschmasse durch Bacherosion gefährdet war, mussten Lösungen zur Verhinderung der Bacherosion gefunden werden. Varianten, den Bach im alten Bett in ein dichtes Gerinne zu legen, den Bach mit beweglichen Schwellen zu verbauen, oder die Böschung mit einem massiven aber in sich flexiblen Blockwurf zu schützen, wurden zwar diskutiert, aber in Anbetracht der erosiven Gewalt des Baches bei Hochwasserführung verworfen.

Wiederum war es die sorgfältige geologische Kartierung, welche zum Konzept führte, im anstehenden Fels neben dem erosionsgefährdeten Böschungsfuss ein neues Bachbett zu schaffen.

Dank exakter geologischer Beobachtungen und einer sorgfältigen Analyse der vorliegenden Situation konnten in der richtigen Reihenfolge die richtigen Massnahmen mit nachhaltiger Wirkung getroffen werden.

Fallbeispiel Nr. 8:

Die Bergstürze auf der Sandalp 1996 Risikobeurteilung und Gefahrenmanagement

HANS RUDOLF KEUSEN*

Zusammenfassung

Am 24. Januar 1996 erfolgte aus der Ostwand des Zutribistockes ein erster Bergsturz von 0.5 Mio m³. Ein zweiter Abbruch ereignete sich am 3. März 1996 mit 1.75 Mio m³. Die beiden Ereignisse wurden durch verschiedene seismische Stationen registriert. Die Ursache für die Bergstürze sind ungünstig liegende Trennflächensysteme, insbesondere die steil gegen das Tal abfallende und unterschrittene Schichtung resp. Schieferung. Bei der Risikobeurteilung ergaben sich verschiedene Gefahrenpotentiale. Dabei waren a) ein Bergsturz in einen aufgestauten See und b) die luftseitige Erosion des Dammes beim Überlaufen des Sees die folgenschwersten Szenarien, weil sie zu einer grossen Flutwelle im Tal hätten führen können. Die Eintretenswahrscheinlichkeiten wurden für a) mit 0.01 (1 x in 100 Jahren) resp. für b) mit 0.0005 abgeschätzt. Wichtigstes Element des Gefahrenmanagements war die Erstellung eines Scheitelkanals durch den Damm. Damit kann ein Seeaufstau verhindert werden; die oben erwähnten Risiken sind damit eliminiert.

Résumé

Le 24 janvier 1996, une premier éboulement de 0.5 millions de m³ se produisit sur la face Est du Zutribistock. Une seconde rupture impliquant 1.75 millions de m³ se produisit le 3 mars 1996. Les deux événements furent enregistrés par diverses stations sismologiques. L'origine des éboulements est liée à la position défavorable des surfaces de discontinuité, en particulier à la stratification, respectivement à la schistosité qui plongent fortement en direction de la vallée et sont coupées à leur base. Différents aléas ont été définis par l'évaluation du risque. Parmi ceux-ci, les scénarios aux conséquences les plus graves étaient: a) un éboulement dans un lac artificiel et b) l'érosion de la digue de retenue par le débordement du lac, car ils auraient pu conduire à un véritable «raz-de-marée» dans la vallée. La probabilité d'occurrence fut calculée à 0.01 (1x/100 ans) pour le scénario a) et à 0.005 pour le scénario b). Le principal élément de gestion du risque fut la création d'un canal de déversement au travers de la digue. De cette manière, un débordement du lac peut être évité et les risques cités plus haut sont éliminés.

1. Einleitung, Ereignisse

Am 24. Januar 1996, ca. 8 Uhr, erfolgte aus der Ostwand des Zutribistockes (Kt. Glarus) ein erster Bergsturz aus einer Höhe zwischen 1950 - rund 2250 m ü.M. Ein zweiter Bergsturz ereignete sich am 3. März 1996 um ca. 19.30 h aus einem Gebirgsbereich südlich angrenzend des früheren Ausbruchs (Fig. 1, 2).

* Geotest AG, Birkenweg 15, 3052 Zollikofen

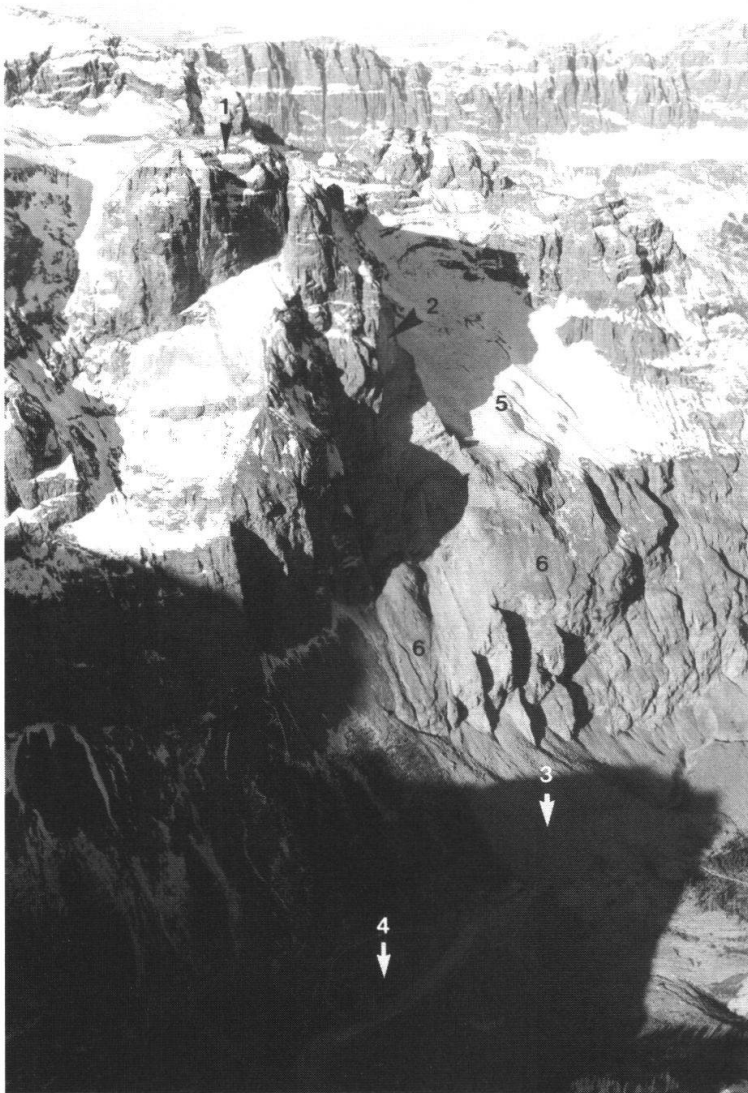


Fig. 1:

Bergsturzgebiet Zuetribistock von Süden (Aufnahme Luftaufklärung Dübendorf)

1: Zuetribistock (2'644.5 m ü.M.) mit westlich anschliessenden Gipfelplateau

2: Absturzbereich des 1. Sturzes vom 24.1.1996

3: Sturzmasse vom 24.1. 1996 zwischen Vorder und Hinter Sand

4: Ausgleichsbecken KLL

5: Gensalpeli

6: Gensiband mit talseitigen Felsköpfen.

In der Folge wurde eine Gefahrenkommission etabliert, in welcher zwei Geologen (Dr. H.R. Keusen und Dr. M. Kobel) als Berater mitwirkten. Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich auf den Bericht Geotest / BTG vom 16.12.1996: «Bergstürze Sandalp 1996, geologisches Gutachten: Ereignisse, Kausalität, Risiko weiterer Bergstürze, Massnahmen.»

Bis heute ereigneten sich immer wieder kleinere Block- und Felsstürze (siehe Kasten). Sie wurden z.T. von Berggängern beobachtet oder durch die seismischen Stationen registriert:

<i>Sturz</i>	<i>Datum / Zeit</i>		<i>Volumen [Mio m³]</i>
1	24.1.96	09. ⁰⁰	0.47
2	3.3.96	19. ³⁰	1.75
3	4.9.96	04. ⁴⁰	0.01 - 0.04
4	24.9.97	16. ⁵⁰	ca. 0.02 - 0.08
5	27.9.97	10. ⁰⁰	
6	31.3.98	9. ⁴³	ca. 0.1
7	31.3.98	1. ⁵⁸	

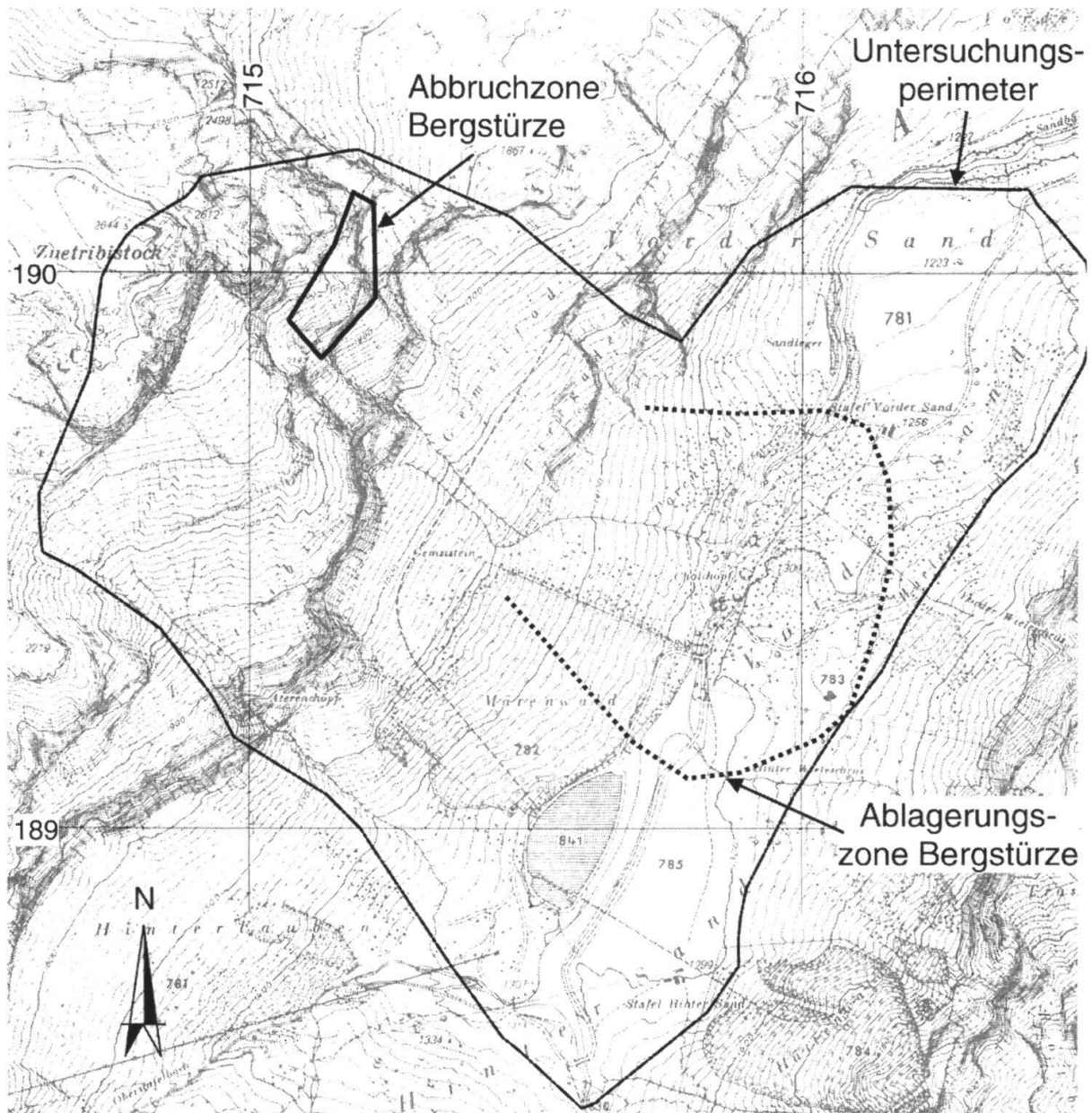


Fig. 2: Bergsturzgebiet Sandalp, Übersicht.

2. Problemstellung

In Zusammenhang mit den erfolgten Bergstürzen sollten von den Geologen folgende Fragen beantwortet werden:

- Kausalität der erfolgten Bergstürze als wichtige Grundlage für die Beantwortung von Frage b)
- Gefahr weiterer Bergstürze (Eintretenswahrscheinlichkeit, Ort, Ausmass, Schadenpotentiale)
- Stabilität der abgelagerten Bergsturzmasse gegenüber innerer und äusserer Erosion
- Schutzmassnahmen für die Zukunft
 - bauliche Massnahmen
 - Frühwarndienste

Im Zentrum des Interesses stand eine **Risikobewertung** der vorhandenen Gefahrenpotentiale (insbesondere auch von deren Kombinationen wie z.B. Bergsturz in See) und der betroffenen Schadenpotentiale.

3. Geologische Situation

Die Ostwand des Zutribistockes besteht aus einer mächtigen Abfolge aus Quintnerkalken (Malm): Es handelt sich um ein mehr als tausend Meter mächtiges Paket von mehreren übereinander geschuppten Kalkabfolgen.

Die Kalke sind massiv und weisen markante, stark durchtrennende Kluftsysteme auf.

Tab. 1: Wichtigste Trennflächensysteme im Abbruchgebiet

<i>System</i>	<i>Fallazimut / Fallen</i>	<i>Charakterisierung</i>
K ₁	50 / 85	Hauptkluftsystem NW-SE stark durchtrennend. Längserstreckungen bis mehrere 100 m. Kluftabstände 50 - 200 m
K ₂	130 - 135 / 85	stark durchtrennendes Kluftsystem, z.T. mit glänzenden Rutschharnischen. Längserstreckungen bis 100 und mehr m. Kluftabstände ca. 100 m
S ₁	145 - 150 / 30	Schieferungsflächen
S ₂	147 - 152 / 46 - 50	Scherflächen. Steiler als Schieferung

Frühere Bergstürze

Bereits früher erfolgten Bergstürze aus der Ostwand des Zutribistockes. Die Ausbruchsnischen sind heute noch gut erkennbar. Wann die Ereignisse erfolgten, ist unbekannt. Die Bergstürze schütteten den Talboden der Sandalp um mindestens 15 m auf und führten zu einem Rückstau des Sandbaches mit nachfolgender Schuttablagerung bis auf die Höhe der heutigen Sandalp.

4. Durchgeführte Untersuchungen

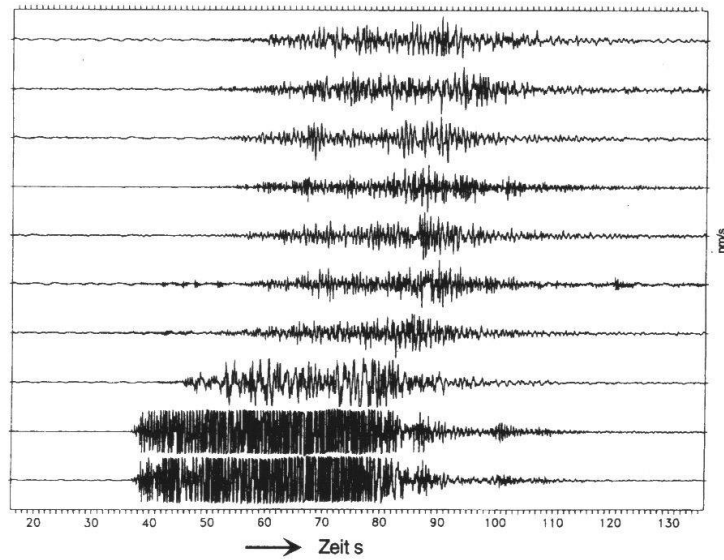
Der Regierungsrat des Kantons Glarus setzte mit Beschluss vom 11.3.1996 eine Gefahrenkommission ein, welche aus Behördenmitgliedern des Kantons, aus Vertretern des Kraftwerkes Lindt-Limmern (KLL) - welche eine Wasserfassung auf der Sandalp betreibt -, der Sandalpbesitzer, Spezialisten der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETHZ (VAW) und des Bundesamtes für Wasserwirtschaft (BWW) sowie zwei Geologie-Experten bestand.

Im Hinblick auf die Beantwortung der gestellten Fragen wurden im wesentlichen folgende Untersuchungen durchgeführt:

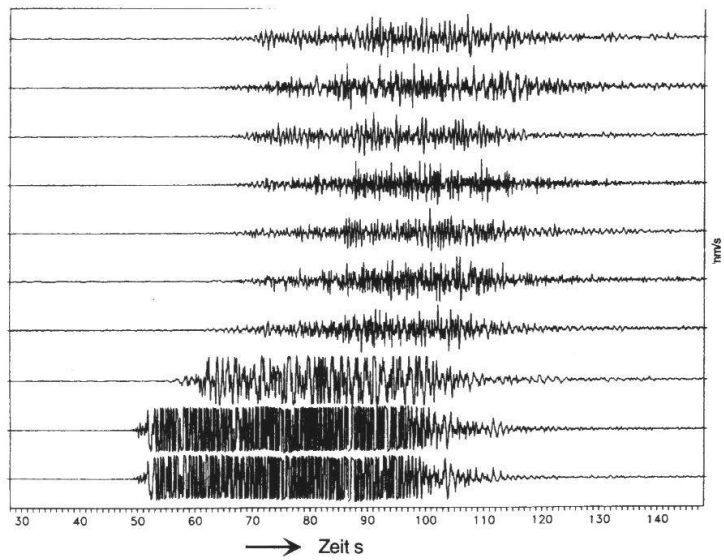
a) Photogrammetrie

Auswertung von vor Bergsturz 1, zwischen Bergsturz 1+2 und nach Bergsturz 2 aufgenommenen Flugaufnahmen und Verarbeitung zu digitalen Geländemodellen.

Bergsturz 1 : 24. 1. 1996



Bergsturz 2 : 3. 3. 1996



Felssturz 3 : 4. 9. 1996

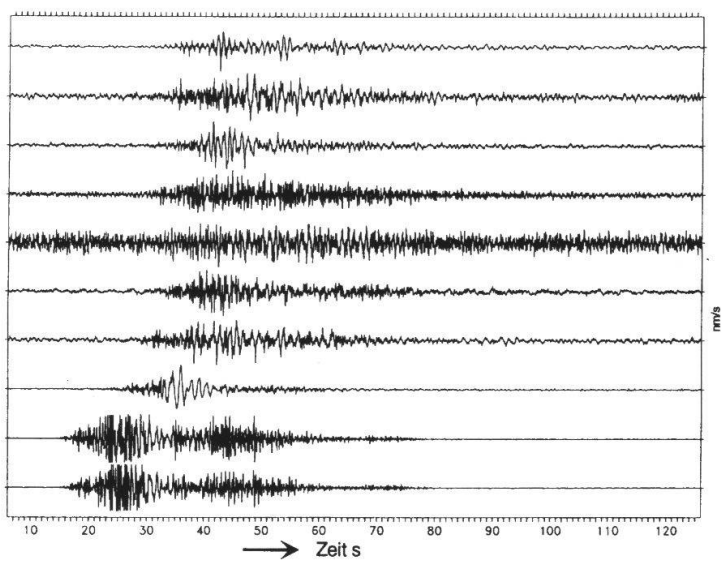


Fig. 3: Seismologische Aufzeichnungen der Stürze 1, 2, 3 bei verschiedenen Stationen des Schweizerischen Erdbebenendienstes.

b) Geologie

- Geländeaufnahmen
- Aufarbeitung der Photogrammetrie mit Intergraph
- Erarbeitung des geologischen Modells (Kausalität)
- Erarbeitung der Gefahrenpotentiale (mögliche weitere Sturzzenarien)

c) Wasserseite

- hydrologische Berechnungen zum Szenarium Seeaufstau
- Flutwellenberechnungen, Szenarium Sturz in See
- Flutwellenberechnungen, Szenarium Erosion Damm

d) Risikoabschätzung und Massnahmenplanung

5. Untersuchungsergebnisse

Seismologische Beobachtungen

Die während der Fels- und Bergstürze erfolgten Erschütterungen wurden durch den Schweizerischen Erdbebendienst (SED) an verschiedenen Stationen registriert (Fig. 3). Die langgezogene Form des Signals ohne eindeutigen Anfang und ohne über mehrere Stationen korrelierbare Einsätze ist typisch für BergsturzsSignale. Die registrierten Erschütterungen entsprechen weitgehend dem Aufprall der Sturzmasse auf dem Talboden. Sie dauerten bei Sturz 1 und 2 ca. 60 - 80 Sekunden, bei Sturz 3 ca. 50 Sekunden.

Kubaturen

Aus der Photogrammetrie lassen sich folgende Kubaturen berechnen, resp. abschätzen:

Tab. 2: Bergstürze Sandalp, Kubaturen

<i>Ereignis</i>	<i>V. Ausbruch (Mio. m³)</i>	<i>V. Ablagerung (Mio. m³)</i>	<i>Faktor Ausbruch / Ablagerung</i>
Sturz 1 (24.1.96)	0.47	0.75	1.6
Sturz 2 (3.3.96)	1.75	2.2	1.3
Total	2.22	2.95	

Ausbruchsformen, Pauschalgefälle

Die Bergstürze erfassten schmale, bis über 200 m hohe Felsscheiben, bergseits begrenzt durch K₂, an der Basis durch S₂ (Fig. 4, 5, 6).

Die Pauschalgefälle betragen 40° für Sturz 1, resp. 35 - 37° für Sturz 2.

Ablagerung

Die Mächtigkeiten der Ablagerung erreichen bis über 40 m. Sie ist auffallend feinkörnig, grosse Blöcke treten vor allem an der Stirne der Bergsturzmasse und dessen südlichem Rande auf.

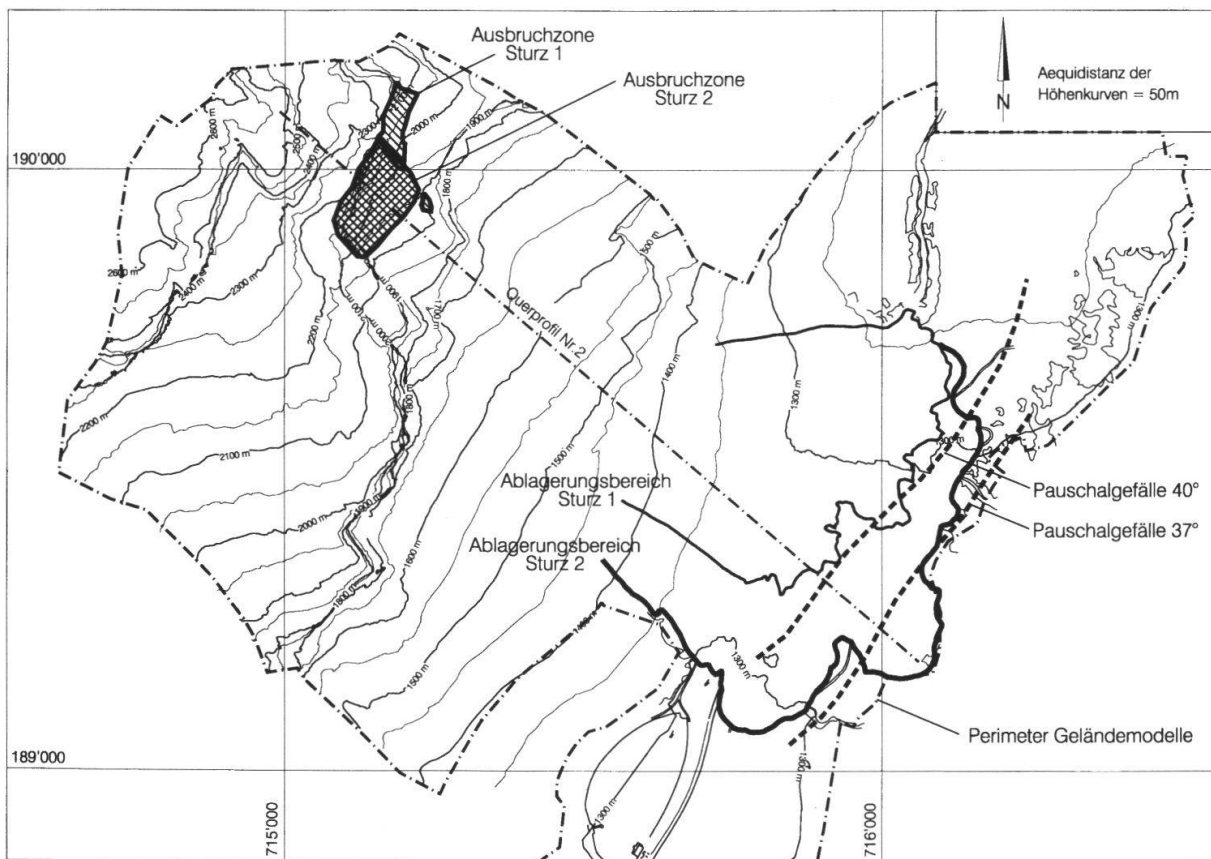


Fig. 4: Ausbrüche und Ablagerungen der Bergstürze 1 und 2.

