

Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 90 (1997)
Heft: 3

Artikel: Zur Prognose von Massenbewegungen
Autor: Moser, Michael
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-168169>

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: 28.01.2026

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

Zur Prognose von Massenbewegungen

MICHAEL MOSER¹

Key words: Forecast possibilities, mass movements, rock slides, sagging of mountain slopes, soil slip

ZUSAMMENFASSUNG

Obwohl eine Prognose von Massenbewegungen immer die Beantwortung von Fragen des «Wo», des «Wie» und des «Wann» zum Ziele hat, so sind doch die Schwerpunkte und die Realisierung solcher Prognosen je nach Typ der Massenbewegung sehr verschieden. In dieser Darstellung werden Möglichkeiten bei Hanganbrüchen, Talzuschüben und Felsstürzen aufgezeigt und an einigen Beispielen einzelne Prognoseschwerpunkte herausgearbeitet. Bei den Hanganbrüchen geben auf die Frage des «Wo und Wie» besonders bodenmechanische Eigenschaften, die Hangneigung, die Hangmorphologie und die Vegetation Auskunft. Für die zeitliche Eingrenzung können Intensität und Dauer der Niederschläge herangezogen werden. Bei den grossflächigen und tiefgreifenden Kriechbewegungen der Talzuschübe müssen besonders für aufwendige Verbauungsmassnahmen, Angaben über Bewegungsgeschwindigkeiten, den genauen zeitlichen Ablauf und über die Steuerung dieser Kriech- und Gleitprozesse gemacht werden. Bei den Felsstürzen stehen hinsichtlich einer Prognose Fragen der Größenordnung, der Reichweite und des Zeitpunktes des Versagens im Vordergrund. Im Unterschied zu den Hanganbrüchen in Lockergesteinen ist ein Versagen nur in Ausnahmefällen direkt mit der Intensität und Dauer der Niederschläge zu sehen. Aussagen zum Zeitpunkt des Versagens bzw. zu einem Zeitfenster werden nur mit kontinuierlichen Messungen der Verschiebungsbeträge zu erreichen sein. Solche Prognosemöglichkeiten werden an einem Bergzerreibungsfeld mit der Ablösung grosser Felsstürme am Rande aufgezeigt.

ABSTRACT

Although forecasts of mass movements always require answers to the question “where”, “how” and “when”, the main focus and the implementation of such forecasts are very different, depending