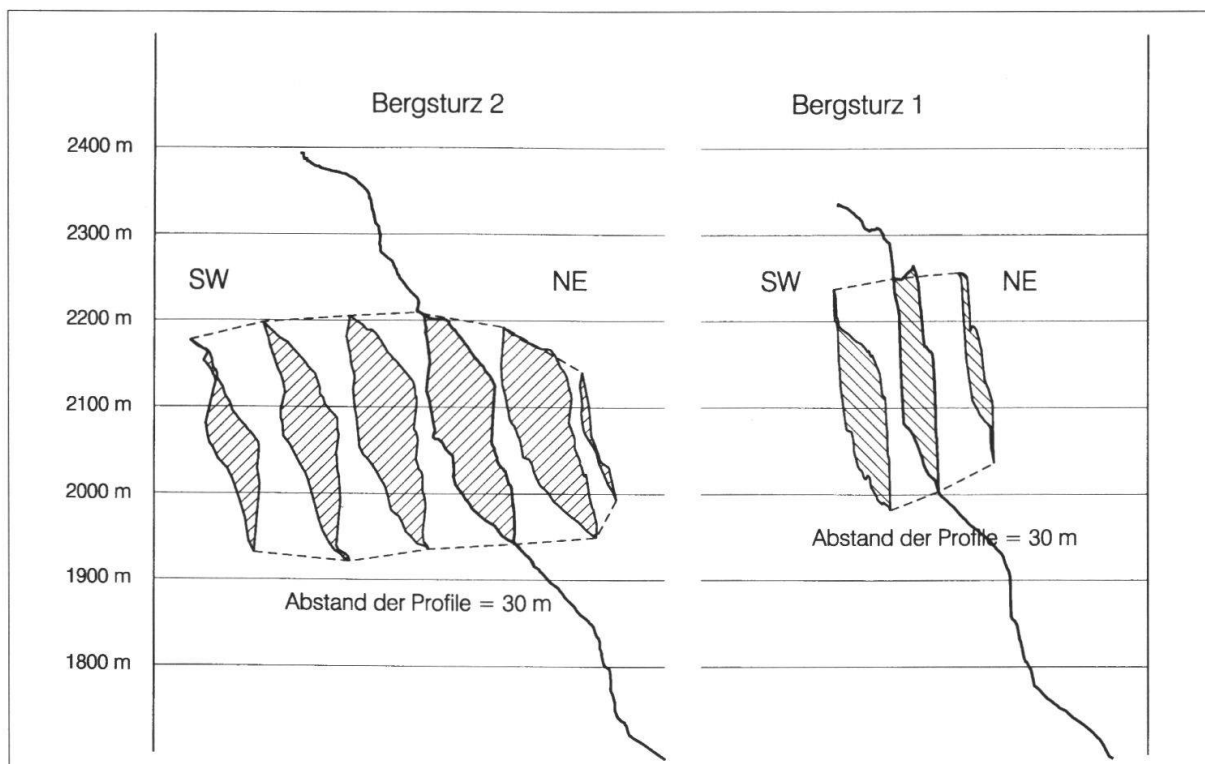


Fig. 5: Ausbruchkörper der Stürze 1 und 2.

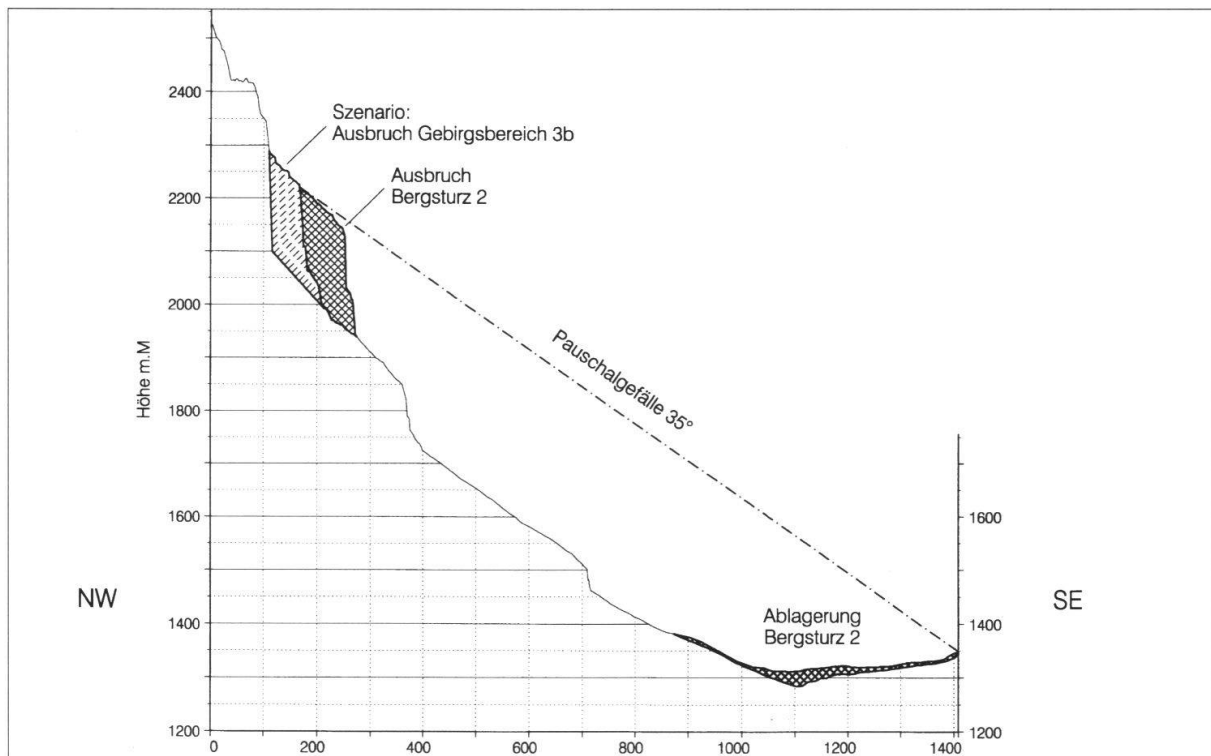


Fig. 6: Querprofil durch Ausbruch und Ablagerung von Bergsturz 2.

Die Ablagerung ist etwa 700 m breit und hat eine Kulmination von 1'317 m ü.M. Diese Überlaufhöhe liegt ca. 18 m über dem Becken der KLL und den Alphütten der Sandalp (Fig. 7).

6. Geologisches Modell, Mechanismen, Kausalität

Die Bergstürze sind vorwiegend geologisch bedingt, d.h. die Ausbrüche sind durch die markanten und ungünstig verlaufenden Kluftsyste m e vorgezeichnet. Der Abbruch der hohen und schmalen Felsscheiben erfolgte durch eine Kombination von Gleit- und Kippmechanismen.

Auslösendes Element war sehr wahrscheinlich ein sich auf der bergseitigen Kluft K_2 aufbauender hoher Wasserdruck (bis 250 m) infolge von einsickerndem Schmelzwasser. Der Abbruch dürfte sich über längere Zeit vorbereitet haben, indem das Gebirge durch frühere Wasserdrücke zunehmend geschwächt wurde. Mit Permafrost besteht nach Ansicht der Geologen kein unmittelbarer Zusammenhang.

7. Risikoüberlagerungen

7.1 Gefahrenpotentiale

Seeaufstau

Die jüngsten Bergstürze führten zu einem Unterbruch des Talabflusses bis auf Höhe 1'316.9 m. Die massgeblichen Rückstauszenarien sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

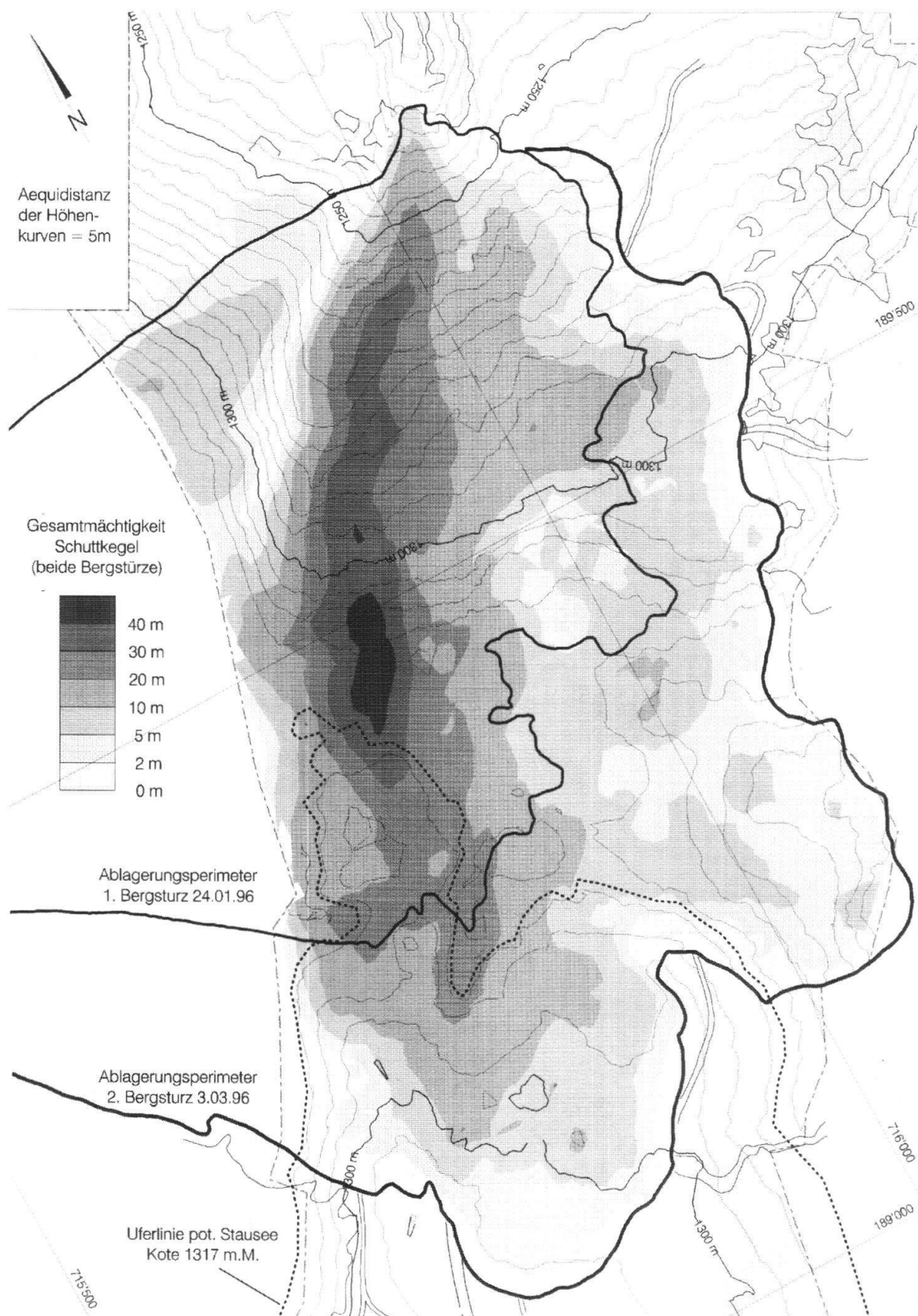


Fig. 7: Ablagerung der Bergstürze 1 und 2, Mächtigkeiten.

Tab. 3: Kritische Koten für den Seeaufstau

	<i>Seeaufstau gemäss VAW</i>		
	<i>Überlaufkote m.ü.M.</i>	<i>Volumen (Mio. m³)</i>	<i>Fläche (Tausend m²)</i>
Bergsturzablagerung	1316.9	5.5	350
Kote Überlauf Ausgleichsbecken KLL	1290.0	0.7	160
Überlaufkanal	1310	3.1	290

Die die Bergsturzablagerung durchsickernde Wassermenge ist unbedeutend. Bei Annahme einer Durchlässigkeit von 10^{-3} - 10^{-2} m/s ergeben sich bei einem möglichen Gefälle von 10 % Durchsickerungsmengen in der Grössenordnung von nur 0.05 - 0.5 m³/s. Diese Abschätzung wurde durch die Beobachtung bestätigt, dass bereits geringe Niederschläge zu einem Seeaufstau führen. Bei einem Starkregen von 101 mm im Juli 1996 (entsprechend einem ca. 5 - 10-jährigen Hochwasser) erreichte der See Kote 1'298 m ü.M. (Fig. 8) und überlief ins Ausgleichsbecken der KLL. Das 100-jährige Hochwasser bringt auf Höhe der Bergsturzablagerung eine Abflussspitze von ca. 60 m³/s.

Auch in niederschlagsfreien Zeiten bildet sich infolge der Bachzuflüsse ein See beschränkten Ausmasses.

Im Betrieb kann das Ablaufsystem der KLL 11 m³/s Wasser abführen. Unter diesen Bedingungen ist ein Seeaufstau bis Niveau 1'316.9 alle 100 Jahre denkbar. Bei



Fig. 8: Schuttkegel der Sandalpbergstürze von Westen. Seeaufstau infolge des Starkregens vom Juli 1996 (Photo Th. Rageth).

einem Ausfall des KLL-Ablaufstollens genügt dagegen ein 20-jähriges Hochwasser, um einen See auf das oben erwähnte Niveau aufzustauen.

Innere Erosion des Dammes

Wegen der guten Kornabstufung des Bergsturzmateri als und des geringen Gefälles der Sickerlinie in der Auffüllung ist innere Erosion sehr unwahrscheinlich.

Äussere Erosion auf der Luftseite des Dammes bei Überflutung

Diese Gefahr ist gross beim Überlaufen des Sees. Da die obersten ca. 5 m des Dammes nur schmal sind, könnte äussere Erosion zu einem katastrophalen Auslaufen der oberen Wasserschichten führen. Die Folge wäre eine Flutwelle von 700 m³/s mit verheerenden Auswirkungen im Tal.

Stein- und Blockschlag

Stein- und Blockschlag aus dem Ausbruchgebiet ist häufig. Deren Reichweite ist aber begrenzt und gefährdet den Zugang zur Sandalp nicht.

Weitere grosse Bergstürze

Durch ungünstige Trennflächenkonfiguration bedingt sind zwei weitere Abbruchszenarien denkbar:

3a: Felspartie südlich Bergsturz 2: ca. 0.9 Mio m³

3b: Felspartie bergseitig der Bergstürze 1 und 2: ca. 2 Mio m³

Die abstürzenden Massen könnten schlimmstenfalls in einen aufgestauten See einstossen (Geschwindigkeit ca. 30-50 m/s). Die dadurch erzeugte überschwappende Flutwelle hätte im Tal ähnlich verheerende Auswirkungen wie bei der luftseitigen Dammerosion.

7.2 Eintretenswahrscheinlichkeit

Aufgrund von Modellüberlegungen wurden folgende Eintretenswahrscheinlichkeiten abgeschätzt:

Tab. 4: Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeiten von Ereignissen

<i>Szenarium</i>	<i>Eintretenswahrscheinlichkeit innerhalb eines Jahres</i>
Voller Seeaufstau (Niveau 1317)	laut VAW 1% (= alle 100 Jahre)
Bergstürze aus 3a und 3b	<<5% (innerhalb der nächsten 20-100 Jahre denkbar)
Steinschlag aus Ausbruchgebiet (Blöcke < 5 t)	sehr häufig (täglich)
grosser Blockschlag (> 5 t)	häufig (jährlich mehrmals)
Zusammentreffen Felssturz und See (Niveau 1317)	< 0.05% * (alle 2000-10'000 Jahre)

* Die rechnerische Eintretenswahrscheinlichkeit für dieses Szenarium ergibt sich aus der Kombination von Seeaufstau und Bergsturz. Da ein Bergsturz grundsätzlich in allen Jahreszeiten auftreten kann, ergibt sich die theoretische Eintretenswahrscheinlichkeit der Kombination durch Multiplikation der Eintretenswahrscheinlichkeiten der beiden Einzelszenarien.

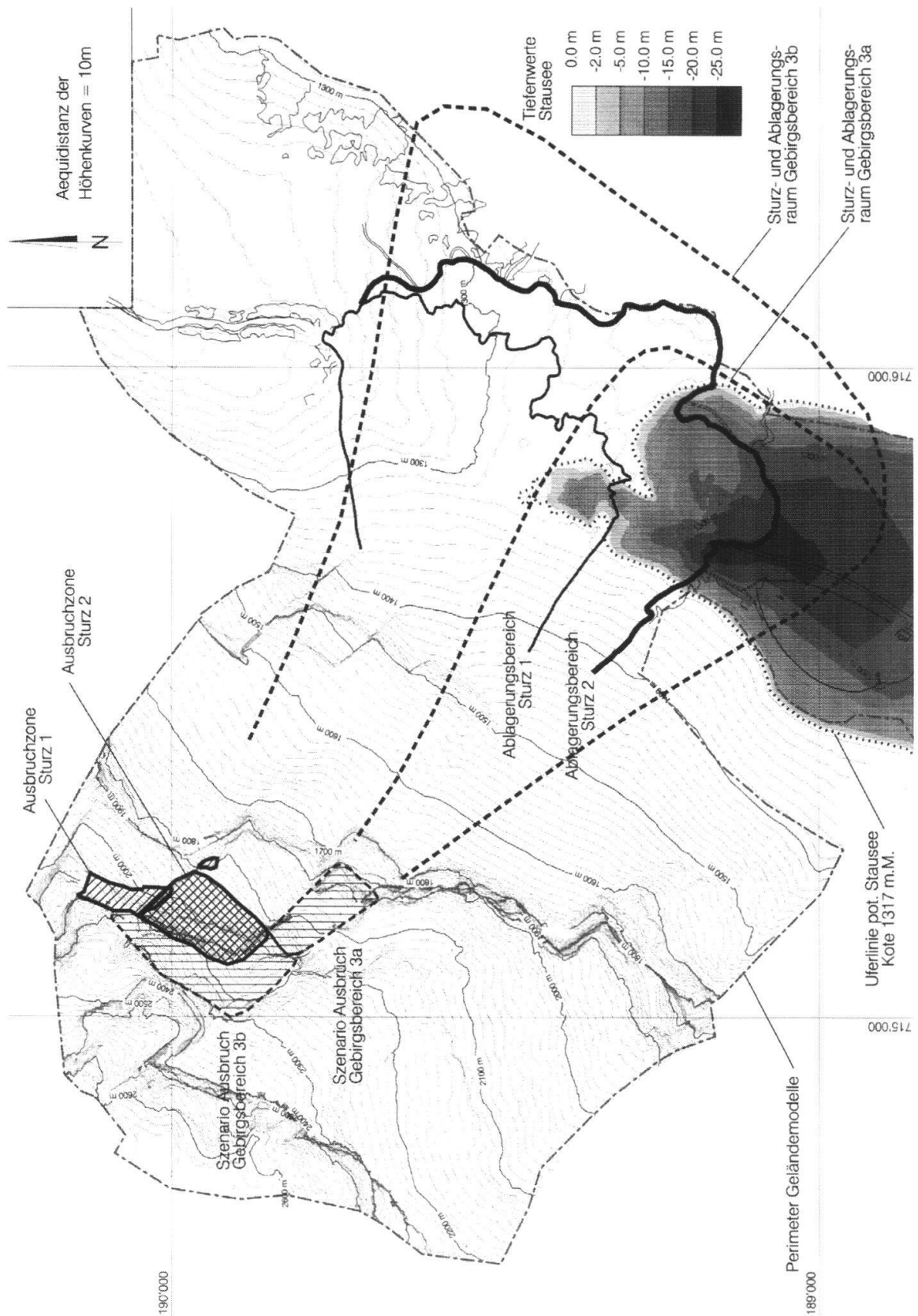


Fig. 9: Szenarium Seeaufstau und Wirkungsraum eines weiteren grossen Bergsturzes.

Tab. 5: Risikoabschätzungen

<i>Schaden</i>	<i>Eintretenswahrscheinlichkeit des Schadens</i>	<i>Risiko</i>
Beschädigung von Sachwerten infolge Seeaufstau	20 Jahre	beschränkt, da relativ geringe Sachschäden; Menschen und Tiere sind nicht direkt gefährdet
Gefährdung von einzelnen Menschen auf dem Zugang zur Sandalp durch Stein- und Blockschlag	nur innerhalb eines bestimmten Perimeters relevant. Zudem in den Bergen normale Gefahr	
Gefährdung von einzelnen Menschen auf dem Zugang zur Sandalp durch weitere grosse Bergstürze	Trefferwahrscheinlichkeit > 40-200 Jahre*	mittel
Seeaufstau Kote 1317 Flutwelle im Tal trifft viele Menschen und Sachwerte – durch luftseitige Erosion Dammkrone – durch Bergsturz in See	100 Jahre 2000 - 10'000 Jahre	sehr gross mittel

* Annahme ca. 10'000 Berggänger pro Jahr halten sich je ½ h im gefährdeten Gebiet auf

Die Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit von weiteren grossen Bergstürzen ist äusserst schwierig und nicht exakt bestimmbar. Trotzdem wird hier ein denkbarer Wert angegeben. Damit wird eine Risikoabschätzung ermöglicht, welche Voraussetzung für eine Diskussion von Risikoakzeptanz und Schutzziele ist.

7.3 Gefahrenmanagement

Das Gefahrenmanagement beinhaltet folgende Elemente:

- a) Bau eines Scheitelkanals Niveau 1310 zur Verhinderung einer Flutwelle infolge äusserer Erosion oder Überschwappen bei Bergsturz in See.
- b) Neue Wegführung des Zugangs zur Sandalp am Gegenhang
- c) Systematische Beobachtungen von
 - Seespiegelverhalten
 - Wasseraustritten talseitig des Dammes
 - Erosion Damm
 - Steinschlag aus Felssturzgebiet
- d) Jährliche Inspektion des Bergsturzgebietes durch Geologen

Die Einrichtung eines Frühwarndienstes mit Hilfe von Distanzmessungen wurde diskutiert, aber wegen des relativ geringen Risikos für Berggänger nicht realisiert.

Tab. 6: Auswirkungen verschiedener Massnahmen auf das bestehende Risiko
(realisierte Massnahme = schattiert)

Schaden	Risiko			
	Seeniveau 1317 m ü. M (heutiger Zustand)	Seeniveau 1310 m ü. M. (Scheitelkanal)	Seeniveau 1305 m ü. M. (Scheitelkanal)	Seeniveau < 1289 m.ü.M. (Entlastungs- stollen KLL)
Beschädigung von Sachwerten infolge Seeaufstau über Niveau 1299	beschränkt, relativ geringe Sachschäden (E = 20 Jahre)			sehr klein (E = unwahr- scheinlich)
Flutwelle im Tal infolge Erosion Luftseite Damm	sehr gross (E = 100 Jahre)	sehr klein (E = unwahrscheinlich)		
Flutwelle im Tal infolge Bergsturz in See	mittel (E = 2000 Jahre)			

Zu Forschungszwecken wurde im Auftrag der Landeshydrologie und- geologie in der Nähe der Ausbruchsstelle eine seismische Station errichtet. Es soll untersucht werden, ob mit der Mikroseismik Bewegungen von Felsmassen registriert und solche Aufzeichnungen als Frühwarnsystem eingesetzt werden können.

8. Wichtigste Aspekte des Fallbeispiels

Neben geologischen Feldaufnahmen war vor allem die detaillierte Photogrammetrie wichtigste Grundlage zur Erarbeitung des geologischen Modells. Dieses bildet seinerseits die Basis für die Überlegungen betreffend

- Kausalität
- Risiken weiterer Ereignisse
- Massnahmen.

Kennzeichnend war die enge Zusammenarbeit verschiedener Spezialisten (Vermesser, Hydrologe, Wasserbauer, Geologe).

Von der Seite der Geologen wurde versucht, eine möglichst transparente und nachvollziehbare Risikobewertung vorzunehmen. Sie ist die Grundlage für die Entscheide der Behörden.

Fallbeispiel Nr. 9:

Der Felssturz von Amden vom 21. Januar 1974

PETER HALDIMANN*

Zusammenfassung:

Am frühen Morgen des 21. Januar 1974 fand am Schwarzberg über der Strasse Weesen–Amden (SG) ein Felssturz statt, welcher vorher und nachher die Öffentlichkeit wegen der Gefährdung der Strasse und der Anwohner des Walenseeufers stark beschäftigte. Dank der vorangegangenen, länger dauernden Beobachtungsphase und umfassenden Vorsorgemassnahmen waren bei diesem Felssturz weder Menschenopfer noch allzu grosse Schäden an Infrastrukturen zu beklagen.

1. Ausgangslage und Problemstellung

Einheimische Bauern beobachteten im Sommer 1972 in einem schuttbedeckten Nackentälchen am Schwarzberg (Koord. 727'400/222'800), dass sich am Fusse einer Felswand ein unverfärbter Streifen frischen Gesteins abzuzeichnen begann, d.h. dass sich der an den Fels angrenzende Schutt nach unten bewegte. Beunruhigt meldeten sie ihre Beobachtung der Gemeindebehörde von Amden, welche ihrerseits geologische Experten zuzog.

Die Fragestellung an den Geologen lautete:

- Wie gross ist die Gefahr eines Felssturzes?
- Welche Gesteinskubaturen können abstürzen?
- Wann kommt es zum Absturz?
- Wer ist gefährdet?
- Welche Vorkehrungen sind möglich und angezeigt?

In der Folge wurde das Gefahrengebiet geologisch kartiert. Die Bewegungen im Nackentälchen wurden systematisch überwacht, und es wurden umfassende Vorbereitungen für das Gefahrenmanagement getroffen.

2. Geologische Situation

Der Schwarzberg westlich Amden (Fig. 1) wird von oben nach unten von folgenden Schichten der Unteren Kreide aufgebaut (Fig. 2):

* Dr. Heinrich Jäckli AG, Limmattalstrasse 289, 8049 Zürich



Fig. 1:

Schwarzberg bei Amden von Süden: Felswände des Schrattenkalkes mit Umgrenzung der abgestürzten Felspartie.

- Oberer Schrattenkalk, massig, ca. 95 m mächtig
- Unterer Schrattenkalk, massig, im mittleren und obersten Teil gebankt, ca. 135 m mächtig,
- Drusbergschichten, mergelig, meist von Vegetation bedeckt, ca. 35 m mächtig,
- Kieselkalk einschliesslich Altmannschichten, im Steinbruch unterhalb der Absturzstelle abgebaut, rund 140 m,
- Valanginien-Kalk, ca. 80 m,
- Valanginien-Mergel, ca. 30 m.

Im Gebiet von Amden beschreiben diese Gesteine eine weitgespannte Schichtmulde, die sog. Amdenermulde, deren Achse mit etwa 10° nach SW einfällt. Beim Schafbett am Schwarzberg fallen die Schichten mit $20\text{--}30^\circ$ gegen SE, d.h. gegen den Walensee ein, was die Stabilität der Felsflanke verringert und Bewegungen seewärts erleichtert (Fig. 2).

Die Schichten werden schliesslich durch steilstehende Brüche und Verwerfungen intensiv zerhackt, welche ungefähr NW-SE streichen. Die bergseitige Felswand im Schafbett, entlang welcher sich die bewegten Massen gelöst haben, wird beispielsweise von einer solchen Verwerfungsfläche gebildet und stellt die Trennfuge zwischen stabilem und bewegtem Fels dar.

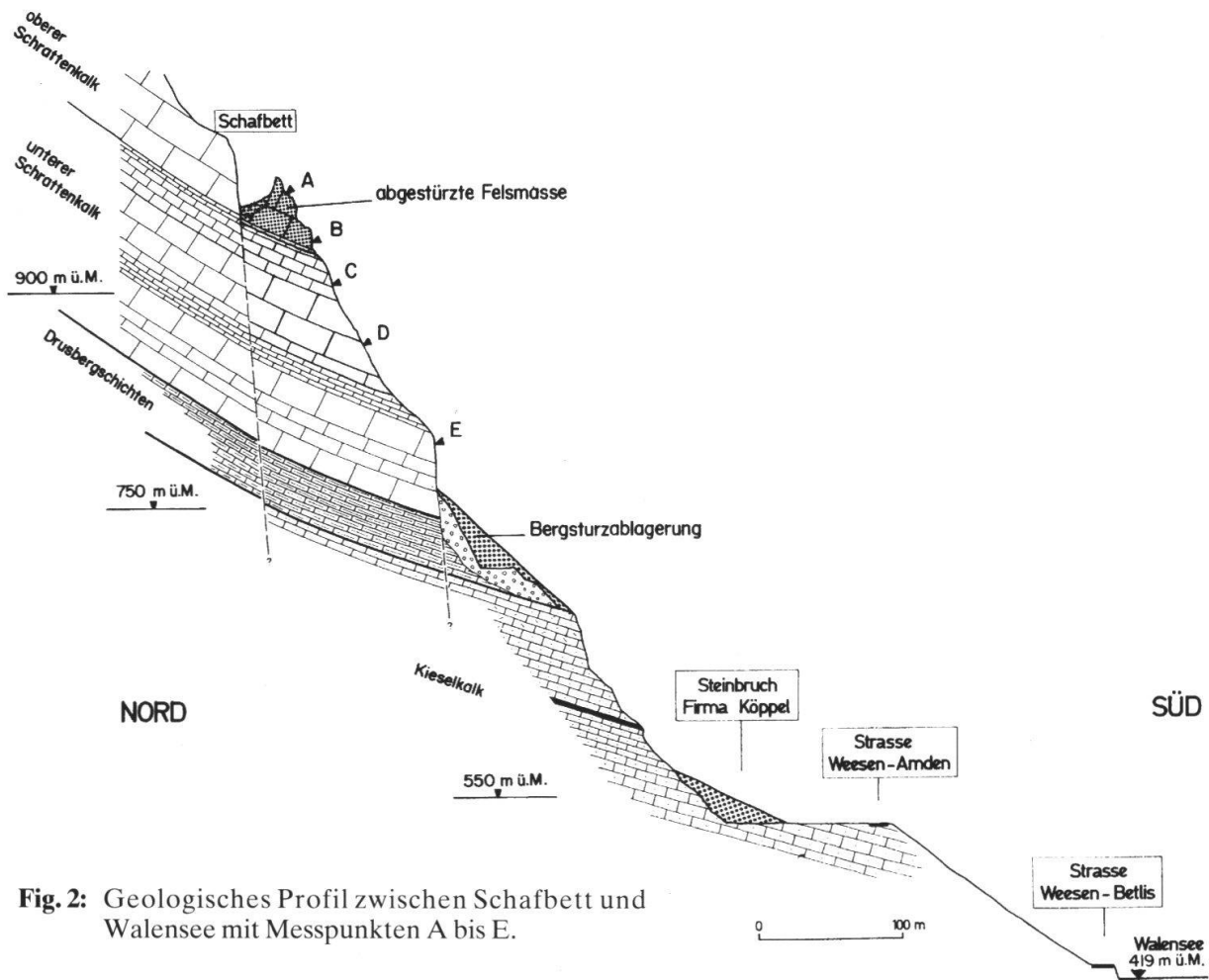


Fig. 2: Geologisches Profil zwischen Schafbett und Walensee mit Messpunkten A bis E.

3. Durchgeführte Untersuchungen

Im besagten Nackentälchen wurden sofort nach der ersten Feststellung von Bewegungen im Oktober 1972 auf einem 200 m langen Abschnitt 8 Profile mit Längen zwischen 15 und 65 m parallel zur Bewegungsrichtung gelegt und mit Bolzen markiert. Die ersten Kontrollmessungen dieser Bolzen erfolgten mit dem Stahlmessband von der stabilen, bergseitigen Felswand aus. Mit der Zeit wurden ausgewählte Messbolzen geodätisch vermessen, um Aufschluss über die horizontale und die vertikale Bewegungskomponente zu erhalten. Ferner wurden an zwei geeigneten Stellen verzugsfreie Invardrähte installiert.

Um eine dauernde Fernüberwachung der Bewegungen zu ermöglichen, wurden Ende Januar 1973 zusätzlich noch zwei elektronische Felsspione von 15 m Länge eingerichtet, welche Bewegungen via Draht nach Weesen meldeten. Leider war diese Anlage etwas anfällig auf atmosphärische Störungen (z.B. Gewitter) und fiel deshalb zeitweise aus.

Zur Erfassung und Begrenzung der Bewegungen in tieferliegenden Felspartien wurden in der Falllinie von den Felsköpfen im oberen Schrattenkalk bis zur Felswand des unteren Schrattenkalkes (Fig. 2) 5 Messpunkte angebracht und von ei-

nem Standort nördlich von Weesen durch Winkelmessung optisch auf ihre Vertikal- und Horizontalverschiebung kontrolliert. Diese differenzierten Bewegungskontrollen waren insbesondere für die Abschätzung der Kubatur der bewegten Felsmasse von grosser Wichtigkeit.

4. Untersuchungsergebnisse

Nach Beginn der Bewegungsmessungen im Oktober 1972 blieben die Horizontalbewegungen bis Ende November 1972 mit 2–3 mm pro Woche gering (Fig. 3).

Rund 10 Tage nach den starken Niederschlägen Ende November 1972 (in Weesen rund 300 mm) zeigte sich eine erste Beschleunigung aller Kontrollpunkte im Schafbett mit Geschwindigkeiten von 15–25 mm pro Woche horizontal und etwa 4–7 mm pro Woche vertikal.

Die Verminderung der Horizontalbewegung von den höheren zu den tieferliegenden Messpunkten A bis E in den Felswänden zeigte eindeutig, dass die aufgelockerte Felsmasse neben differentiellen Gleitbewegungen auf Schichtflächen eine ausgeprägte Kippbewegung nach aussen ausführte. Gestützt auf die Bewegungsmessungen musste die ursprünglich auf rund 100'000 m³ geschätzte sich bewegende Felskubatur eher noch höher geschätzt werden.

Glücklicherweise bewirkte die trockene Frostperiode im Hochwinter 1973 eine leichte Verlangsamung, die akute Gefahr schien vom Januar an gebannt, doch war für die folgende Schneeschmelzperiode eine erhöhte Gefährdung vorauszusehen.

Die Schneeschmelze von März bis Mai und starke Niederschläge im Juli 1973 brachten dann auch die erwartete Beschleunigung, welche ungefähr Mitte März einsetzte und bis Anfang August anhielt. Die dabei gemessenen Bewegungen überschritten jene vom Dezember 1972 um das Doppelte und erreichten 20–30 mm pro Woche.

Ähnlich wie ein Jahr zuvor lösten auch im Spätherbst 1973 stärkere Niederschläge eine dritte Beschleunigungsphase aus. Im Gegensatz zu früher klang aber diesmal die Beschleunigung nicht bald nach dem Einsetzen trockenen Frostwetters wieder ab, sondern akzentuierte sich ab Ende November zusehends von Tag zu Tag. In der letzten Dezemberwoche betrugen die Bewegungen 100–160 mm pro Woche, Mitte Januar bereits das Doppelte.

Die Geschwindigkeiten vergrösserten sich also progressiv. Seit Herbst 1972 bis zum 21. Januar 1974 hatte sich der Kontrollpunkt im Schafbett um rund 3 m verschoben, davon allein in den letzten 7 Tagen 1.2 m. Ein Felsabsturz war nicht mehr aufzuhalten, ein solcher musste nach dem 17. Januar stündlich erwartet werden. Der Felssturz ereignete sich schliesslich am 21. Januar 1974 in der Morgenfrühe, als nach einem anfänglich intensiven Steinschlag rund 60'000 m³ Gestein abstürzten.

5. Geologisches Modell, Mechanismen, Kausalität

Die Auswertung sämtlicher Messdaten, der geologische Befund aufgrund von Feldbegehungen und geologische Profilkonstruktionen ergeben folgendes Bild für die Bewegungsvorgänge vor und während des Felssturzes:

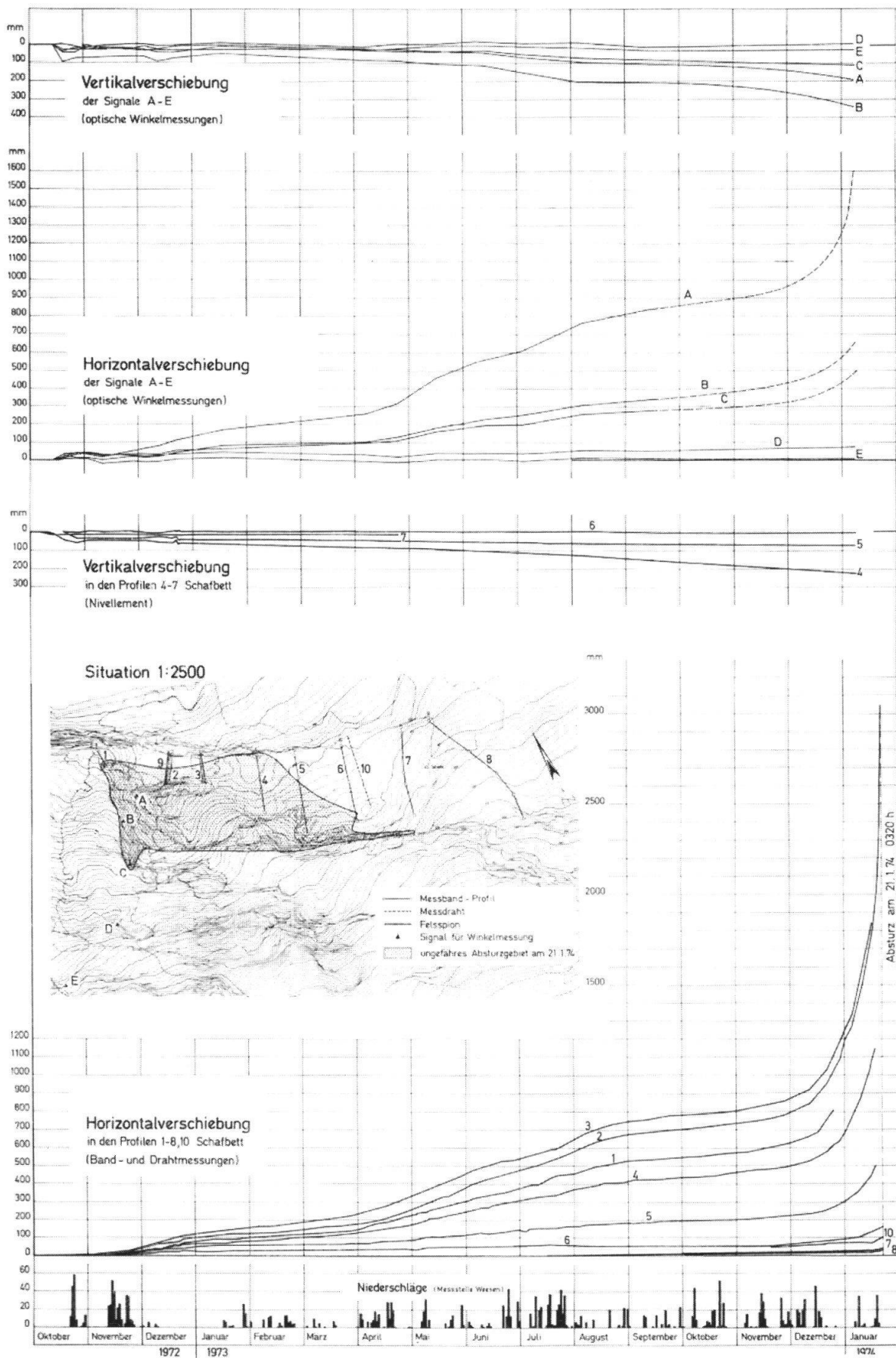


Fig. 3: Ganglinien der Bewegungen: Messpunkte A bis E (vgl. Fig. 2) und Profile 1 bis 10 vom Oktober 1972 bis Januar 1974.

Kippbewegung längs Klüften und Spalten

Der obere Schrattenkalk war durch zahlreiche senkrecht zur Schichtung stehende, breite Klüfte und Spalten sehr ausgeprägt in einzelne Felsscheiben aufgeteilt. Diese Felsscheiben führten eine Kippbewegung Richtung Walensee aus. Die Verschiebungsmessungen im Nackentälchen zeigten, dass die äussersten Felsscheiben am stärksten nach aussen kippten. Der gesamte Kippvorgang kann bildhaft mit einem sich aufblätternden Buch erklärt werden.

Gleitbewegungen längs Schichtflächen

Die basale Abscherungsfläche, längs welcher der Felssturz schliesslich erfolgte, liegt ungefähr auf der Grenze zwischen dem unteren und dem oberen Schrattenkalk, also in einer Zone, wo die Kalkschichten dünn gebankt sind. Kurz vor dem Absturz zeichneten sich grössere Horizontal- und Vertikalverschiebungen des Messpunktes A ab (Fig. 3), d.h. längs dieser mit 20–25° gegen den Walensee geneigten Schichtfläche fanden Gleitbewegungen statt.

Der Absturzvorgang

Da der Felsabsturz in der Nacht erfolgte, kennt man den genauen Absturzvorgang nicht. Aufgrund der geologischen Situation und der langen Zeitdauer des Absturzes von 17 Minuten ist jedoch anzunehmen, dass die durch die Klüfte voneinander abgetrennten Felsscheiben nacheinander nach aussen kippten und auf der steilen Sturzbahn zum unterliegenden Steinbruchareal vollständig zertrümmert wurden.

Das Pauschalgefälle zwischen Abrissgebiet und Ablagerungsgebiet in der Steinbruchsohle erreichte den selten anzutreffenden hohen Wert von 50–55°. Die Schuttmasse blieb im Ablagerungsraum in relativ konzentrierter Form liegen, ohne dass springende oder ausrollende Steine einen weiteren Bereich in Mitleidenschaft gezogen hätten. Dies ist nur erklärbar durch die beiden Umstände, dass der Abbruch nicht konzentriert en bloc, sondern zeitlich weit gedehnt, als langanhaltende «Felslawine» erfolgte, und dass die künstlich geschaffene, horizontale Steinbruchsohle als bremsender Puffer wirkte.

6. Risikoanalyse

Durch den Felssturz am Schwarzberg war in erster Linie der unterliegende Steinbruch an der Strasse Weesen–Amden und die Strasse selbst gefährdet.

Von früheren Felsstürzen in den Walensee (und auch in den Vierwaldstättersee) war bekannt, dass dabei unerwartet hohe Flutwellen die benachbarten und gegenüberliegenden Uferstreifen heimgesucht hatten. Falls bei Amden der Felssturz en bloc niedergefahren wäre und den Walensee zudem bei sommerlichem Hochwasserstand erreicht hätte, wäre eine Überflutung der nächsten Uferpartien zu erwarten gewesen. Die VAW untersuchte deshalb an einem Modell die entstehenden Flutwellen bei verschiedener Grösse des Bergsturzes, und das Baudepartement des Kantons St. Gallen erstellte mit Hilfe dieser Daten eine Überflutungskarte für verschiedene Wasserstände des Sees.

7. Gefahrenmanagement

Vom 19. Januar 1973 an wurde im unterliegenden Steinbruch jedes Sprengen verboten. Für die Sperrung der Strasse Weesen–Amden und Weesen–Betlis wurden Vorbereitungen getroffen, für die Uferanwohner in Weesen wurde die Evakuierung vorbereitet. Ferner wurden der Campingplatz und der Schifflanlegeplatz im glarnerischen Uferstreifen zwischen Weesen und der Linthmündung geschlossen.

Nach der Beschleunigung der Bewegungen im Sommer 1973 wurde der Steinschlag Tag und Nacht überwacht. Die Strasse Weesen–Amden wurde mit Verkehrssampeln versehen, die aufgrund eines akustischen Sensors bei jedem stärkeren Steinschlaggeräusch auf Rot geschaltet wurden.

Durch diese Massnahmen und ihre Publikation in der Presse erlitt Amden als Touristen- und Ferienort im Frühling und Frühsommer 1973 empfindliche wirtschaftliche Einbussen. Viele Fremde befürchteten, dort isoliert oder sogar vom Felssturz erschlagen zu werden und mieden Amden. Erst als im Herbst mit der Verminderung der Bewegungsgeschwindigkeiten auch die Vorsichtsmassnahmen etwas gelockert wurden, erholte sich der Fremdenverkehr wieder.

Um die alle Beteiligten belastende Ungewissheit des Zeitpunkt eines natürlichen Felssturzes zu beseitigen, wurde im Herbst 1973 geprüft, die absturzträchtigen Felspartien zu sprengen. Es bestand die Hoffnung, dass durch den gezielten Abbau der am stärksten bewegten Felsmasse die übrigen sich langsamer bewegenden Felspartien sich wieder beruhigen würden. Doch sollte vermieden werden, dass dabei die Strassen zerstört und im See eine Flutwelle verursacht würde. Deshalb sollte der Spreng-Abbau in kleinen Portionen erfolgen und am Südende des Steinbruches ein künstlicher Wall errichtet werden, hinter welchem der grösste Teil der abgesprengten Felsmasse hätte aufgehalten werden sollen.

Für solche Sicherheitssprengungen und die damit verbundenen Vorsorgemassnahmen an Infrastrukturbauten sah der Regierungsrat des Kantons St. Gallen im November 1973 einen Betrag von rund Fr. 4.5 Mio. vor.

Nachdem sich die Bewegungen im Winter 1973/74 wieder massiv beschleunigten, wurde Alarmstufe 2 (erhöhte Gefahr) verfügt. Die Strasse Weesen–Amden wurde nachts gesperrt und durfte tagsüber nur im abwechselnden Einbahnverkehr befahren werden, um Kreuzungen im Gefahrenbereich zu vermeiden. Am 17. Januar 1974 wurde die Strasse ganz gesperrt und Amden nur noch mit Helikoptern versorgt. In Weesen wurde ein Krisenstab eingerichtet. Zwei Dutzend Geologiestudenten der ETH Zürich hatten an 5 Stellen Filmkameras installiert, welche jederzeit bereit standen, das Ereignis zu filmen.

Nach einer Periode mit intensivem Steinschlag stürzte schliesslich der Felssturz im Umfang von etwa 60'000 m³ in der Morgenfrühe des 21. Januar 1974 ab, ohne dass er auf Film festgehalten werden konnte. Mit dem Absturz erübrigte sich auch die vorgesehene Sprengung und der Einsatz des dafür vorgesehenen Kredites.

Nach dem Absturz waren im Abrissgebiet noch verschiedene mittelgrosse Sprengungen erforderlich, um aufgelockerte Partien zum Absturz zu bringen, und es wurde ein Felskomplex von 5'000 m³ mit einer Grosssprengung in Richtung Steinbruch zum Absturz gebracht. Am 14. Februar 1974 konnten die Strassen Wee-

sen–Amden und Weesen–Betlis wieder für den Verkehr freigegeben werden. Insgesamt wurden nach dem Felssturz noch rund 25'000 m³ Felsmaterial abgesprengt.

8. Wichtige Aspekte des Fallbeispiels

Am Beispiel des Felssturzes von Amden kann gezeigt werden, wie durch sorgfältige geologische Beobachtungen in Verbindung mit einer intensiven Überwachung und einer laufend aktualisierten Analyse der Bewegungsabläufe die Prognostizierbarkeit eines grösseren Ereignisses ganz wesentlich verbessert werden kann. Im vorliegenden Fall konnte sowohl die abstürzende Kubatur als auch der Zeitpunkt des Ereignisses relativ präzise vorausgesagt werden.

Voraussetzungen für die Zuverlässigkeit dieser Prognose waren

- eine exakte Aufnahme und Interpretation der geologischen Verhältnisse,
- richtig angeordnete Bewegungsmessungen, mit der Situation angepassten Methoden und Messintervallen,
- eine laufend aktualisierte Analyse der Bewegungsabläufe,
- eine immer wieder neue Beurteilung des Risikos mit Anpassung des Gefahrenmanagements.

Das Gefahrenmanagement war zu jedem Zeitpunkt angemessen, verhältnismässig und wirkungsvoll. Dies erforderte ein interdisziplinäres Zusammenwirken unterschiedlicher Fachleute, namentlich Geologen, Vermessungsingenieuren, Sprengfachleuten und Politikern, welches im vorliegenden Fall ausgezeichnet gespielt hat.

Anmerkung

Der vorliegende Beitrag ist eine überarbeitete Kurzfassung eines Artikels von H. Jäckli und Th. Kempf, welcher 1975 in der Schweizerischen Bauzeitung No. 93.25 erschienen war.

Caso rappresentativo no. 10:

Lo slittamento di Campo Vallemaggia

LUCA BONZANIGO*

Riassunto

Lo slittamento di Campo Vallemaggia è eccezionale per le sue dimensioni e la sua peculiarità idrogeologica. Il suo meccanismo è difficilmente percettibile sulla base di concetti geotecnici classici. La presenza di pressioni artesiane e il suo comportamento pulsante, ne fanno uno degli oggetti di studio di geologia applicata più affascinante della Svizzera, forse dell'Europa. Da oltre un secolo, i geologi più illustri sono rimasti interdetti di fronte al fenomeno, cercandone le chiavi. Questo articolo non pretende di dare spiegazioni definitive, esercizio che la sua natura non consente, bensì di illustrare succintamente il risultato degli studi recenti, le interpretazioni che ne sono state ricavate, e la strategia di risanamento adottata. Gli aspetti geologici sono di fondamentale importanza.

1. Inquadramento, eventi

Il nome di Campo Vallemaggia è noto ai geologi di tutta la Svizzera e di gran parte dell'Europa e del mondo, per la presenza di un fenomeno di instabilità di pendio tra i più grandi conosciuti, oltre che per il suo complesso e curioso meccanismo. È situato a circa 25 km a NW del delta del fiume Maggia, che sbocca nel Lago Maggiore presso Locarno e Ascona. Si tratta di una massa di circa un miliardo di metri cubi separata in più "zolle" distinte (vedi figura 1), che si è mossa in media di qualche centimetro all'anno, e a scadenze più o meno regolari, accelerando durante circa un mese fino ad alcuni centimetri al giorno. Dalle misurazioni effettuate già dalla fine del secolo scorso risulta una traslazione orizzontale complessiva di circa trenta metri in cent'anni.

In conseguenza del movimento, una massiccia erosione al piede dovuta al fiume Rovana e al suo carattere torrentizio asporta decine di migliaia di metri cubi di materiale verso valle, producendo uno squarcio alto 150 m e largo 4 km. Il suo carattere spettacolare e la sua dimensione ispira molta soggezione (vedi figura 1), per cui al profano può apparire ovvio che l'erosione del fiume è la causa di tutti i danni. Eppure già Albert Heim nel 1892 aveva percepito che le cause erano interne, e che andavano cercate nella presenza di acqua in pressione nello slittamento e alla sua base.

* Viale Stazione 16a, 6501 Bellinzona



Fig. 1: Veduta aerea dello slittamento di Campo Vallemaggia. Si nota il carattere isoclinale della roccia in posto, e la struttura a zolle della massa in movimento.

Le indagini svolte sono numerose e hanno permesso di inquadrare il fenomeno dal punto di vista geometrico e geodinamico. Quelle più recenti erano inserite nel progetto e la costruzione del cunicolo di drenaggio (figura 2), realizzato tra il 1993 e il 1996. Quest'opera inusuale è stata finanziata dal cantone Ticino con l'aiuto della Confederazione. Il progetto e la direzione lavori sono stati assicurati dallo studio di ingegneria Lombardi SA, con la nostra consulenza geologica.

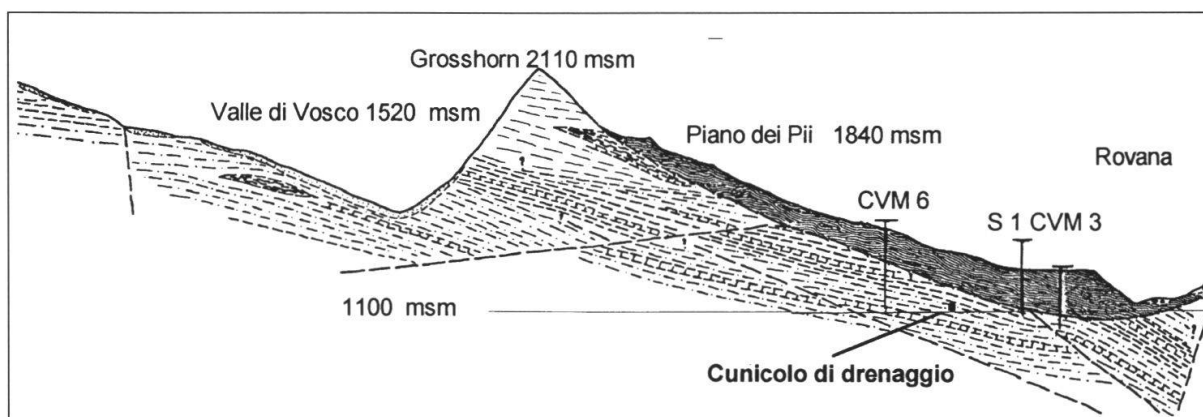


Fig. 2: Sezione geologiche longitudinale dello slittamento con indicata la posizione del cunicolo di drenaggio.

Le caratteristiche più rilevanti di questo fenomeno, a parte le sue dimensioni, sono:

- la presenza di elevate pressioni artesiane nella massa in movimento e nella roccia in posto sottostante,
- il carattere pulsante dei movimenti.

Si osserva infatti che a scadenze più o meno regolari, durante o dopo periodi di prolungate e intense precipitazioni, lo slittamento accelera (vedi figura 3).

La relazione tra movimento e precipitazioni non è ne proporzionale ne diretta. Si osserva un effetto di ritardo e un effetto “soglia”. Si ricava infatti dall’analisi del comportamento dello slittamento che le accelerazioni avvengono dopo un periodo di “preparazione” che dura 10-20 anni, durante il quale eventi meteorologici importanti non hanno grandi effetti sul movimento.

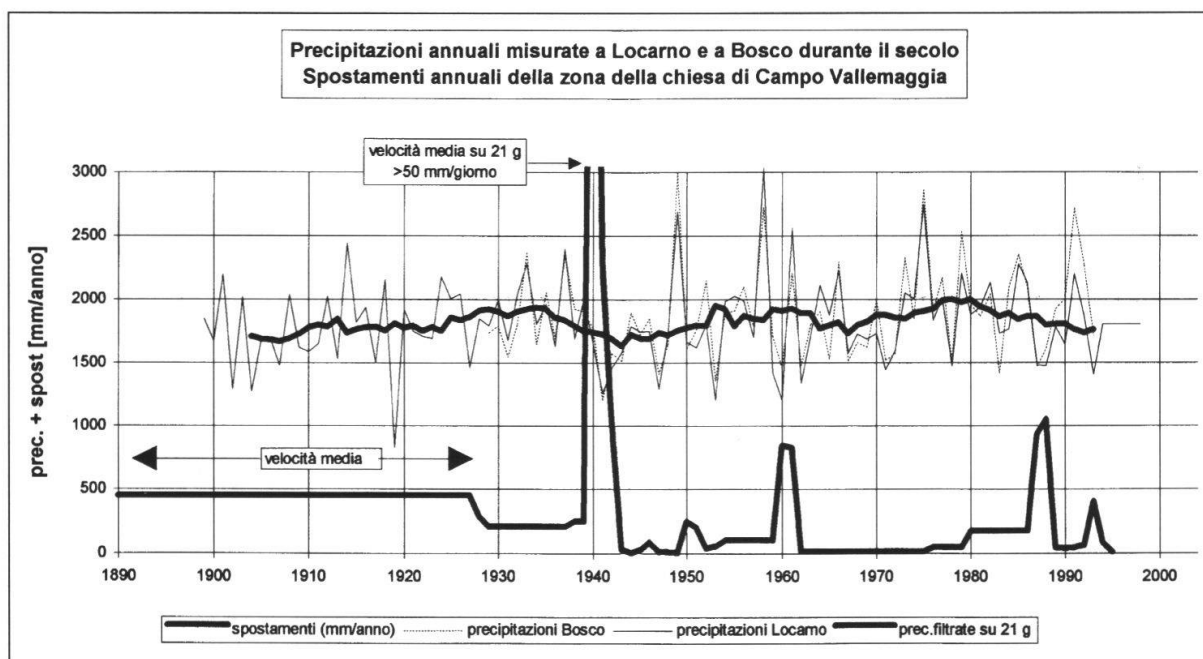


Fig. 3: Grafico degli spostamenti medi presso il fronte dello slittamento in relazione alle precipitazioni. Si osserva che il movimento reagisce con un certo ritardo e in maniera non omogenea alle precipitazioni. È ben visibile l’effetto pulsante.

2. Situazione geologica

Lo slittamento di Campo Vallemaggia è situato nelle coltri di ricoprimento penniniche metamorfiche, più precisamente al contatto tra la “zona di Bosco” e un diverticolo della coltre di Antigorio indicata come “serie di Orsalia”. La massa in movimento è composta da pannelli di roccia più o meno alterata, a dipendenza della sua natura mineralogica e tettonica. Sono presenti rocce cristalline e molto differenziate, con una potente intercalazione di anfiboliti localmente accompagnate da metacarbonati. I pannelli, di dimensioni ettometriche e con decine di metri di spessore, sono scivolati l’uno sull’altro lungo fasce di scorrimento cagionate dalla differenziazione litologica e dal grado di alterazione. La presenza di faglie ha determinato la suddivisione dello slittamento in zolle. Questo processo iniziò verosimilmente in un periodo interglaciale, senza che si possa indicare con esattezza quale.

3. Metodo di lavoro e indagini effettuate

Il fenomeno è stato oggetto di innumerevoli studi. Come accennato sopra, già Albert Heim e altri illustri studiosi lo avevano affrontato fin dal secolo scorso, individuando l'importanza dell'acqua interna. Studi di vario genere si sono in seguito susseguiti, condizionati dalla volontà politica, a sua volta proporzionale ai danni e allo stato delle finanze pubbliche. Nel 1962 vengono eseguiti i primi sondaggi meccanici fino a profondità di circa 200m, che confermano la presenza dell'artesiano. Sono pure state effettuate misurazioni geodetiche a intervalli assai variabili, oltre che ricerche di carattere idrologico. Dai vari progetti presentati trapela l'incertezza e il sentimento di impotenza di fronte a un comportamento della natura che sembra superare l'intendimento umano. Un cunicolo di drenaggio e una galleria di deviazione erano già stati consigliati negli anni sessanta.

A partire dal 1984, l'autore di questo articolo, dopo aver raccolto tutte le informazioni esistenti, ha eseguito una cartografia geologica di dettaglio mirata alla geotecnica e l'idrogeologia particolare dell'oggetto. Ne ricavò la convinzione che la causa dell'instabilità era veramente la sovrappressione artesianiana e non l'erosione al piede, che risulta esserne la conseguenza.

Nell'ambito di nuovi e ambiziosi progetti di risanamento, è stato possibile allestire una vasta campagna di indagini, che ha compreso (vedi cartina, figura 4).

- Sondaggi a distruzione fino a circa 200m di profondità.
- Sondaggi con recupero di campioni effettuati con carotiere triplo e fluidi polimerici (Wireline), fino a profondità comprese tra 200 e 330m.
- Posa di celle di misurazione piezometriche a varie quote nei fori di sondaggio.
- Posa di guide inclinometriche nei medesimi fori.
- Numerose linee di sondaggio sismico a rifrazione.
- Una linea di sondaggio sismico a riflessione (nell'ambito del PNR20).
- Analisi idrochimiche e isotopiche delle acque di sorgente e degli artesiani.
- Misurazioni geodetiche, automatiche e giornaliere in alcuni punti.

I sondaggi con recupero di campione e buona parte della sismica era integrata nelle indagini relative al progetto di cunicolo di drenaggio poi realizzato. In seguito sono ancora state effettuate analisi idrochimiche e isotopiche sulle acque captate dal cunicolo, che complessivamente rappresentano una portata di circa 50 l/s. È ancora in corso (1997), assieme all'osservazione degli effetti sul movimento, quello dell'evoluzione delle pressioni e delle portate, oltre che delle caratteristiche idrochimiche e isotopiche delle acque del drenaggio.

4. Risultati delle indagini

I sondaggi meccanici hanno permesso di determinare in varie posizioni l'elevato spessore della massa in movimento e la sua natura. Si ottennero campioni di roccia molto alterata per argillificazione, che ha però mantenuto la propria struttura e il posizionamento litologico. A quindi potuto essere dimostrato che non si tratta di materiale "franato", né di deposito glaciale (morenico), bensì di roccia spostatasi in

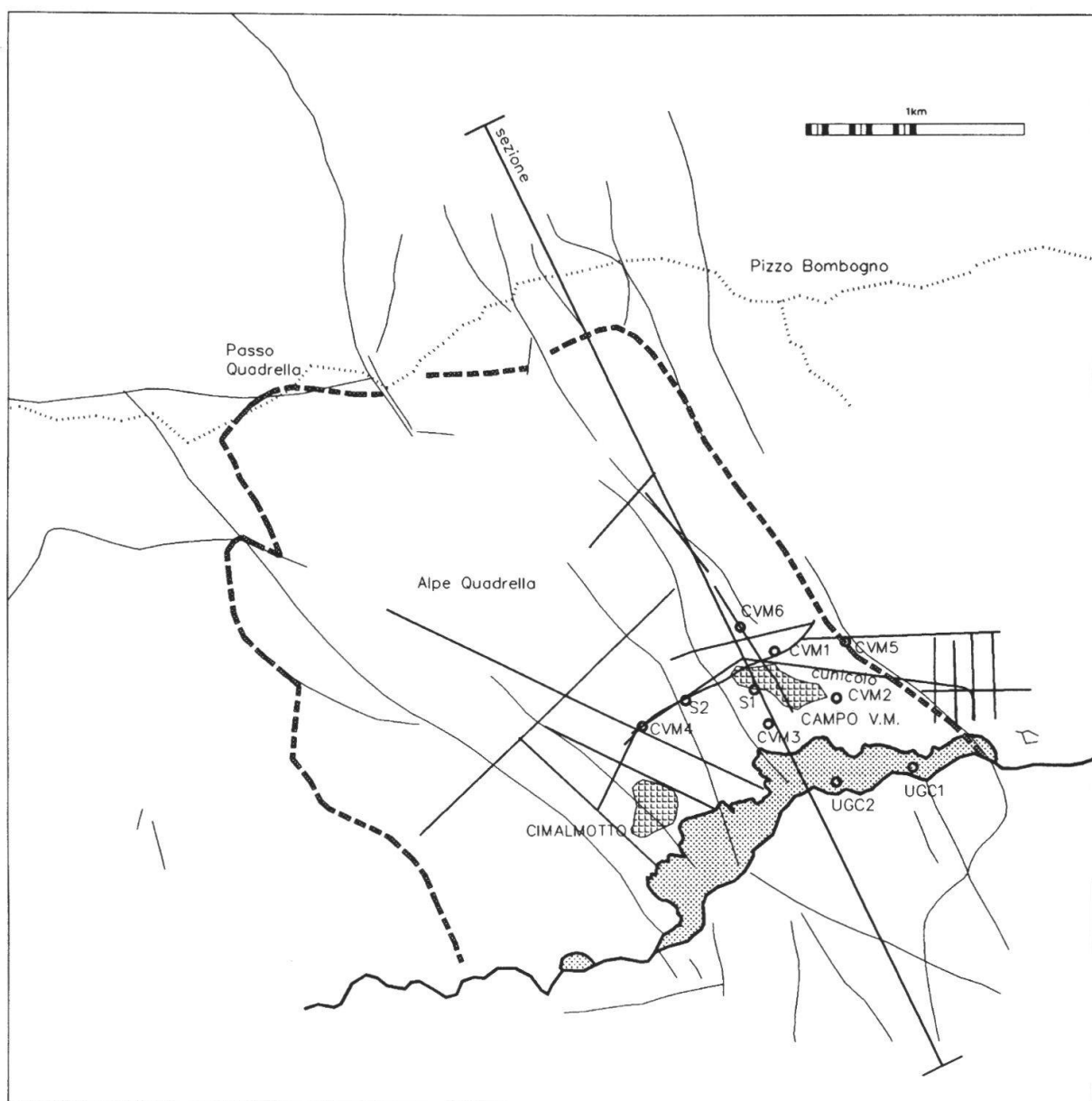


Fig. 4: Situazione generale e limite dello slittamento di Campo Vallemaggia, con indicata la posizione dei sondaggi meccanici e dei profili sismici effettuati.

pannelli isolati. Che separano questi pannelli non sono superfici di scorrimento ben definite, ma piuttosto fasce, “zone” all’interno delle quali avviene la deformazione. Queste fasce sono di spessore variabile nello spazio, e verosimilmente nel tempo, a dipendenza della reologia del meccanismo (vedi interpretazione più avanti).

Le pressioni artesiane incontrate (fino a circa 12 bar) corrispondono in maniera assai omogenea a una quota piezometrica a circa 1450 msm. L’analisi degli isotopi stabili delle acque delle sorgenti profonde e degli artesiani mostrano pure una quota di ricarica omogenea, situata tra 1500 e 1600 msm. Per contro, la mineralizzazione varia notevolmente da un punto di prelievo all’altro. Anche le acque captate nel cunicolo di drenaggio, pur essendo state incontrate a pressione simile, da un punto all’altro mostrano caratteristiche fisico-chimiche assai differenziate.

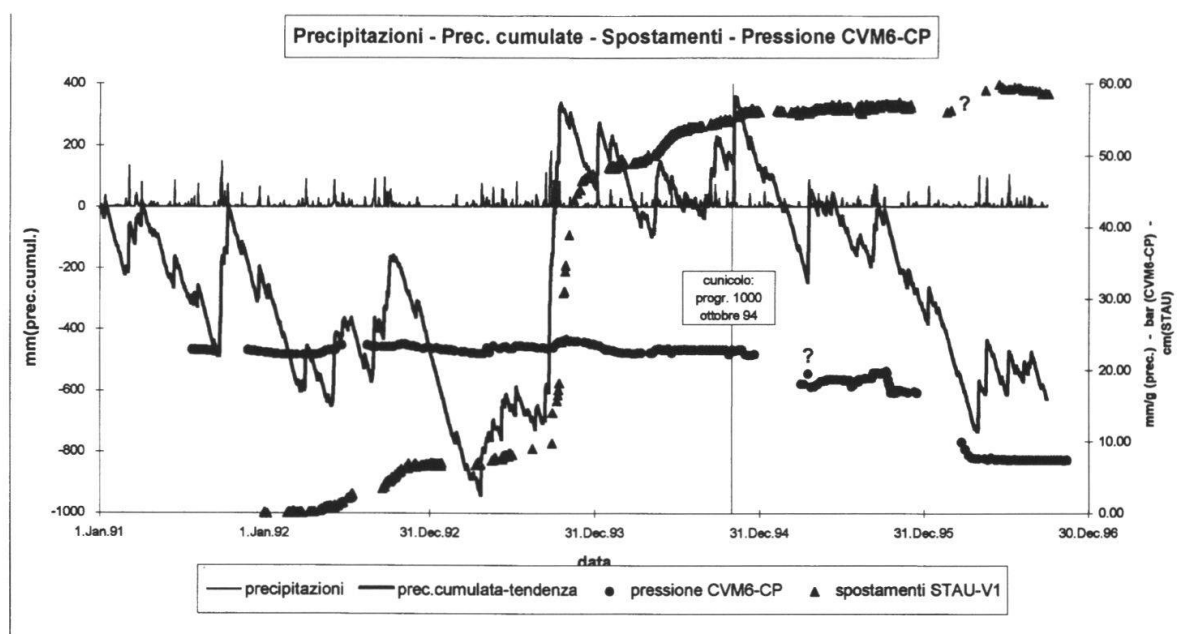


Fig. 5: Evoluzione delle pressioni interstiziali nella roccia (sondaggio CVM6 a -178 m di profondità) e dei movimenti, in funzione delle precipitazioni e della realizzazione del cunicolo di drenaggio.

5. Interpretazioni

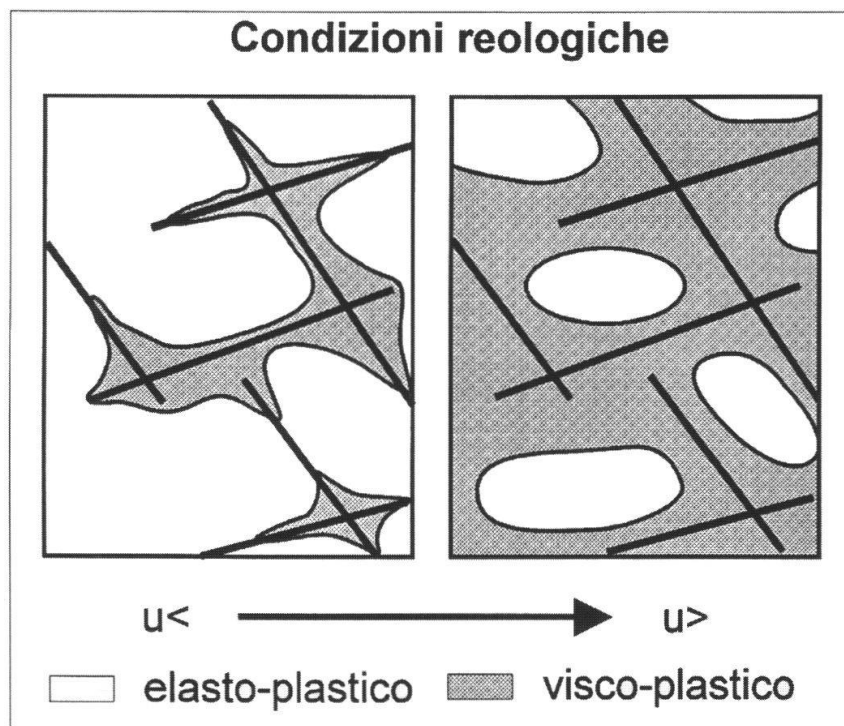
Le informazioni ricavate dalle indagini effettuate hanno consentito di confermare il seguente modello geodinamico:

- La massa in movimento è costituita da pannelli di roccia più o meno alterata, a dipendenza della sua natura mineralogica e dalla posizione.
- I movimenti avvengono lungo fasce di deformazione di spessore e comportamento reologico variabile, nello spazio e nel tempo. Le profondità e le pressioni idrauliche, e quindi le sollecitazioni dinamiche alle quali avvengono le deformazioni, oltrepassano i limiti di validità dei modelli geomeccanici classici.
- Le sovrappressioni idrauliche sono contenute in acquiferi di geometria complessa, che non è possibile descrivere con esattezza. Esiste tra di loro un equilibrio idrostatico a riposo (in assenza di circolazione), attraverso vie caratterizzate da permeabilità molto basse. L'equilibrio idrostatico tra gli acquiferi, se perturbato, necessita di molto tempo per ristabilirsi.
- „L'effetto soglia“ del quale sono responsabili le elevate pressioni idrostatiche può spiegarsi con il seguente meccanismo: Se la pressione locale è inferiore a quella critica, la deformazione è elasto-plastica. Se viene superata, subentra un regime visco-plastico. Il carattere reologico varia lungo le fasce di deformazione. La proporzione tra comportamento elasto-plastico e visco-plastico condiziona il comportamento pulsante dello slittamento.

Il movimento, contrariamente ai crolli in roccia o ai scivolamenti condizionati dalla mobilitazione di resistenze al taglio residue, denota un carattere auto-smorzante. Le deformazioni, agendo sulla permeabilità di diaclasi, tendono a ridurre le pressioni idrauliche, e quindi la distribuzione tra comportamento elasto-plastico e vi-

Fig. 6:

Ipotesi di ripartizione lungo le fasce di scorrimento delle zone di diverso comportamento reologico.



sco-plastico varia pure lei. In breve: accelerando, lo slittamento tende ad auto-stabilizzarsi. La figura 6 illustra schematicamente l'ipotesi di disposizione, controllata dalla tettonica, delle zone con diverso comportamento reologico.

Calcoli di stabilità effettuati con vari metodi, dimostrano che l'asportazione anche importante di materiale dal fronte di erosione non influisce molto sulla stabilità del pendio. Variazioni relativamente ridotte delle pressioni idrauliche agiscono per contro sensibilmente sugli equilibri dello slittamento.

6. Valutazione del rischio

Lo slittamento di Campo Vallemaggia cagiona vasti danni materiali su scala regionale. Le deformazioni dovute ai movimenti differenziati lungo i limiti tra le zolle rovinano le strade e alcune case. Ciò nonostante, la maggior parte degli edifici non sono colpiti, perché le deformazioni avvengono in profondità.

Una delle conseguenze dello slittamento è l'erosione del piede, a ragione di qualche decina migliaia di metri cubi all'anno di media. Lo sbocco del fiume Rovana nella Maggia, presso il villaggio di Cevio, rappresenta un apporto alluvionale massiccio, che se non fosse usato a scopi edilizi (inerti), provocherebbe grandi squilibri idrici. L'alto piano di Campo ha inoltre subito importanti perdite da terreno di pascolo.

Non esiste praticamente pericolo per le persone. Gli aspetti catastrofici si limitano all'erosione del fronte, che seppure spettacolare, non costituisce un pericolo corporale immediato e repentino.

È stata paventata l'eventualità di uno scivolamento di grande dimensione che porterebbe alla chiusura della valle e quindi alla formazione di un lago. Questa even-

tualità costituirebbe un pericolo su scala territoriale, sia per le cose che per le persone, fino a Locarno e Ascona, e oltre nel piano di Magadino e lungo le sponde del Lago Maggiore. Questa eventualità appare tuttavia a nostro parere remota, per il particolare meccanismo pulsante, auto-smorzante, che lo slittamento manifesta.

7. Gestione dei pericoli

L'oggetto Campo Vallemaggia ha assunto un'importanza territoriale, a causa del suo carattere spettacolare, che appare inesorabile. La soggettività del rischio e la sensibilità della popolazione è variabile, a dipendenza del momento politico e della sua ubicazione. I mass media hanno pure un'influenza elevata in un campo difficile da descrivere con terminologie giornalistiche.

In fase di accelerazione lo stesso effetto pulsante suscita la volontà di risanamento, che cala rapidamente assieme allo smorzamento dei movimenti e alla cura dei danni alluvionali. Trattandosi di un fenomeno a lunga scadenza, anche la formulazione delle strategie di risanamento globale risultano difficili. Il problema andava comunque affrontato, e non poteva esserlo altrimenti che su grande scala. Gli interventi principali che sono stati realizzati recentemente sono due:

- Un cunicolo sotto alla massa in movimento, scavato nella roccia in posto, dal quale sono state eseguite delle perforazioni verso l'alto. Lo scopo era di abbattere le pressioni idrauliche che regnano nelle zone dove avvengono le deformazioni di scorrimento.
- Una galleria di deviazione per togliere dal fronte di erosione le piene del fiume Rovana, e quindi ridurre il trasporto a valle di materiale alluvionale.

Vari altri interventi aggiuntivi sono stati intrapresi, in particolare per il risanamento dei boschi e la gestione delle acque di superficie.

Il piano regolatore del comune tiene conto delle minacce potenziali, con una delimitazione dei fondi potenzialmente minacciati dai scivolamenti al fronte.

Deve comunque essere rilevato che per fenomeni di questa natura, un risanamento definitivo del tipo "da dimenticare" non è realistico. In questo caso è palese la necessità di accettare un rischio residuo, il che comporta qualche difficoltà di ordine giuridico. La definizione di questo rischio residuo è il compito non facile degli attori di una tale operazione. Il rischio corporale può comunque essere ridotto ai minimi termini con vari accorgimenti di natura tecnica e operativa (sistemi d'allarme), fino a renderlo inferiore a quello medio nel resto del territorio.

8. Effetto del drenaggio

In seguito alla realizzazione del cunicolo di drenaggio sono stati osservati i comportamenti dello slittamento, dal punto di vista geodetico e idrogeologico. L'effetto più manifesto è la decisa deviazione dei vettori di spostamento. I movimenti si ridurranno ad assestamenti verticali, mentre i movimenti orizzontali furono praticamente annullati (vedi figura 7). Ovviamente si deve ancora attendere delle precipitazioni particolarmente importanti e prolungate per poter concludere che il consolidamento avvenuto con il drenaggio sia stato sufficiente a interrompere completamente il processo di pulsazione descritto.

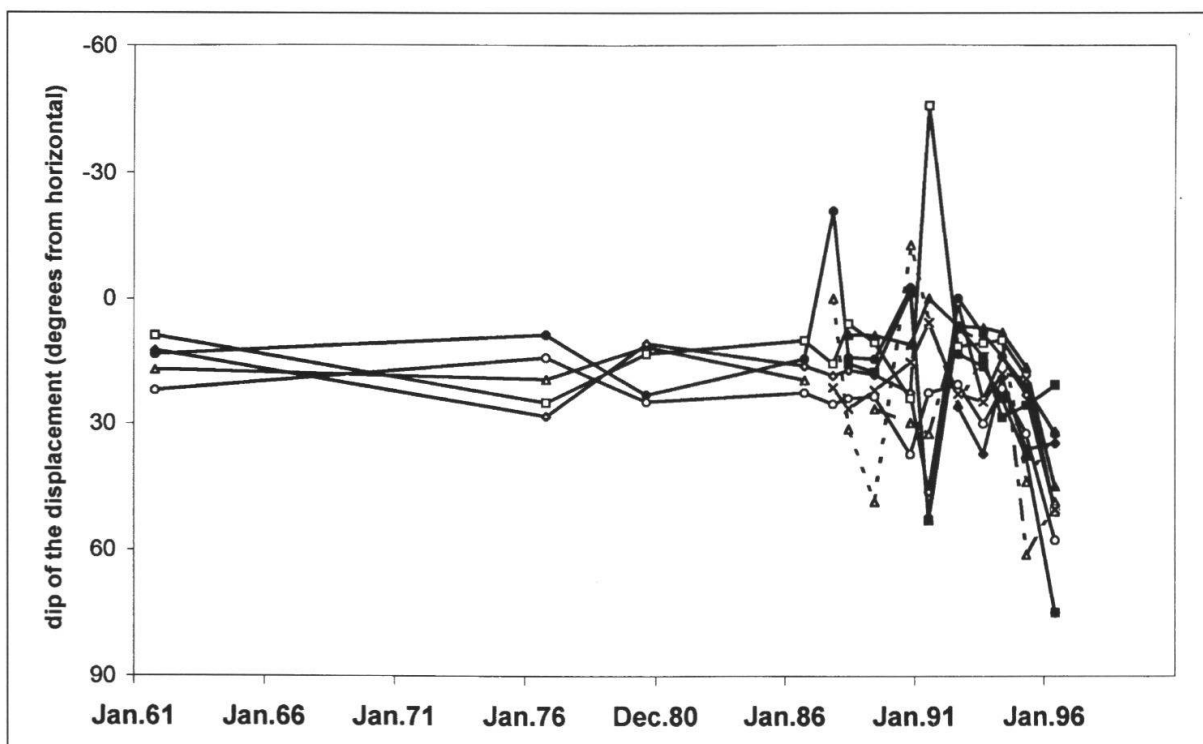


Fig. 7: Pendenza del vettore degli spostamenti. Dopo la costruzione della galleria di drenaggio si verticalizzano riducendosi a puro assestamento.

9. Riassunto degli aspetti essenziali dell'esempio citato

Lo slittamento di Campo Vallemaggia si distingue dai normali fenomeni di instabilità di pendio per le seguenti peculiarità:

- Vaste dimensioni.
- Presenza di elevate pressioni idrauliche presso le zone dove avvengono le deformazioni, che superano di parecchio la normale pressione idrostatica (sovrapressione), fino a manifestarsi con artesiani di varie decine di metri di colonna d'acqua.
- Effetto pulsante.
- Comportamento reologico complesso, a carattere misto elasto-plastico/visco-plastico, che spiega l'effetto pulsante.
- Deformazioni lungo fasce di scorrimento di qualche centimetro a qualche decina di metri di spessore, piuttosto che lungo superfici ben definite.

Le strategie di risanamento hanno dovuto essere proporzionate alla dimensione e alla complessità del fenomeno. Un cunicolo lungo quasi due chilometri nella roccia in posto sotto allo slittamento, dal quale sono stati eseguite perforazioni verso l'alto, ha permesso di abbattere sensibilmente le pressioni idrauliche, e quindi di condizionare un consolidamento della massa in movimento.

10. Importanza dello studio geologico

Il meccanismo è molto complesso e non si lascia descrivere con modelli geotecnici semplici, perché le loro condizioni limite di validità non sono rispettate.

Il geologo è portato per indole e filosofia a non confondere i modelli con la realtà. In un caso come quello di Campo Vallemaggia, l'osservazione geologica è assolutamente indispensabile per potere illustrarne le caratteristiche entro limiti di dettaglio ragionevoli. La „routine” arrischia di lasciare sfuggire gli elementi chiave del problema perché non sono sempre evidenti, e possono apparire a prima vista come dei dettagli trascurabili.

Bibliografia

- BONZANIGO, L. 1988: Etude des mécanismes d'un grand glissement en terrain cristallin: Campo Vallemaggia. Proceedings of the fifth International Symposium on Landslides, Lausanne 10-15 July 1988, pp. 1313-1316. A.A. Balkema, Rotterdam.
- BONZANIGO, L. 1990: Lo slittamento di Campo Vallemaggia; fenomeni artesiani e presenza di gas in ambiente cristallino. Bull. de l'Ass. Suisse des Géologues et Ingénieurs du Pétrole. Vol. 57, no. 131, pp. 65-72.
- BONZANIGO, L. & FREI, W. 1992: Prospezione sismica con il metodo a riflessione sullo slittamento di Campo Vallemaggia. Bull. de l'Ass. Suisse des Géologues et Ingénieurs du Pétrole. Vol. 59, no. 134, pp. 9-17.
- BONZANIGO, L. 1996: Anomales Verhalten einer Grossrutschung. Hypothesen zur Erklärung der Mechanismen und dementsprechend geeigneter Sanierungsmassnahmen. Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse; Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften / Björn Oddsson. (Monte Verità) Birkhäuser Verlag 1996, pp.243-253.
- BONZANIGO, L. 1997: Rheological particularities and artesian heads in a large landslide: Successful re-claiming using underground drainage. Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Athens 23-27 June 1997, pp. 525-528. A.A. Balkema, Rotterdam.
- HEIM, A. 1898: Die Bodenbewegungen von Campo im Maggiathale. Beiblatt zur Viertel-Jahrsschrift der naturforschenden Gesellschaft in Zürich.
- LOMBARDI, G. 1996: Der Drainagestollen von Campo, Rovana. "wasser, energie, luft - eau, énergie, air", 88. Jahrgang, 1996, Heft 11/12, pp.281-287.

Caso rappresentativo no. 11:

Caduta massi sulla N2 a Rodi

ADRIAN BAUMER* e ALBERTO COLOMBI*

Riassunto

Nel febbraio 1990 un grosso masso è caduto sulla corsia nord-sud della strada nazionale N2 a Rodi. Durante la ricognizione aerea della zona di stacco, effettuata subito dopo l'evento, si è dovuto constatare la presenza di ulteriori massi pericolanti. Come misura di emergenza, sulla parte inferiore del pendio sono state costruite due berme orizzontali con valli di protezione. L'esame più approfondito della zona di stacco eseguito da geologi assieme a ingegneri civili e l'analisi matematica fisica delle traiettorie hanno portato all'esclusione dei metodi distruttivi (mine e sgombero) o di protezione passiva (reti) per il risanamento della parete. I massi pericolanti sono stati sottomurati e ancorati, le fessure aperte sono state sigillate e le masse rocciose critiche sono state munite di sistemi di drenaggio. I lavori sono stati completati nell'autunno 1996 senza incidenti di rilievo, a un costo complessivo di due milioni di franchi circa.

Zusammenfassung

Im Februar 1990 stürzte aus etwa 250 Höhe ein grosser Felsblock auf die nach Süden führende Fahrbahn der Nationalstrasse N2 bei Rodi in der oberen Leventina. Bei der unverzüglich durchgeführten Kontrolle des Bereiches der Ausbruchnische wurde das Vorhandensein von weiteren instabilen Blöcken festgestellt. Mit dem sofortigen Bau von zwei horizontalen Bermen mit Schutzwällen im unteren Teil des Hanges wurden die ersten Schutzmassnahmen getroffen. Die weitere Untersuchung der Abbruchzonen durch die Geologen zusammen mit Bauingenieuren und Physikern (für die Simulation der Block-Sturzbahnen) führte zur Überzeugung, dass für die Sicherung des Hanges weder Sprengungen noch Steinschlagnetze eingesetzt werden können, und dass die zuverlässigsten Massnahmen in der Untermauerung und Verankerung der Blöcke bestehen, zusammen mit der Versiegelung von offenen Spalten und der Entwässerung der stabilisierten Felsmassen. Die Arbeiten wurden ohne Unfälle im Herbst 1996 abgeschlossen und die Gesamtkosten belaufen sich auf ungefähr zwei Millionen Franken.

1. Descrizione dell'evento

Nella prima mattina di sabato 24 febbraio 1990 un masso proveniente dal fianco sinistro della valle ha attraversato la strada nazionale N2 Chiasso-Basilea, tratto Faido-Varenzo, rimbalzando lungo il pendio e sulla corsia N-S, fermandosi finalmente a valle della strada, sulla berma a quota 942 msm che forma la sponda sinistra del fiume Ticino. Al punto d'impatto finale il masso misurava ancora 4 x 2.5 x 1.5 metri

*Dr. Baumer SA, Geologi Consulenti, 6612 Ascona

circa (volume 15 m^3) (fotografia no. 1). Lungo il pendio a monte della strada due ulteriori punti di rimbalzo hanno potuto essere identificati.

La zona di stacco è stata individuata nella parete rocciosa a circa 250 metri sopra il livello della strada nazionale.

2. Situazione geologica

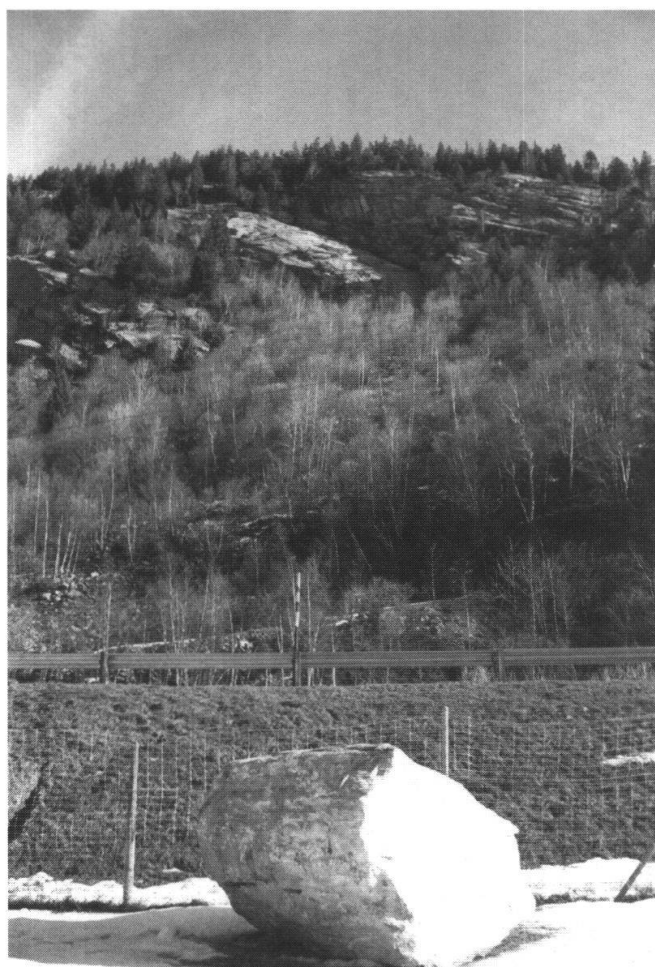
La Valle Leventina è intagliata nelle rocce cristalline dei ricoprimenti pennidici detti del Simano, del Lucomagno e della Leventina. I gneiss della Leventina formano la parte inferiore dei due versanti della valle e consistono in banchi grossi di gneiss chiari, generalmente inclinati verso sud e sud-ovest. Gli orizzonti che separano i banchi litologici sono frequentemente arricchiti di mica e danno così luogo a situazioni instabili sul versante sinistro della valle, dove i banchi litologici hanno un'immersione più o meno parallela ai pendii. La massa rocciosa è attraversata da altri sistemi di discontinuità tra le quali predominano le diaclasi trasversali orientate N-S e E-O, ambedue sub-verticali.

Localmente il fianco roccioso è limitato verso il basso (a quota 1070 msm circa) da un cono di materiale detritico grossolano, in parte probabilmente di origine natura-

Ausbruchsstelle

*Berme und unterer
Schutzwall*

Nationalstrasse N2



zona di stacco

berma e vallo di protezione inferiore

sedime della strada nazionale N2

Fotografia 1: Zona di stacco e luogo dell'impatto finale del masso caduto il 24.2.1988.

Ablösungsbereich und Endpunkt der Flugbahn des am 24.2.1988 abgestürzten Blockes.

le, in parte formato dagli scarti dell'antica cava ubicata nella roccia sovrastante e sfruttata nella prima metà di questo secolo per la produzione di dadi destinati alla pavimentazione della strada del San Gottardo.

Con lo sfruttamento della cava il banco di gneiss che poggiava sul piano di scistosità inclinato di 43° - 52° verso valle (ossia verso SSO) è stato scavato e al limite dell'area di scavo sono state lasciate delle scarpate rocciose parzialmente disturbate.

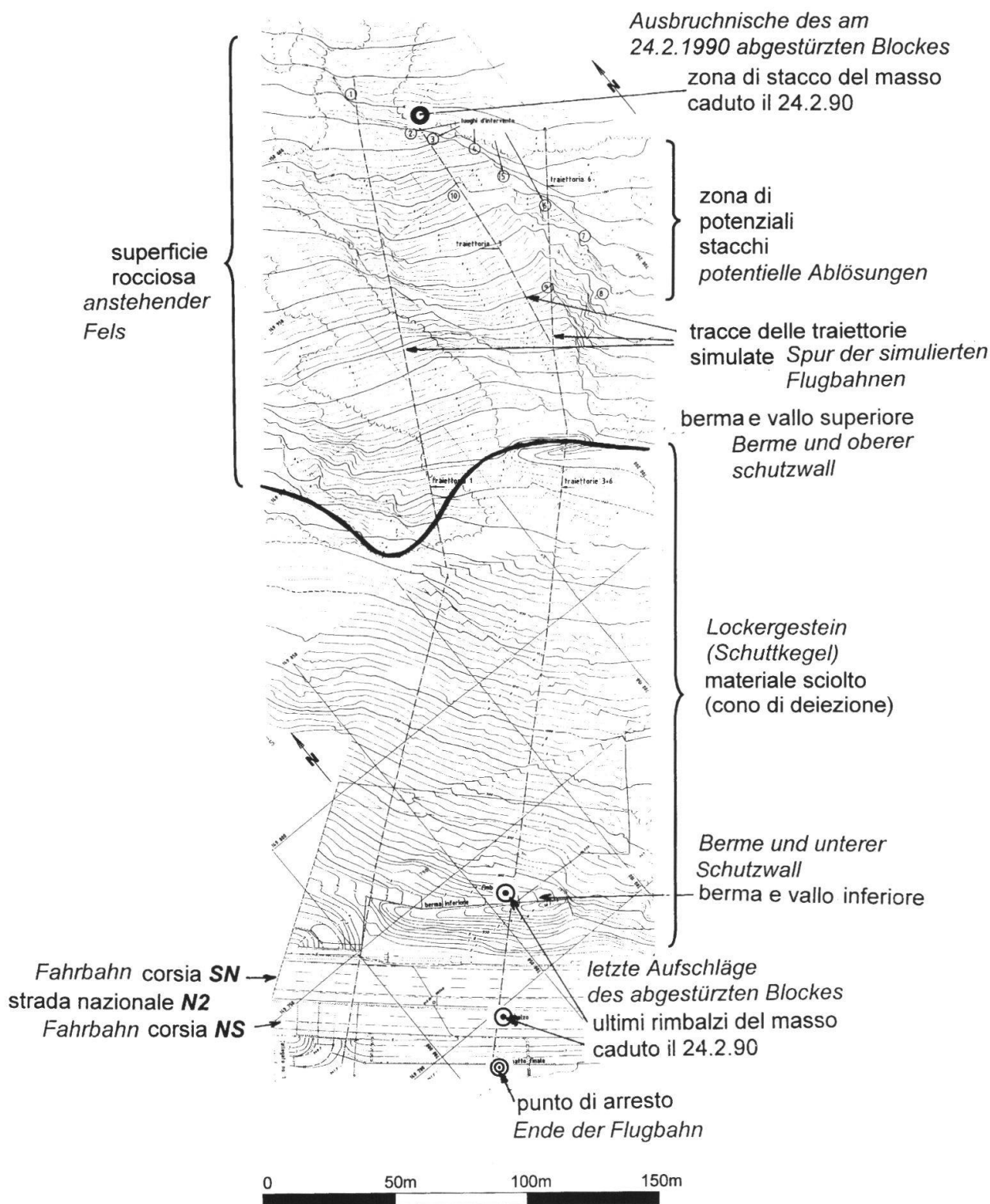


Fig. 1: Situazione dell' area interessata dalla caduta dei massi - *Einflussbereich der Blockstürze*



masso pericolante
gefährdeter Felsblock

superficie di
slittamento (piano di
scistosità/diaclisi di
decompressione)

Abrutschfläche
(*Schieferung / Talkluft*)

Fotografia 2: Luogo di stacco del masso; blocchi rimasti in equilibrio precario.
Ausbruchsstelle und zurückgebliebene gefährdete Felsmasse.

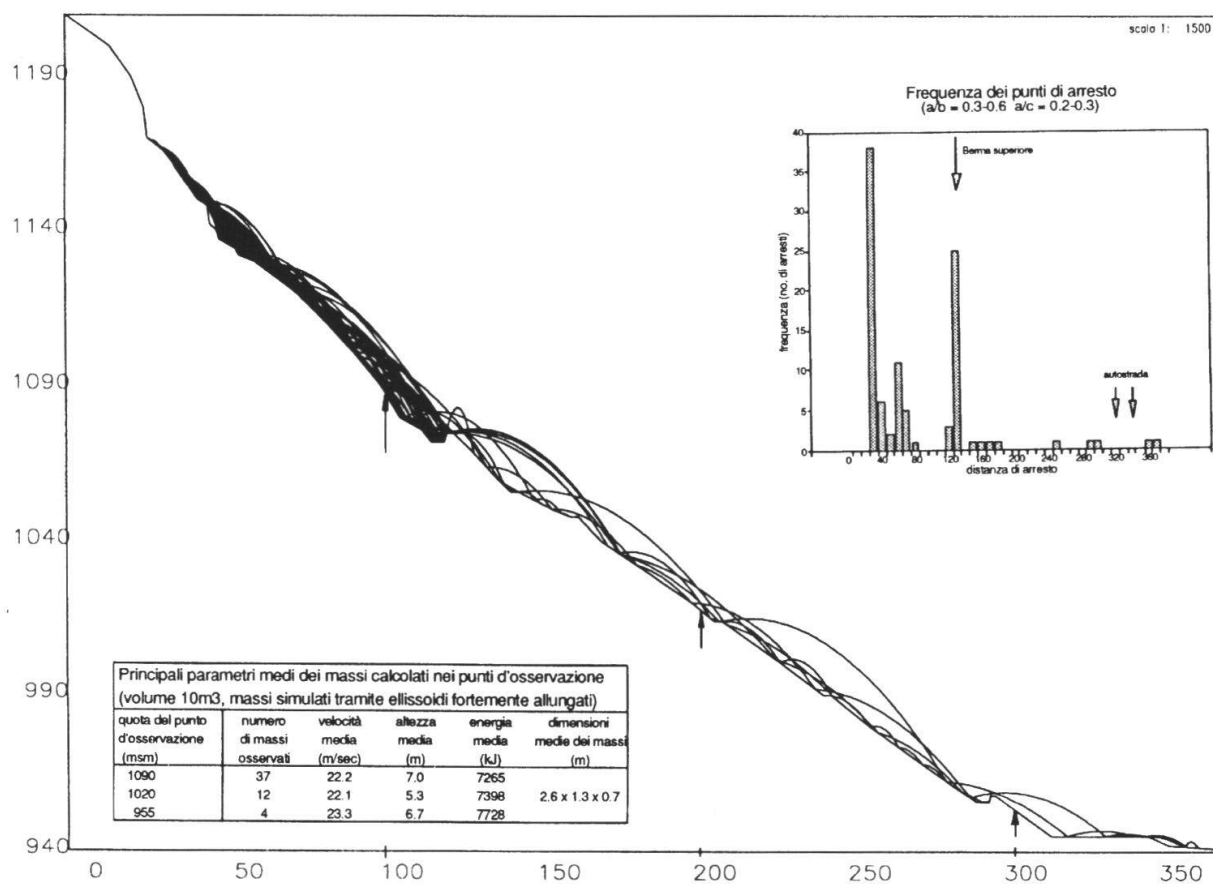


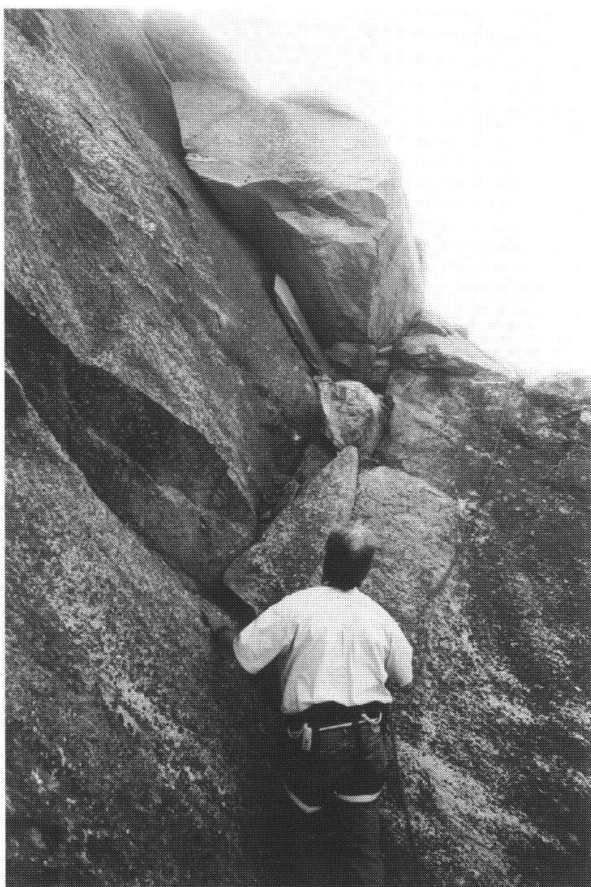
Fig. 2: Simulazione delle traiettorie; zona di stacco in alto a sinistra, sedime dell'autostrada in basso a destra. / *Simulation der Flugbahnen; Ablösungsbereich oben links, Autobahn unten rechts.*

3. Metodi di indagine e lavori eseguiti

Durante il primo sopralluogo geologico dopo l'evento, in data 7 marzo è stata dapprima ispezionata la zona d'impatto del masso ed è stata seguita la linea di caduta. Quindi, a bordo di un elicottero, è stata sorvolata la parete rocciosa da dove si è staccato il masso. Come misura immediata è stata decisa la costruzione di una berma e di un vallo lungo la pista già esistente al piede del pendio ed è pure stata decisa la creazione di un camminamento nella parete. Quest'ultimo ha permesso l'esame dettagliato con il quale si è potuto rilevare la presenza di numerosi massi in equilibrio precario (esempio vedi fotografia no. 2). Ogni singolo masso è stato descritto e fotografato; in collaborazione con il progettista ing. Silvano Ceresa è stata valutata la stabilità e l'entità delle misure necessarie per la stabilizzazione (figura no. 1 e fotografia no. 3).

Per una rapida analisi delle condizioni di sicurezza e dell'effetto di eventuali opere di protezione è stato elaborato un programma semplificato per la simulazione matematica delle traiettorie di caduta presentate sulla cartina della figura no. 3.

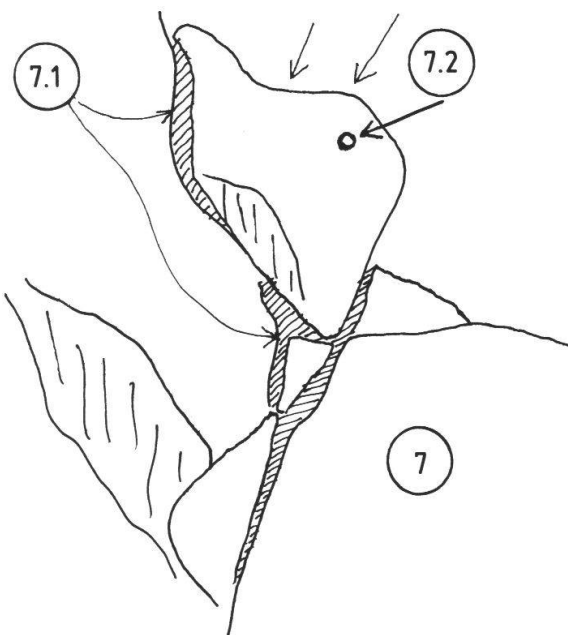
In seguito sono stati raccolti i dati necessari per un esame più approfondito delle traiettorie, esame eseguito dal dr. D. Bozzolo dell'Istituto Cantonale Tecnico Sperimentale (figura no. 2).



Zona 7:

7.1 impermeabilizzazione delle fessure aperte/
Versiegelung offener Klüfte

7.2 ancoraggio di un blocco pericolante
Verankerung eines losen Blockes



Fotografia 3: Progettazione di un intervento locale. - *Planung einer lokalen Sanierung.*

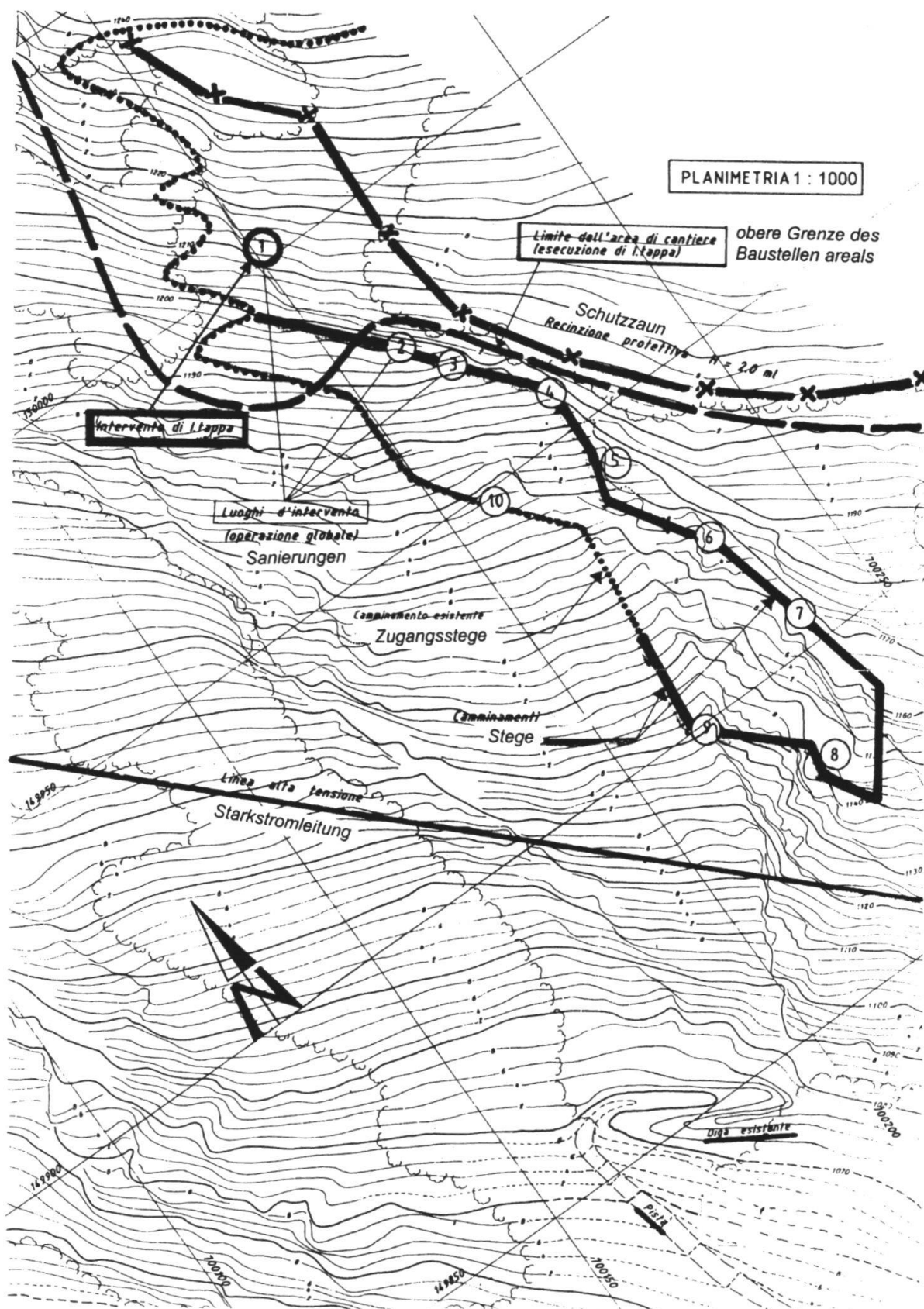


Fig. 3: Estensione dalla zona di risanamento.
Ausdehnung des Sanierungsbereichs.

4. Interpretazione

Lungo il limite superiore dell'area di sfruttamento dell'antica cava è rimasta una scarpata ripida nella quale sono incorporati numerosi massi parzialmente staccati, appoggiati su un piano inclinato verso valle.

4.1 Modello geologico

Lo scavo nella cava ha seguito l'andamento di un piano di scistosità (limite di un banco litologico) che è inclinato di 43° a 52° verso sud-sud-ovest. La roccia è tagliata dai vari sistemi di discontinuità in elementi poliedrici e frequentemente le fessure che li separano sono aperte. Alcuni di questi elementi sono completamente staccati e sono rimasti in posto unicamente per la forza d'attrito lungo la superficie d'appoggio e in parte servono d'appoggio precario per i massi sovrastanti. Altri elementi sono ancora parzialmente incastrati e frequentemente trattengono altro materiale.

Si può presumere che in condizioni normali la massa rocciosa è sufficientemente permeabile ma non è da escludere che in periodi di forti e prolungate precipitazioni possa formarsi una falda temporanea che può causare delle pressioni interstiziali elevate.

4.2 Causalità

La principale causa delle condizioni prevalenti prima dell'intervento è l'abbandono della cava. In quel momento (inizio del secolo) la rinuncia a qualsiasi provvedimento è stata giustificabile visto che sul pendio sottostante e tra il piede del versante e la sponda sinistra del fiume Ticino non esistevano delle infrastrutture importanti.

Tutti i massi considerati precari sono appoggiati su un piano con un'inclinazione critica verso valle. Questi massi, trovandosi esposti alla superficie, possono venire sottoposti a sollecitazioni dovute a vibrazioni del terreno, al gelo o alla dilatazione termica come pure a pressioni idrostatiche.

L'ulteriore stacco repentino di uno qualsiasi dei massi era perciò possibile, con un grado di probabilità difficilmente valutabile.

4.3 Analisi dei rischi

Con l'evento del 24 febbraio 1990 è stata sfiorata per poco una tragedia: il masso è caduto poco dopo il passaggio di un convoglio di pullman esteri. Dopo l'esame della zona di stacco si era concluso che il pericolo di stacco di altri massi persisteva e che la probabilità era molto elevata che la loro traiettoria avrebbe potuto coinvolgere una o addirittura entrambe le corsie della strada nazionale. Si doveva perciò attribuire un grado di rischio molto alto, il che giustificava un intervento mirato all'eliminazione del rischio.

5. Interventi

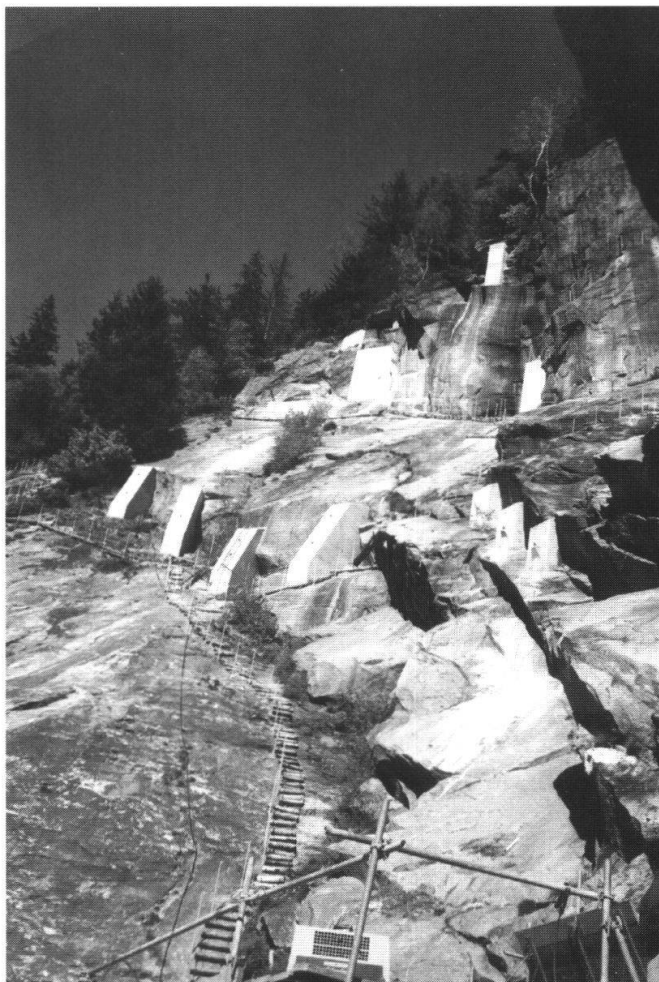
5.1 Misure di emergenza

Due settimane dopo l'evento si è dato inizio alla costruzione di una berma di contenimento lungo la pista esistente al piede del pendio. A questo scopo è stata creata una piattaforma d'impatto e i massi grossi risultanti dallo scavo sono stati utilizzati per la costruzione di una massicciata lungo il ciglio esterno della berma. In seguito è

Fotografia 4:

vista generale della zona d'intervento con camminamenti, speroni, sottomurazioni e ancoraggi, appoggiati su piani rocciosi inclinati di 40°-45° verso sudovest

Ansicht des sanierten Bereiches der Talflanke mit den Zugangsstegen, Betonpfeilern, Stützmauern und Felsankern, aufstehend auf 40°-45° nach Südwesten geneigten Felsoberflächen



stata creata una pista d'accesso al piede della parete rocciosa dove è stata costruita un'altra piattaforma d'impatto assieme ad un vallo di protezione.

Contemporaneamente è stata iniziata la costruzione di sentieri d'accesso dall'alto e di camminamenti nella parete rocciosa.

5.2 Lavori di consolidamento

Con la creazione di camminamenti si è potuto procedere all'individuazione e alla descrizione degli elementi pericolanti. Assieme all'ingegnere progettista, sul posto è stata valutata la stabilità di ogni singolo elemento e sono stati scelti i metodi d'intervento per il consolidamento. Il progettista ha in seguito elaborato un programma di intervento che è servito per la stesura dei documenti di appalto.

I lavori di consolidamento sono stati iniziati nell'estate del 1994 e hanno dovuto essere interrotti per le stagioni invernali quando ghiaccio e neve rendevano troppo pericolosa la presenza di manodopera.

In una prima fase è stato sgomberato il materiale che costituiva un pericolo per gli operatori sul posto e di seguito sono stati costruiti i camminamenti d'accesso con corde fisse e scalinate. Il consolidamento dei massi è proceduto dall'alto del pendio verso il basso ed è sempre stato iniziato con il getto di un muro o di uno sperone di sostegno (in calcestruzzo armato, trasporti con elicottero), seguito dall'installazione di ancoraggi passivi (fotografia no. 4). Tutte le zone d'intervento sono state munite di tubi drenanti e di fori di drenaggio.

Dopo un controllo della zona nella fase finale è stato deciso di estendere il lavoro di consolidamento ad altri massi, non inclusi nel programma iniziale. In complesso l'intervento ha compreso i seguenti lavori:

- costruzione delle berme e dei valli
- costruzione della pista d'accesso a valle
- costruzione del sentiero d'accesso dall'alto e sgombero dei materiali sciolti
- costruzione dei camminamenti in facciata
- sottomurazione, ancoraggio, sigillatura di fessure aperte e misure di drenaggio.

Il costo complessivo dei lavori ammonta a due milioni di franchi circa.

6. Conclusioni

- L'evento del 24 febbraio 1990 segnala la presenza di una situazione di pericolo sul pendio sovrastante la strada nazionale N2 a Rodi, tra Airolo e Faido
- Una prima riduzione del rischio per la strada nazionale è stata ottenuta con la costruzione di due berme di trattenimento e con lo spurgo preliminare
- La perlustrazione della zona di stacco ha rilevato la presenza di un numero importante di massi pericolanti e la simulazione matematica delle potenziali traiettorie ha dimostrato che la probabilità che un masso arrivi sul sedime dell'autostrada è ancora elevato e che l'energia cinetica supera la resistenza delle reti in commercio
- Per la sistemazione della scarpata è stato scartato il metodo di rimozione dei massi con esplosivo: l'allontanamento degli elementi pericolanti avrebbe potuto mettere in pericolo la stabilità della massa rocciosa sovrastante
- Le zone d'intervento identificate in precedenza sono state consolidate e protette con sottomurazioni, ancoraggi, sigillatura delle fessure aperte, drenaggi
- I lavori eseguiti in un ambito difficile e pericoloso si sono svolti senza incidenti di rilievo.

Fallbeispiel Nr. 12:

Rutschungs-/Sackungsgebiet Halteli, Turbachtal (BE)

DANIEL BOLLINGER*

Zusammenfassung

Bei der Rutschung Halteli handelt es sich um eine alte, instabile Sackungsmasse, welche 1987 eine starke Aktivierung erfuhr. Herabrollendes Geröll beschädigte darunterliegende Gebäude und hatte die Evakuierung von zwei bewohnten Häusern zur Folge. Aufgrund der räumlich begrenzten Gefährdung und der Einsicht, dass die Rutschung mit keiner verhältnismässigen Massnahme gestoppt werden kann, wurde talseits des Rutschgebietes ein mit einem Steinschlagzaun bestückter Auffangdamm erstellt. Durch diese Massnahme wurde ein ausreichender Schutz der talwärts liegenden Objekte (8 Gebäude, Verbindungsstrasse und Kulturland) erzielt.

1. Einleitung und Ausgangssituation

1987 hat sich in der Südflanke des Bergzuges Hornflue-Horntube auf der rechten Seite des Turbachtals - östlich von Gstaad - ein instabiles, altes Sackungsgebiet stark aktiviert, woraus sich auf einer Breite von 80 bis 110 m und einer Länge von 200 bis 250 m eine Rutschung entwickelte (Koord. ca. 591'400/147'600). In der Folge wurde der Wald stark gelichtet und dessen Schutzwirkung erheblich beeinträchtigt. Für die darunter liegende Talschaft zeichnete sich eine erhebliche Gefährdung ab.

2. Geologisch-hydrologische Situation

Die Rutschung befindet sich im Flysch am Kontakt zwischen der Zone submédiane und der Breccien-Decke. Entgegen anfänglichen Vermutungen zeigten die Untersuchungen keinen offensichtlichen Zusammenhang mit der von Gstaad in Richtung NE verlaufenden Gips- und Rauhwaschezone längs des Deckenkontaktes.

Die Flysch-Schichten sind schwach gegen NW zu geneigt. Infolge starker Klüftung (inkl. zahlreicher hangparalleler Entlastungsklüfte) ist das Gebirge stark durchtrennt. Hakenwurf ist weit verbreitet. Es bestehen günstige Voraussetzungen für das Herauslösen und Abgleiten von Gesteinspaketen aus dem Gebirgsverband.

* Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern

Die Anrisszone des Rutsches befindet sich im Fels, ca. auf Kote 1520 m ü.M. Mehr oder weniger kompakte, zusammenhängende Felspartien sind dort vom bergseitig anstehenden Gebirgsverband losgelöst. 1987 bildeten sich in diesem Bereich grosse, offene, z.T. bis 10 m tiefe Spalten. Der untere Teil der Rutschmasse besteht überwiegend aus blockigem Gehängeschutt und komplett entfestigten Felspaketen. Im untersten Teil ist die Rutschung zum Teil feinkörnig ausgebildet und stark wassergesättigt. Die untersten Rutschungen enden ca. auf Kote 1370 m ü.M. Unterhalb der Rutschung besteht die Talflanke aus Moräne, überlagert von Gehängeschutt und -lehm sowie von älterem, feinkörnigem, plastischem Rutschmaterial.

Niederschläge versickern grösstenteils im aufgelockerten Fels oder im blockigen Gehängeschutt. In Form von kleinen Quellen (ca. auf Kote 1380 - 1400 m ü.M.) treten sie in tieferen Hanglagen dort zutage, wo der Untergrund aus feinkörnigem, schlecht wasserduchlässigem Material besteht. Der Bereich des Rutschfusses ist durchnässt, was sich stabilitätsmässig ungünstig auswirkt.

3. Untersuchungsmethodik

Zu Beginn der Aktivierung des Rutsches wurden zwei vertikale Kernbohrungen abgeteuft. Die eine Bohrung in der Anrisszone des Rutsches wurde mit einem Inclinometer ausgestattet, welches in 20.5 m Tiefe eine deutlich ausgebildete, relativ scharfe Gleitfläche erkennen liess. Anschliessend daran ausgeführte geoelektrische Untersuchungen (VLF-Messungen) vermochten jedoch den Tiefgang des Rutschkörpers nicht exakt zu erfassen.



Fig. 1: Flugaufnahme der Rutschung/Sackung aus dem Sommer 1993. Unten rechts ist ein Teil des erstellten Auffangdammes sichtbar (Pfeil). Foto: G. della Valle

Das Rutschgebiet wurde ab Beginn der Aktivierung mit diversen Vermessungspunkten ausgestattet und diese in regelmässigen Abständen eingemessen. Dadurch konnten die Verschiebungsbeträge und -richtungen festgehalten werden. Auf die Kontinuität der Messungen erschwerend wirkte sich aus, dass die Messpunkte infolge der anhaltenden Bewegungen und infolge herabkollernder Blöcke oft zerstört und andernorts wieder neu errichtet werden mussten.

Ein wichtiger Schritt zur Gefahrenbeurteilung und Massnahmenplanung bildete eine detaillierte Kartierung der Rutschung im Massstab 1:1'000. Dadurch konnte die Rutschmasse in sich unterschiedlich verhaltende Teilrutsche gegliedert werden.

Weitere, in Kapitel 6 erläuterte Untersuchungen standen konkret im Zusammenhang mit den projektierten Massnahmen.

4. Resultate und Interpretation

Bei der Rutschung handelt es sich nicht um eine solche mit klassischer, gekrümmter Gleitfläche. Man muss sich den Mechanismus eher in Form einer in sich zusammensackenden, stark aufgelockerten Felsmasse vorstellen. Dies hatte zur Folge, dass die mittleren und unteren Rutschbereiche talwärts förmlich ausgequetscht wurden, was zur Bildung kleinerer Teilrutsche und zu abstürzenden Felspaketen Anlass gab.

Ein Vergleich der Resultate der oberflächlichen Verschiebungsmessungen mit dem Witterungsverlauf zeigten eine deutliche Korrelation. Niederschläge gingen einher mit beschleunigten Bewegungen, trockene Witterung mit einer Verlangsamung derselben. Die Bewegungen lagen 1987 in der Grössenordnung von durchschnittlich 5 - 10 mm/Tag, kamen aber selbst in der Trockenperiode im September und Oktober nie ganz zum Stillstand.

Die unmittelbare Ursache für die Aktivierung lag in äusserst starken Niederschlägen. Ob die Instabilität letztlich auch durch Bewegungen (z.B. infolge Auslaugung und Hohlraumbildung) in der darunterliegenden Gips- und Rauhwaschezone ausgelöst worden war, konnte nicht beurteilt werden. Für die Wahl der Sanierungsmassnahmen blieb dies jedoch irrelevant.

5. Gefahrenbeurteilung

Die Sackungs-/Rutschungsmasse liegt oberhalb von Bergbauernhöfen und Kulturland. Insgesamt befinden sich 8, teilweise bewohnte Gebäude mit einer Versicherungssumme von 1.9 Mio. Fr. im unmittelbaren Gefahrenbereich. Die Gefahrenzone wird zudem durch die Verbindungsstrasse Gstaad - Turbach gequert, welche der Erschliessung der hinteren Talschaft dient und im Sommerhalbjahr auch von Touristen rege benutzt wird.

Die Gefährdung bestand weniger durch den Rutschprozess an sich, als vielmehr durch losgelöste, den steilen Grashang herabrollende Blöcke, welche Personen auf der Strasse wie auch innerhalb von Gebäuden erheblich gefährdeten. Aus diesem Grund mussten denn auch zwei bewohnte Häuser bis zur Fertigstellung der Mass-

nahmen evakuiert werden. Bei heftigen Niederschlägen (z.B. Gewittern) bestand zudem die Gefahr der Bildung von Hangmuren («Rüfen»), durch welche Geröll bis in tiefere Hanglagen transportiert werden konnte.

Zu Beginn der Aktivierung nie ganz ausgeschlossen wurde die Möglichkeit eines Abgleitens grösserer Kubaturen bis in den Turbach und die Gefahr eines Bachrückstaus.

6. Gefahrenmanagement

Aufgrund der Gefährdungslage hatten die Massnahmen vordringlich zum Ziel, Menschen zu schützen. Zwei akut gefährdete Häuser mussten deshalb evakuiert werden. Als Frühwarnsystem spannte man in der Fallinie Drähte über die mutmasslich aktivsten Zerrspalten, welche bei abrupten Rutschbewegungen einen Alarm auslösen und den gefährdeten Strassenabschnitt der Turbachtalstrasse mittels einer Lichtsignalanlage automatisch sperren würden.

Der bedrohlichen Situation wegen wurde im Herbst 1987 ein Experte der ETH Zürich beigezogen. Die Feststellung, dass das Rutschverhalten mit dem Witterungsverlauf korreliert, gab Anlass dazu, die Sanierungsmassnahmen prioritär auf eine Tiefenentwässerung des Rutsches zu konzentrieren. Im Spätherbst des Jahres wurden zwei subhorizontale, gegen den Berg zu schwach ansteigende Bohrungen ausgeführt. Die 52 und 152 m langen Bohrungen verliefen unterhalb der Gleitfläche der Rutschung. Sie vermochten weder eine Drainage noch eine Beruhigung des Rutsches zu bewirken.

Als weitere Massnahme wurde ein Materialabtrag im oberen, treibenden Teil des Rutsches diskutiert. Aufgrund der sehr schlechten Zugänglichkeit und der grossen Mengen abzutragenden Materials wurde diese Lösung jedoch nicht weiter verfolgt.

Die Kellerhals + Haefeli AG wurde 1989 beigezogen, nachdem die anfänglich getroffenen Massnahmen keine Wirkung zeigten. Die Auswertung der vorhandenen Unterlagen und eine detaillierte Kartierung zeigten, dass die Rutschung mit keiner vernünftigen Massnahme zu bremsen war und sich Massnahmen in erster Linie auf den Schutz der darunterliegenden Gebiete vor herabrollendem Geröll zu konzentrieren hatten. Zu diesem Zweck wurde wenig unterhalb des Rutschfusses ein mit einem Steinschlagnetz ausgestatteter, im Grundriss V-förmiger Auffangdamm projektiert. Dieser wurde so angeordnet, dass er im Falle einer sehr starken Beschleunigung des Rutsches auch grössere Mengen an abgeglittenem Rutschmaterial aufnehmen würde. Mittels Sickerpackung und Drainagen wurde sichergestellt, dass sich bergseitig des Dammes keine Hangwasserdrücke aufbauen konnten.

Im Extremfall musste von einem vollständig hinterfüllten Auffangdamm und einer erheblichen Massenumlagerung ausgegangen werden, welche sich in Form einer Auflast destabilisierend auf die darunter liegenden Hangbereiche auswirken würde. Wie vorgängige Baugrundsondierungen im steilen Gelände (insgesamt 15 Sondierschlitze mit Menzi-Muck und zwei Kernbohrungen bis in Tiefen von 14.5 und 15.0 m, ergänzt durch zahlreiche Laboranalysen am Lockergestein, u.a. Proctor-Versuche) zeigten, bestand der Untergrund an der Stelle des projektierten Dammes oberflächlich aus feinkörnigem (siltig-tonigem), mit Holzresten durchsetztem Material eines älteren Rutsches. Um die Stabilität sowohl der getroffenen Mas-

snahme als auch jene des Hanges sicherzustellen, war eine Foundation auf die im Untergrund ausgebildete Moräne unerlässlich (Foundationstiefen ca. 1.5 - 5 m). Dies erfolgte mittels Materialersatz, d.h. durch schichtweisen Einbau und Verdichtung von frischem, teilweise durch Zusätze künstlich stabilisiertem Rutschmaterial. Um kritische Bauzustände zu vermeiden, erfolgte der Aushub in kurzen Etappen, nachdem vorgängig die Quellwasseraustritte am Rutschfuss gefasst und dadurch die Wassersättigung der bautechnisch sensiblen Schichten reduziert worden war. Der heute sichtbare Auffangdamm ist nur derjenige Teil der Massnahme, welcher direkt zum Schutz vor nachrutschendem Material und herabrollendem Geröll dient. Der volumenmässig grössere, für die Gesamtstabilität erforderliche Teil der Massnahme ist im Untergrund verborgen.

Nach der Realisierung der Schutzmassnahmen konnten die evakuierten Häuser wieder bezogen und die Alarmanlage abgebaut werden. Zur Überwachung des Rutschgeschehens wird das instabile Gebiet weiterhin periodisch vermessen. Die Funktionstüchtigkeit des Auffangdammes wird durch regelmässige Kontrollen des Steinschlagnetzes und gegebenenfalls durch das Ausräumen von Schutt gewährleistet.

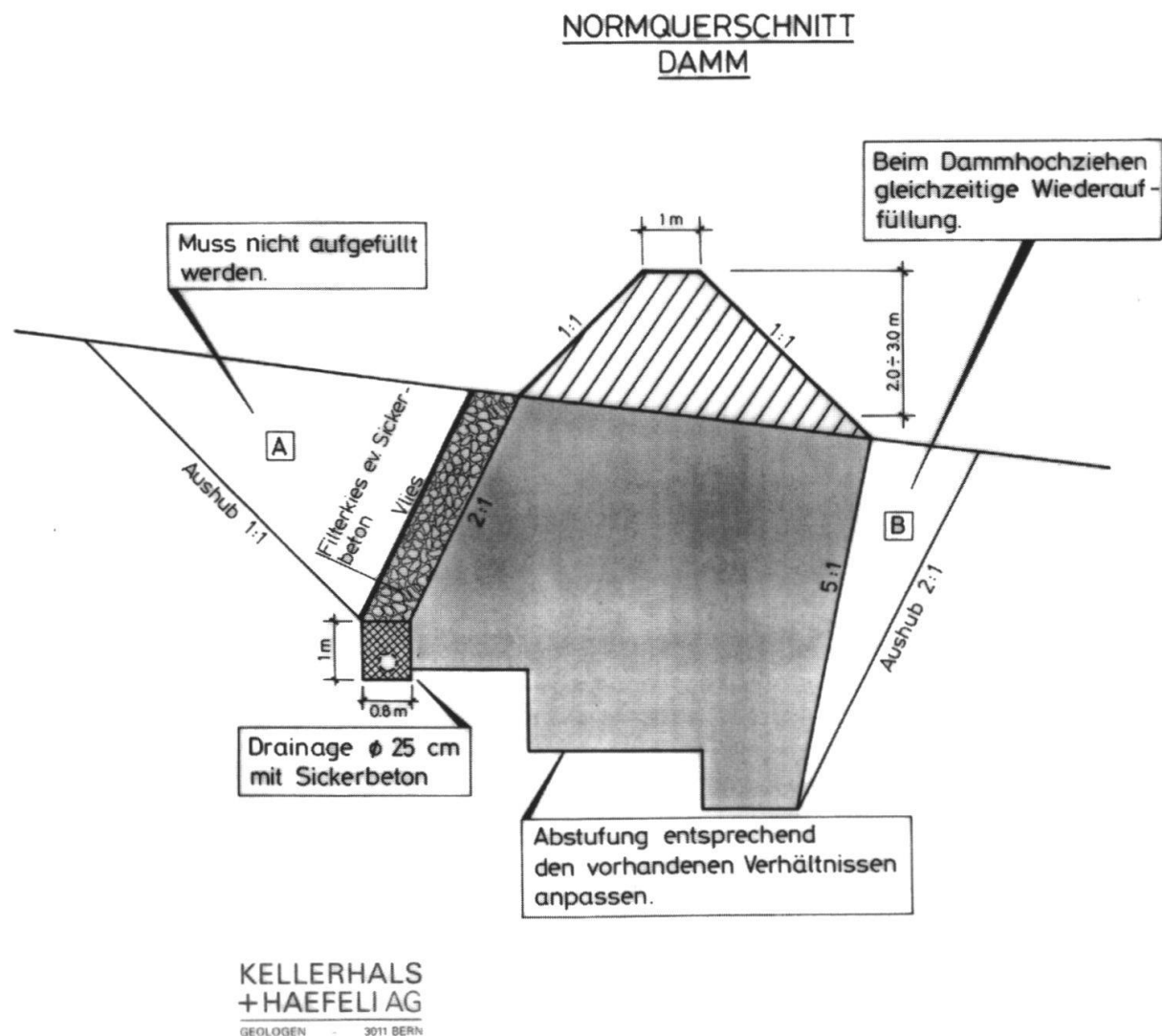


Fig. 2: Normprofil des Auffangdammes (ohne Steinschlagnetz)

Der Auffangdamm hat seine Schutzwirkung auch gegenüber Hangmuren gezeigt. Im Sommer 1997 lösten sich infolge starker Niederschläge Geröllmassen aus dem Rutschhang und flossen als «Rüfe» talwärts. Das Steinschlagnetz vermochte das blockige Geschiebe aufzuhalten, so dass sich nur mehr schlammiges Wasser und Geschwemmsel über das Kulturland ergossen.

7. Folgerungen

Der vorliegende Fall ist ein Beispiel für eine Hanginstabilität, welche kaum oder dann nur mit unverhältnismässigem Aufwand saniert werden kann. In Anbetracht der räumlich begrenzten Gefährdung (Korridor von ca. 400 m Breite) wäre eine totale Sanierung auch nicht zweckmässig, zumal mit den ausgeführten Massnahmen ein ausreichender und kostenmässig tragbarer (ca. Fr. 600'000.— inkl. Geologe) Objektschutz realisiert werden konnte.

Fallbeispiel Nr. 13:

Rutschungen im Tavetscher Zwischenmassiv, Vorderrheintal (Graubünden)

TOMASO LARDELLI*

Zusammenfassung

Das zwischen Aar- und Gotthardmassiv liegende Tavetscher Zwischenmassiv besteht im nördlichen Teil aus bis zu 80 % Kakiriten, d. h. aus Gesteinen mit Lockergesteinseigenschaften. Die ausserordentlich komplexen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse verunmöglichen das Erstellen einfacher, zuverlässiger Baugrundmodelle. Beim Ausbau der Kantonsstrasse zwischen Disentis und Sedrun musste ein Hang mit durchwegs kritischen Stabilitätsverhältnissen gequert werden; in einem Abschnitt erfolgte noch während der Planungsphase eine Rutschung. Kostengünstige Massnahmen waren möglich dank einer engen Zusammenarbeit zwischen Projektingenieur, Geotechniker und Geologe, einer sinnvollen Risikoanalyse und stufenweisen, den geplanten Massnahmen angepassten Untersuchungen. Grundsätzlich wurde die Stabilität leicht erhöht; je nach lokalen geologischen Verhältnissen und Risiko erfolgte dies schwergewichtig mittels Einbringen eines Schubwiderstandes, mittels Drainagen oder einer Kopfentlastung.

1. Ausgangslage und Problemstellung

Seit den 70er-Jahren wird die Kantonsstrasse zwischen Disentis und Sedrun in Teilstücken ausgebaut. Sie verläuft im Abschnitt Ruossna-Crestas-Arschella-Tscheppa am linken Talhang etwa 120 m über dem Vorderrhein durch teilweise offensichtlich instabiles (Crestas-Mulde und Arschella) und teilweise sehr steiles Gelände (Ruossna und Crestas-Hügel). Bautechnisch gesehen war damals der Crestas-Tunnel, auf den sich die geologischen Untersuchungen konzentrierten, das schwierigste Problem. Vor 1983 war nur die Rutschung in der Mulde westlich des Crestas-Hügels (Gebiet A1, Fig. 2) wegen einer Einsenkung des Strassenkörpers evident. Der Ausbau der Strasse schien mit relativ sanften Eingriffen möglich. Noch während der Projektierung ereignete sich aber bei Arschella (Gebiet C, Fig. 2) nach Starkniederschlägen eine Rutschung, welche die Kantonsstrasse und damit die Verbindung nach Sedrun–Oberalppass unmittelbar gefährdete. Dieses Ereignis bedingte aufwendige geologische Untersuchungen und Stabilisierungsmassnahmen, die auf die ebenfalls gefährdete Furka-Oberalp-Bahn (FOB) ausgedehnt wurden.

* Büro für Technische Geologie und Hydrogeologie, Steinbruchstrasse 12, 7002 Chur

2. Geologische Übersicht

Das Gebiet Crestas-Bugnei liegt im Tavetscher Zwischenmassiv (TZM), einem kleinen Massiv, das alpin tektonisch zwischen Gotthardmassiv im Süden und Aarmassiv im Norden eingequetscht ist. Dass das TZM ausserordentlich stark spröde deformiert wurde, ist seit langem bekannt (E. Niggli, 1944). Der Stand der Untersuchungen in den 80-er Jahren hat jedoch gezeigt, dass das Ausmass der Spröddeformation im nördlichen Teil des TZM alle Erwartungen weit übertrifft. Einen Eindruck von der Komplexität des Gebirges vermittelt das schematische Profil (Fig. 1). Nicht klar ist der Verlauf der Grenze TZM–Aarmassiv. Wir gehen davon aus, dass diese Grenze südlich des Bugnei-Granodiorit-Körpers verläuft (vgl. E. Niggli, 1944); dies bedeutet, dass auch ein ausgedehnter Bereich des Südrandes des Aarmassivs intensiv spröde deformiert und mit dem TZM verzahnt wurde (mächtige Kakiritonen im Druntobel oberhalb Sedrun ziehen nördlich des Bugnei-Granodiorites nach ENE). Dolomit-Fragmente in Kakiriten einer Bohrung (SB 60) unterhalb der FO-Bahn bei Arschella sind ein weiteres Indiz für diese These (Fortsetzung der Disentiser Zone?). Die vorwiegend aus Kakiriten (ca. 80%) bestehende Zone ist im Untersuchungsgebiet etwa 500 m mächtig. Im engeren Untersuchungsgebiet findet man anstehenden Fels (stark zerklüftete Schiefer) nur am Crestas-Hügel.

3. Durchgeführte Untersuchungen

Bei den Untersuchungen wurden von Anfang an alle im folgenden aufgeführten Methoden angewandt. Das Ausmass wurde einerseits bestimmt durch das Rutschereignis im Gebiet Arschella im Jahre 1983 und anderseits durch die vorgesehenen Baumassnahmen.

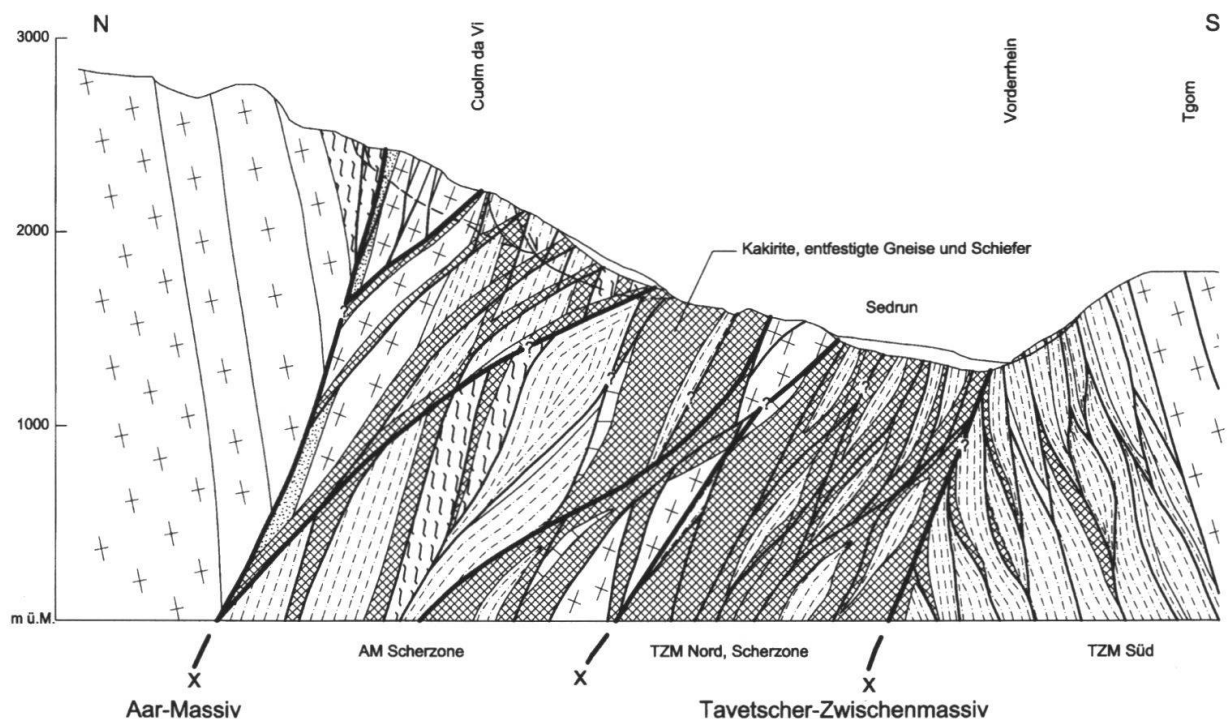


Fig. 1: Schematisches Querprofil durch das Tavetscher Zwischenmassiv (P. Zwahlen, T. Lardelli)

Feldkartierungen und Luftbilddauswertung haben erst zusammen mit den übrigen Methoden Hinweise für das Baugrundmodell geliefert.

Präzisionsnivellemente entlang Kantonsstrasse und FOB (sukzessive erweitert von 1974-1981 auf 3.3 km und 2 km) haben schnell und kostengünstig die wesentlichen Daten zur Abschätzung der Ausdehnung und der Bewegungsgeschwindigkeit der massgebenden Instabilitäten geliefert. Die *geodätischen Messungen* hingegen waren häufig schwer interpretierbar, sofern nicht mit anderen Methoden ein Kriechen der Deckschicht ausgeschlossen werden konnte. Für Untersuchungen wurden 24 *Kernbohrungen*, für Projektoptimierung und Bauwerkskontrollen weitere 21 Kernbohrungen abgeteuft (Länge meist 30-50 m, 1 Horizontalbohrung 80 m); die meisten Bohrungen wurden mit *Inklinometern* und *Porenwasserdruckgebern* ausgerüstet. Die geotechnische Charakterisierung von Fels und Lockermaterialien erfolgte aufgrund von *Laboruntersuchungen* an Proben aus Sondierbohrungen (Klassifikation sowie 7 direkte Scherversuche an Kakiriten). Eine Kontrolle der Laborwerte ermöglichte die Berechnung des Scherfestigkeitsbedarfs natürlicher Erosionsböschungen. Seit 1985 werden Quellen und Drainage-Ableitungen periodisch gemessen.

4. Geologisches Modell

Vom Rhein bis etwa 150 m nördlich der FOB besteht der Fels vorwiegend aus Kakiriten des TZM; nördlich angrenzend folgt der stärker zerklüftete Bugnei-Granodiorit (steil nach Norden einfallende, meist ebene Grossklüfte). Die Kakirite – tektonisch zerriebener Fels mit Lockergesteinseigenschaften – bestehen aus Silt, teilweise leicht tonig, mit mehr oder weniger Kiessand. Da es sich um Fels handelt, ist die Dichte sehr hoch. Die Scherfestigkeit ist relativ hoch (Reibungswinkel $\Phi = 26 - 34^\circ$, Kohäsion $c = 0 - 24 \text{ kN/m}^2$, im Mittel $\Phi = 33^\circ$, $c = 0 \text{ kN/m}^2$). Grobkörniges Moränenmaterial geringer Mächtigkeit (0-20 m) überlagert den Fels; oberhalb der FOB liegt zum Teil blockiger Gehängeschutt auf/in der Moräne.

Nach dem eiszeitlichen Rückzug der Gletscher setzten grossräumig Massenbewegungen (Rutschungen und Sackungen) im TZM ein; für den Bugnei-Granodiorit bedeutete dies eine Hangfussentlastung und führte zu „Toppling“-Bewegungen (Gebiet D, Fig. 2) und zunehmend zu Felsstürzen, die das Gebiet oberhalb der FOBahn erreichten (Anrisse E, Fig. 2). Das Phänomen von „Toppling“-Bewegungen in Kristallingesteinen, verursacht durch Rutschungen des aus Kakiriten bestehenden Hangfusses, ist im übrigen auf der nördlichen Talseite des Tujetsch weit verbreitet; eine der grossen Massenbewegungen der Alpen – am Cuolm da Vi nördlich Sedrun – hat dieselbe Ursache. Die tiefgreifenden Bewegungen stabilisierten sich mit der Aufschotterung der Talsohle durch die riesigen Schuttmassen des Bugnei-Baches.

Die spätere Erosion des Rheins führte wieder zu Instabilitäten im Gebiet Arschella-Tscheppa (Gebiet B, Fig. 2). Diese sind nun aber oberflächlicher Natur; d.h. im allgemeinen liegen die Gleitflächen an der Basis der Moräne. Nur im westlichen, oberen Teil des Gebietes B1 und im Gebiet B2 liegt die Gleitfläche in den Kakiriten. Eine sogenannte Übergangszone aus Kakiriten, Moräne sowie Hangschutt wurde ausgeschieden aufgrund der Interpretationsschwierigkeiten (teilweise handelt es sich nachweislich um ein Rutsch-»Mélange« aus diesen Materialien). Fast

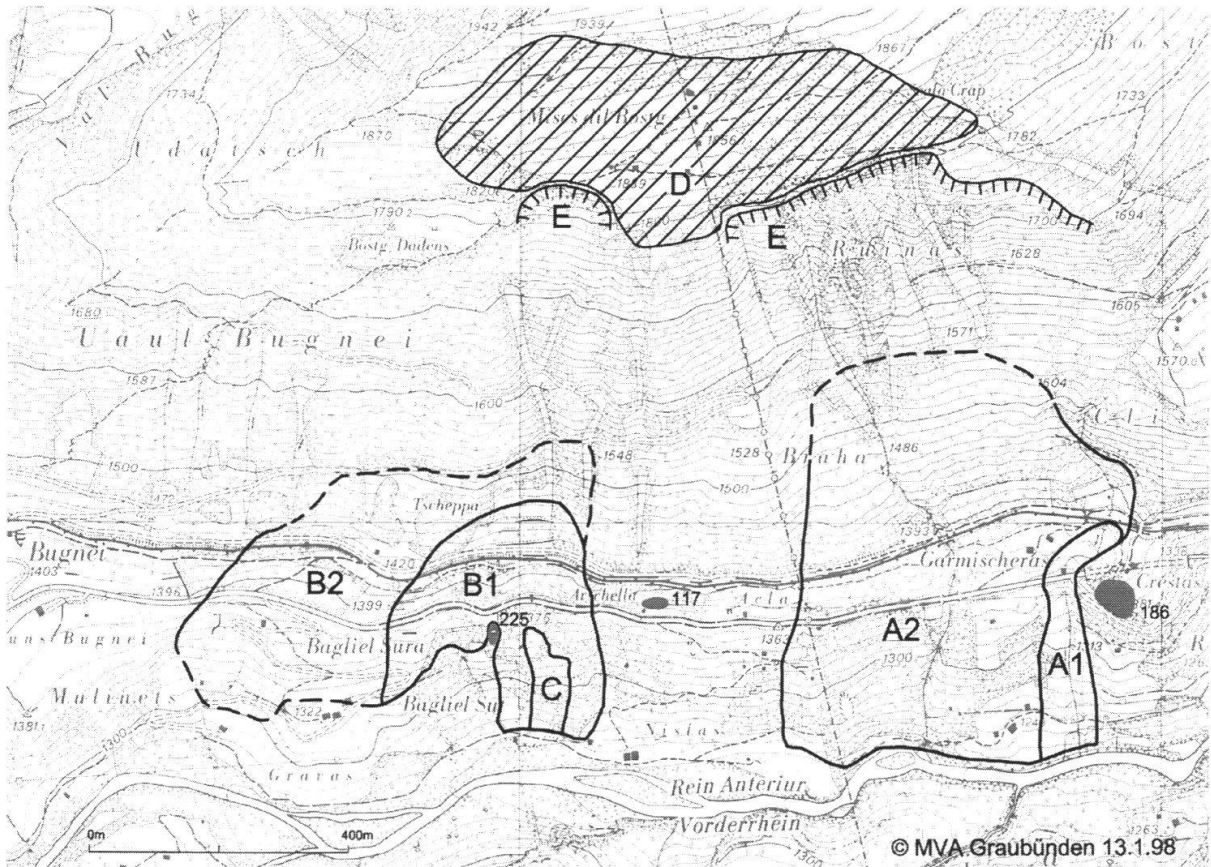


Fig. 2: Die Rutschgebiete im Bereich Crestas - Bugnei (zwischen Disentis und Sedrun); stabile Gebiete Punkte 186, 117, 225.

alle diese aktiven Rutschbewegungen erfolgen in Teilbruchkörpern in der Art des progressiven Bruchs (Fig. 5). Die Bewegungsgeschwindigkeiten betragen in den Gebieten A1 und B1 (vor 1983) 15 - 30mm/J, in den übrigen Gebieten wenige mm/J.

Zusätzlich zu den alten, heute inaktiven Massenbewegungen und den heute aktiven Rutschungen muss noch eine Kriechbewegung der Deckschicht von mehreren mm/J berücksichtigt werden, die weiträumig sehr häufig auftritt und die Interpretation der geodätischen Messresultate erschwert.

Die hydrogeologischen Verhältnisse sind entsprechend den geologischen sehr komplex: relativ gut durchlässig sind die Moräne, Bereiche innerhalb der Übergangszone und im Fels die zerbrochenen Gneise und Schiefer; sehr schlecht durchlässig sind die Kakirite. Die verwirrenden Resultate der vielen Porenwasser-Druckmessungen, der Messungen der Drainagen und Quellen sowie der Beobachtungen beim Bohren (meist trocken gebohrt!) widerspiegeln die komplexe Geologie. Im allgemeinen verlaufen die Bewegungen in den Rutschmassen gleichförmig – wobei ein Vorbehalt gemacht werden muss aufgrund der Messintervalle und Messgenauigkeiten. Starkniederschläge können massive Bewegungsschübe bewirken, wobei dies gerade bei den stärksten gemessenen Niederschlägen nicht der Fall war!

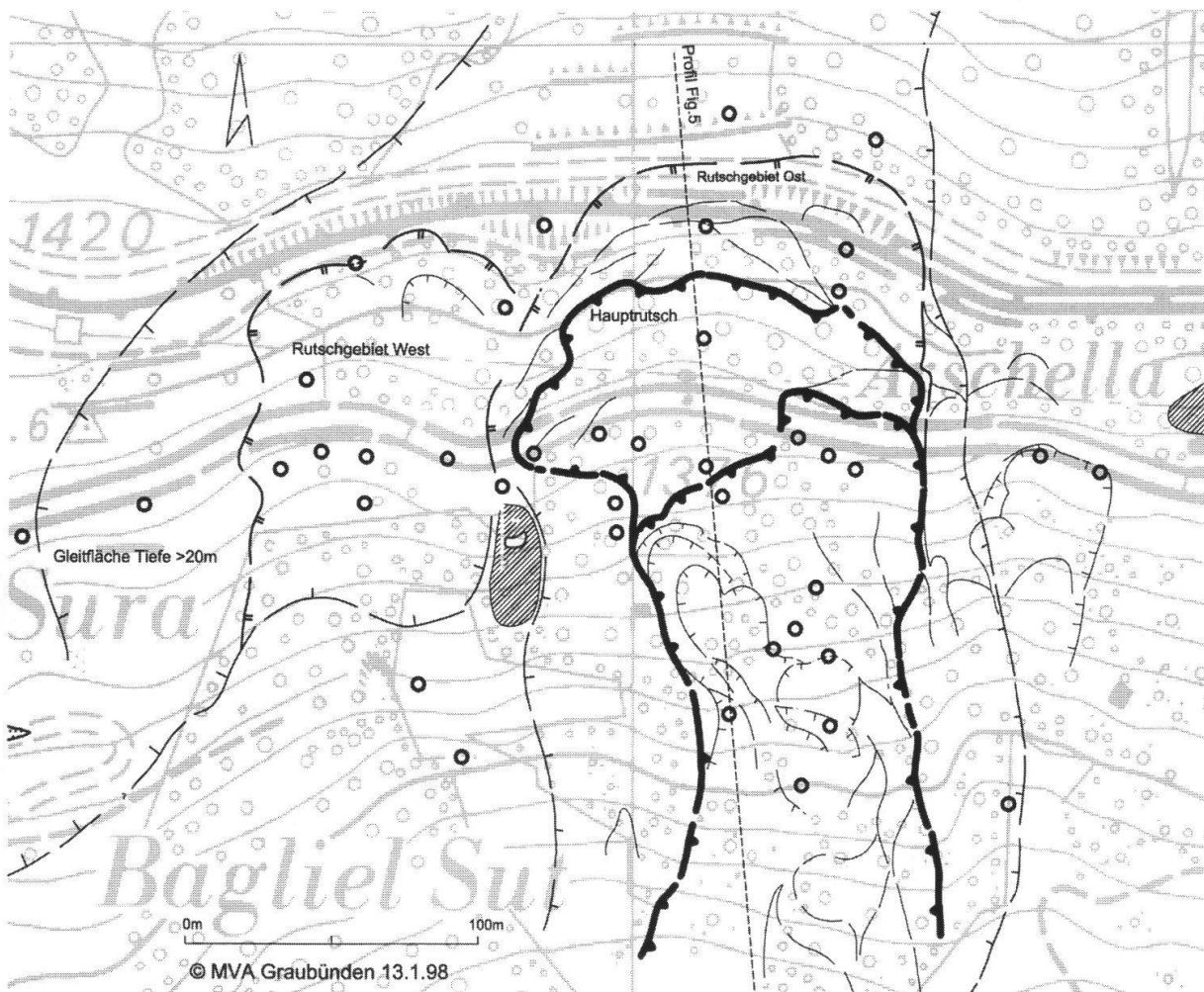


Fig. 3: Das Rutschgebiet Arschella (Gebiet B1, Fig. 2): Anrisse und Lage der Sondierbohrungen (Kreise); gesichert ruhiges Gebiet schraffiert.

5. Unvorhergesehene Ereignisse

Im Frühjahr 1983 erfolgte nach Schneeschmelze und stärkeren Niederschlägen bei Arschella (Fig. 2, Gebiet C) eine Hangmure mit dem Ausbruch einer neuen, nur wenige Tage mit mehreren l/s schüttenden Quelle; das Gebiet oberhalb rutschte schnell nach. In der Folge beschleunigten die Bewegungen im Ostteil des Gebietes B1 auf bis über 250mm/J (progressiver Bruch) und es bildeten sich zahlreiche Anrisse (Fig. 3). Dieses Ereignis zeigte anschaulich die geringen Stabilitätsreserven des Hanges. Merkwürdig ist die neue Quelle: In keiner Bohrung in der Nähe wurden relevante Porenwasserdrucke gemessen und eine im unteren Teil der Böschung angesetzte, 80 m lange Drainagebohrung hat nie mehr als wenige l/min Wasser gefördert!

6. Risikoanalyse

Im Gebiet Arschella (Fig. 3) wurden verschiedene Sanierungsvarianten aufgrund der geologischen Kenntnisse geprüft (Risikoabschätzung des Preisgerichtes aufgrund eines Ideenwettbewerbs):

- Brücken: Das Restrisiko unvorhergesehener Instabilitäten, die Schwierigkeit, in einem solchen Fall den Verkehr wieder sicherzustellen und die Kosten sprachen gegen diese Varianten; die FOB wäre nicht saniert.
- Tunnel (400-500 m): Sehr hohe Kosten in diesem gebrächen bis druckhaften Gebirge; FOB wäre nicht saniert.
- Hangsanierung mittels Hangfussanschüttung (über 300'000 m³): Aufgrund der relativ hohen Kosten, des grossen Eingriffs in die Landschaft und der Unwirksamkeit für untiefe Rutschungen im oberen Hangteil (Strasse und Bahn) wurde diese Variante verworfen.
- Hangdrainage: Aufgrund der sehr komplizierten und undurchsichtigen hydrogeologischen Verhältnisse sowie der sehr schlechten Durchlässigkeit der Kakirite wäre selbst bei einer systematischen Drainage bis in eine Tiefe von 20-30 m und entsprechend relativ hohen Kosten der Erfolg unsicher gewesen (teilweise ausgeführt als flankierende Massnahme).
- Hangsanierung mittels Ankern und Pfählen und «weicher» Ausbau der Strasse: Kosten und Flexibilität haben diese Lösung als diejenige erscheinen lassen, die die geringsten Risiken birgt (Ausführungsvariante).

7. Massnahmen und Erfolg

Crestas-Mulde (Gebiet A1, Fig. 2):

- Oberflächendrainage der Mulde auf der Oberfläche der Kakirite (hier untief!)
- Kopfentlastung durch grossen Abtrag der Böschung nordwestlich der Mulde
- Drainagewirkung des Crestas-Tunnels und dessen Voreinschnitt
Die Vermessung zeigt, dass dieses Gebiet heute stabil ist (früher 5-30 mm/Jahr); wichtig ist dies insbesondere für das Tunnelportal West des Crestas-Tunnels.

Garmischeras (Gebiet A2, Fig. 2): Infolge der geringen Bewegungsbeträge drängt sich eine Sanierung nicht auf. Studiert werden Massnahmen wie im Gebiet B zur leichten Erhöhung der Stabilitätsreserven (sehr kleine Rutschungen am Hangfuss deuten auf geringe Stabilitätsreserve).

Arschella (Gebiet B1+C, Fig. 2): Das Sanierungskonzept (Ingenieurbüro Dr. Voll-enweider, Zürich) bestand darin, mit Ankern und zurückverankerten Pfählen einen Schubwiderstand in den Hang zu bringen, der die Gleitsicherheit um ca. 10% erhöht. Der Erfolg wird mit Messungen geprüft (Inklinometer, Geodäsie). Voraussetzung war eine sehr detaillierte geologische Untersuchung, damit die Pfahl- und Ankerlängen der Tiefe der Teilbruchkörper-Gleitflächen angepasst werden konnten, und der Schubwiderstand den bewegten Massen.

Entsprechend der in Teilbruchkörper aufgelösten Struktur der Rutschung wurden die Massnahmen im Hang gestaffelt angeordnet (Fig. 4+5):

- Runsenverbau mit Steinkörben zuunterst (Hangmure 1983)
- Ankerplatten mit Ankern im untersten Hangteil
- 2 verankerte Pfahlwände unterhalb Kantonsstrasse und FOB (Steinkorbmauer zur Sicherung der Baupiste)
- Sofern aufgrund der Sondier-, Anker- und Pfahlbohrungen ein Erfolg absehbar war, wurden Drainagebohrungen ausgeführt.
- Zur Sicherung gegen Steinschlag wurden oberhalb der FOB Steinschlagwälle errichtet.
- Grünverbau und Aufforstung des ganzen Hanges

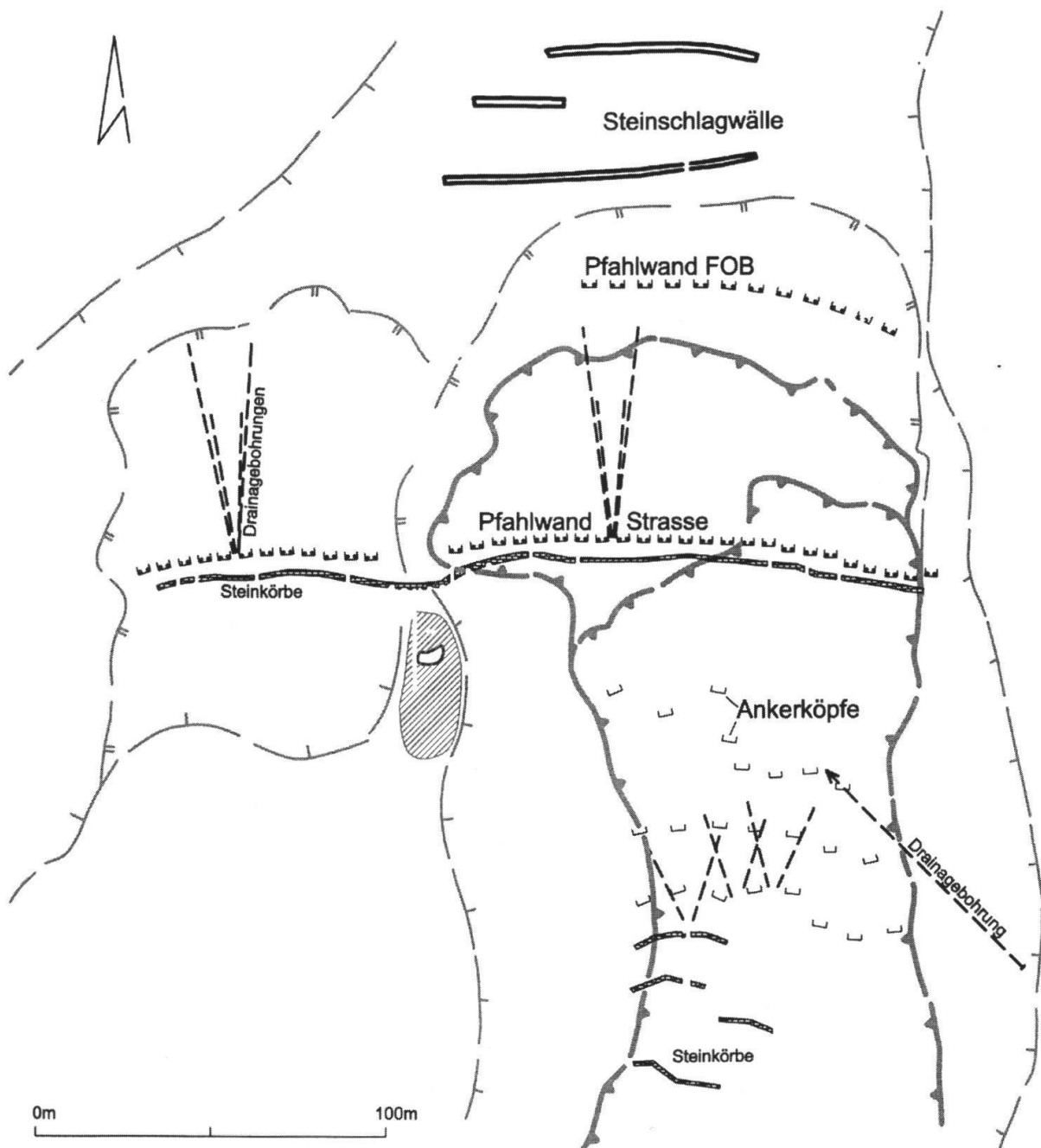


Fig. 4: Bauliche Massnahmen im Gebiet Arschella (B1, Fig. 2).

Mit diesen 1990-92 durchgeführten Massnahmen wurde die Rutschung weitgehend stabilisiert (0 - 2.5mm/J). Nach wie vor in Bewegung sind Teilbruchkörper mit relativ tiefen Gleitflächen im westlichen, oberen Teil des Gebietes B1 und das Gebiet B2 (ca. 5mm/J); die ausgeführten Werke werden – zumindest vorläufig – durch diese Teilbruchkörper nicht belastet. Rutschung und Bauwerk werden weiter überwacht, sodass bei Bedarf zusätzliche Schubwiderstände eingebracht werden können.

8. Schlussfolgerungen

Einige Erkenntnisse aus den Untersuchungen im Raum Crestas-Bugnei verdienen besondere Beachtung:

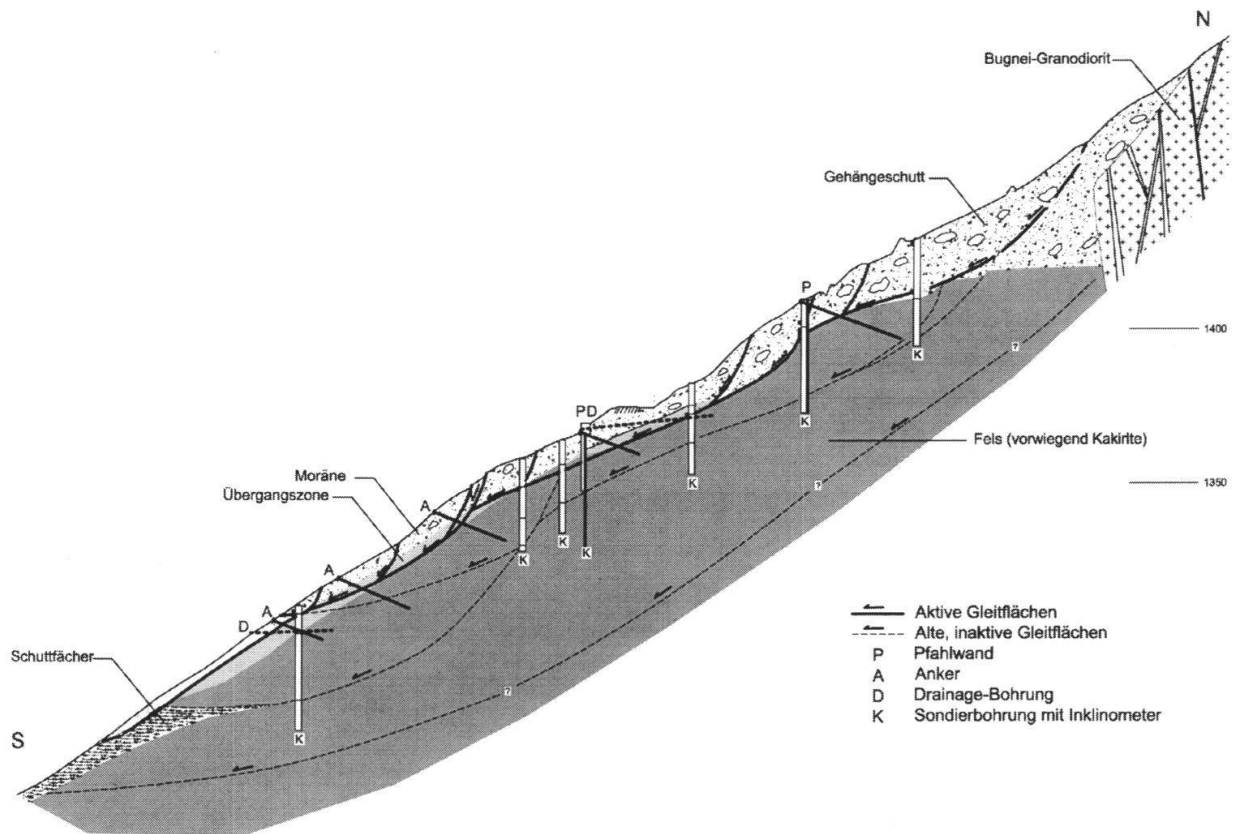


Fig. 5: Profil durch die Rutschzone Arschella (Profilsur vgl. Fig. 3).

Geologie: In von Quartär bedeckten Gebieten sind auch in der geologisch gut untersuchten Schweiz noch Überraschungen möglich (gewaltige Verbreitung der Kakirite im TZM). Die Quartärgeologie ist vorallem in alpinen Gebieten noch sehr lückenhaft bekannt. Erst geologische Untersuchungen bewahren vor Fehlschlüssen.

Rutschungen: Komplexe Rutschungen lassen sich nur mit einem beträchtlichen Aufwand auf für den Geotechniker brauchbare, einfache Baugrundmodelle reduzieren. Brauchbar heisst, dass die bauwerksabhängigen Risiken abschätzbar sind.

Risikoanalysen müssen in enger Zusammenarbeit zwischen Projektierenden, Geotechnikern und Geologen erfolgen. Dabei sind Gespräche fruchtbarer als lange Berichte. Im vorliegenden Fall haben die Risikoanalysen zu aufwendigen Untersuchungen, schlussendlich aber zu beträchtlichen Einsparungen geführt – bei optimalem Risiko/Nutzen-Verhältnis.

Literatur:

NIGGLI E. 1944: Das westliche Tavetscher Zwischenmassiv und der angrenzende Rand des Gotthardmassivs. – Schweiz. Mineral. Petr. Mitt. 24/1-2.

Übersichtspläne in den Figuren reproduziert mit Bewilligung des Meliorations- und Vermessungsamtes des Kantons Graubünden vom 13.1.98.

Leitbild der Arbeitsgruppe AGN

Die Erscheinungen, die der Mensch als Naturgefahren wahrnimmt, sind natürliche, stetig oder spontan ablaufende Prozesse. Dabei handelt es sich um Vorgänge, die sich im Rahmen der dauernden Veränderungen der Erdoberfläche abspielen. Ob wir diese Prozesse als eigentliche Gefahr empfinden, ist von unserer diesbezüglichen Exposition und dem subjektiven Empfinden jedes Einzelnen abhängig.

Derartige geologische Prozesse haben sich während der ganzen Erdgeschichte abgespielt. Sie treten heute wahrscheinlich nicht häufiger auf als in früheren Zeiträumen, auch wenn der Mensch durch seine Aktivitäten zunehmend in ungünstiger Weise in das hydrologische Regime der Erde eingreift.

Dass wir heute Naturgefahren aber als besondere Bedrohung empfinden, hat verschiedene Ursachen. Einerseits erschliesst der Mensch ohne Hemmungen Gebiete, die früher wegen der dort herrschenden Gefahren aus Ehrfurcht vor den Naturgewalten gemieden wurden. Andererseits nimmt die Bereitschaft des Menschen, gewisse Risiken akzeptieren zu können, zunehmend ab: unsere Risikokultur hat sich verändert.

Für eine seriöse Beurteilung einer Naturgefahr ist es unerlässlich, dass die geologischen Prozesse, welche die Gefahr bewirken, in ihrer Ursächlichkeit und ihren Zusammenhängen betrachtet und analysiert werden. Eine gesamtheitliche naturwissenschaftliche Betrachtung ist die Voraussetzung für die eigentliche Beurteilung der Gefahr, die Abschätzung der Risiken und die Massnahmenplanung. Nur punktuelle Massnahmen oder Symptombekämpfungen sind in der Regel ungenügend, um das Ziel, einen nachhaltig wirksamen Schutz von Mensch und Sachwerten, zu erreichen.

Die Ausführungen in den vorangehenden Kapiteln machen deutlich, dass die Beurteilung der Gefahren von Massenbewegungen schwierig und oftmals auch heikel ist. Neben einer guten Naturbeobachtung sind für die raumzeitliche Erfassung solcher Prozesse Fachkenntnis und Erfahrung wichtig. Die Erarbeitung der für das Gefahrenmanagement notwendigen geologischen Modelle ist oft mit Unsicherheiten behaftet. Es muss akzeptiert werden, dass auch bei korrekter und sorgfältiger Durchführung der Gefahrenbeurteilung wegen ungenügender Grundlagen Ermessensspielräume bestehen bleiben. Diesem Umstand kann damit begegnet werden, dass ein komplexer Fall in Form eines Modells mit verschiedenen möglichen Szenarien dargestellt wird, welche bezüglich ihrer Wahrscheinlichkeit gewertet werden. Bei Grossrisiken kann es zweckmässig sein, die Meinung mehrerer Fachleute einzuholen (second opinion).

Es wird oftmals auch unterschätzt, dass Gefahrenbeurteilungen eine grosse rechtliche Tragweite haben. Häufig sind grosse Vermögenswerte oder gar Menschenleben betroffen. Gefahrenbeurteilungen müssen deshalb folgende zwei Postulate erfüllen:

- a) Sachliche Richtigkeit (Einsatz der anerkannten Methoden)
- b) Nachvollziehbarkeit (Transparenz bezüglich der eingesetzten Methoden und Gedankengänge bei der Beurteilung).

Es gehört zum Aufgabenkreis des Geologen, Naturgefahren zu erkennen, deren Ursache und Wirkung zu analysieren, Gefahrengebiete zu kartieren, Gefahr und Risiko objektiv zu beurteilen, angemessene Massnahmen vorzuschlagen und die langfristigen Wirkungen von Gefahren zu überwachen. Dank seiner spezifischen naturwissenschaftlichen Ausbildung ist der Geologe befähigt, Naturgefahren in ihrer Gesamtheit bezüglich Raum, Zeit und Geodynamik (Langzeitentwicklung) zu erfassen.

In der Ausbildung des Geologen müssen in Zukunft noch in vermehrtem Mass die Schwerpunkte auf der Förderung der folgenden Fähigkeiten liegen:

- die Fähigkeit, naturwissenschaftliche Phänomene genau zu beobachten,
- die Fähigkeit, vom Kleinen (Einzelbeobachtung) auf das Grosse (natürliche Abläufe) zu schliessen,
- die Fähigkeit, die Kausalität von natürlichen Abläufen zu erkennen und zu werten,
- die Fähigkeit, Naturvorgänge in ihrer Ursache und Wirkung in grösseren zeitlichen und räumlichen Zusammenhängen zu betrachten.

Die Qualität von Gefahrenbeurteilungen ist ein wichtiges Anliegen der AGN. Sie unterstützt deshalb die Ausbildung und die berufliche Weiterbildung von Geologen in diesem wichtigen Fachbereich und arbeitet aktiv bei der Erarbeitung von Instrumenten zur Qualitätssicherung mit.

Weil die Beurteilung und das Management von Massenbewegungsgefahren eine typisch interdisziplinäre Aufgabe ist, strebt die AGN eine Zusammenarbeit und einen ständigen Erfahrungsaustausch mit andern Fachdisziplinen, wie z.B. Forst, Wasserbau, Raumplanung, Ingenieurwesen an.

Gute geologische Karten sind eine wichtige Grundlage für die Beurteilung von Naturgefahren. Die AGN unterstützt die rasche Vervollständigung des geologischen Kartenwerkes der Schweiz.

Stratégie du groupe de travail DNG

Les dangers naturels apparaissent sous la forme d'événements permanents ou spontanés. Ils engendrent parfois des modifications durables de notre environnement.

Ces phénomènes géologiques se sont déroulés durant toute l'histoire de la Terre. Ils ne se produisent probablement pas plus fréquemment aujourd'hui qu'hier, bien que l'homme modifie le cycle hydrologique, par ses nombreuses activités d'une façon croissante et défavorable.

Aujourd'hui, si nous devons considérer les dangers naturels comme des menaces particulières, ceci est à mettre en relation avec plusieurs causes. D'une part, l'homme occupe sans précaution des régions qu'autrefois on évitait par crainte des forces

de la nature. D'autre part, l'acceptabilité des risques au sein de la population a fortement diminué: notre perception du risque a changé.

Une évaluation sérieuse des dangers naturels nécessite l'analyse des processus géologiques qui sont en cause. Une appréciation globale et naturaliste constitue toujours le point de départ d'une évaluation du danger, d'une estimation du risque et de la planification des mesures. Des mesures ponctuelles et la lutte contre les symptômes sont en général insuffisantes pour obtenir une protection efficace et durable des hommes et des biens de valeur notable.

Le contenu des paragraphes précédents montre clairement que l'évaluation des dangers dus aux mouvements de terrain est difficile et parfois même épineuse. L'expérience et la connaissance scientifique de ces phénomènes doivent s'allier à une bonne observation du terrain. L'élaboration d'un modèle géologique, indispensable pour la gestion des dangers, est souvent limitée par des incertitudes. On doit accepter que, malgré une évaluation précise et correcte des dangers, il subsiste certaines imprécisions en raison de données de base lacunaires. Lors d'un cas complexe, cette situation peut être améliorée par la présentation d'un modèle comprenant différents scénarios probables, avec une appréciation de leurs probabilités d'occurrence. Lors de grands risques, il serait souhaitable d'avoir l'avis de plusieurs experts («second opinion»).

L'évaluation des dangers a une grande portée juridique et cela est très souvent sous-estimé. Fréquemment, des vies humaines et des biens matériels considérables sont en jeu. Cette détermination des dangers doit par conséquent suivre deux postulats essentiels:

- exactitude scientifique (application de méthodes connues)
- reproductibilité du travail (transparence sur les méthodes utilisées et l'argumentation pour l'évaluation du danger).

Il appartient aux tâches du géologue d'identifier les dangers naturels, leurs causes et leurs effets, de cartographier ces phénomènes, d'évaluer les dangers et les risques, de proposer des mesures adaptées et d'observer les effets à long terme de ces dangers. De par sa formation spécifique, le géologue est armé pour apporter une vision large et complète de ces phénomènes naturels par la prise en compte de l'espace, de la 3^{ème} dimension (ce qui se passe en profondeur) et de la 4^{ème} dimension (géodynamique sur des temps courts et longs).

A l'avenir, les hautes écoles devront approfondir la formation des géologues dans ce domaine spécifique des dangers naturels, pour développer encore les compétences suivantes:

- observation précise et scientifique des phénomènes
- interprétation à l'échelle générale (processus naturels) à partir d'observations particulières
- identification et évaluation de la causalité de ces processus
- prise en considération des causes et des effets dans l'espace et dans le temps de ces processus naturels.

Pour le groupe de travail DNG (Dangers naturels et Géologie), la qualité des prestations du géologue dans l'évaluation des dangers constitue un thème prioritaire. Il soutient l'organisation de cours de spécialisation pour les jeunes géologues et la

formation continue des géologues expérimentés. Il contribue activement à l'élaboration d'instruments pour le contrôle de qualité.

Le groupe de travail DNG soutient aussi l'effort de cartographie géologique du territoire, car une connaissance approfondie de l'environnement géologique est indispensable pour comprendre ces processus naturels.

L'évaluation et la gestion des dangers dus aux mouvements de terrain sont un travail fondamentalement interdisciplinaire et le groupe DNG est convaincu de la nécessité d'une collaboration avec d'autres spécialistes, par exemple dans le domaine du génie forestier de l'aménagement des cours d'eau, de l'aménagement du territoire ou du génie civil.

Modello metodologico del gruppo di lavoro «Geologia e Pericoli naturali»

Le manifestazioni percepite dall'uomo come pericoli naturali sono processi continui oppure occasionali che risultano da mutamenti naturali e persistenti della superficie terrestre. Percepire la conseguenza come pericolo dipende dalla relativa esposizione e dall'atteggiamento individuale del singolo essere umano. Processi geologici, talvolta con conseguenze devastanti, si sono svolti durante tutta la storia della crosta terrestre. La loro attuale frequenza è probabilmente paragonabile a quella delle ere passate anche se le attività odierne dell'uomo influiscono maggiormente sul regime idrologico terrestre.

Il fatto che oggi i pericoli naturali vengano percepiti come eventi particolarmente minacciosi è dovuto a varie cause. Da un lato l'uomo sta invadendo delle zone che nel passato sono state evitate per rispetto delle locali forze della natura, conosciute per esperienza personale oppure attraverso informazioni tramandate da generazione in generazione. Dall'altro lato, la disponibilità dell'uomo ad accettare certi rischi si sta riducendo progressivamente poiché la nostra «cultura del rischio» è cambiata.

Per una valutazione seria di un pericolo naturale è indispensabile l'esame dei processi geologici che sono all'origine del fenomeno mediante osservazioni e analisi della causalità e delle concatenazioni. Un esame scientifico integrativo è la premessa per le considerazioni sul pericolo, per la valutazione del rischio e per la pianificazione degli interventi. In generale una limitazione ad interventi locali oppure l'applicazione di misure mirate a curare solo i sintomi sono insufficienti per ottenere una protezione duratura della vita umana e dei valori materiali.

Le considerazioni contenute nei capitoli precedenti illustrano le difficoltà che incontrano le valutazioni dei pericoli dei movimenti di massa. Gli accertamenti necessari per la definizione spaziale e temporale di questi processi richiedono oltre ad una spiccata capacità osservativa della natura anche l'esperienza e una solida conoscenza in materia.

I modelli geologici elaborati per la gestione del pericolo contengono spesso delle incertezze dovute al fatto che le condizioni naturali non possono essere accertate in

modo perfetto. Rimangono perciò sovente delle divergenze di giudizio nonostante una valutazione del pericolo eseguita in modo corretto e scrupoloso. Casi del genere vengono affrontati con la presentazione di un modello complesso sotto forma di vari scenari a ciascuno dei quali viene attribuita una probabilità. Nel caso di grandi rischi è opportuno consultare ulteriori specialisti per ottenere delle opinioni indipendenti.

Frequentemente viene sottostimato l'aspetto giuridico della valutazione del pericolo che spesso concerne valori materiali importanti e talvolta anche vite umane. Le valutazioni del pericolo devono perciò adempiere ai seguenti due postulati:

a) correttezza fattiva (impiego di metodi generalmente accettati e approvati) b) riproducibilità (trasparenza in riguardo ai metodi impiegati e alle interpretazioni). Il riconoscimento dei pericoli naturali fa parte delle attività del geologo che dispone della formazione e dell'esperienza necessaria per l'analisi delle cause e degli effetti, per la cartografia delle zone di pericolo e per la valutazione oggettiva del pericolo e del rischio, come pure per l'elaborazione di proposte di misure adeguate per il controllo e per il risanamento. Grazie alla sua formazione scientifica il geologo è in grado di giudicare i pericoli naturali nel loro insieme e l'influsso che hanno nello spazio e nel tempo, così come valutare la geodinamica (comportamento a medio e a lungo termine).

In futuro la formazione di base dei geologi deve porre maggior enfasi sullo sviluppo delle seguenti nozioni:

- la precisa osservazione dei fenomeni scientifici
- la sintesi dei singoli dati (osservazioni di dettaglio) in un quadro complessivo (comprensione dei processi naturali)
- il riconoscimento della causalità di eventi naturali
- la collocazione di eventi naturali (con la loro causalità e il loro effetto) nei grandi contesti temporali e spaziali

La qualità del lavoro di valutazione dei pericoli è uno dei principali traguardi del gruppo di lavoro, che sostiene perciò la formazione dei giovani geologi e l'aggiornamento dei professionisti attivi nel ramo. Il gruppo di lavoro collabora attivamente alla stesura degli strumenti necessari per il controllo della qualità.

Visto che la valutazione e la gestione dei pericoli di movimenti di massa sono tipicamente dei compiti interdisciplinari, il gruppo di lavoro persegue la collaborazione e lo scambio di esperienze con i professionisti di altri rami (ingegneria forestale, idraulica ed economia delle acque, pianificazione territoriale, ingegneria civile).

La disponibilità di carte geologiche di qualità elevata è una base indispensabile per la valutazione dei pericoli naturali; il gruppo sostiene perciò il rapido completamento della cartografia geologica della Svizzera.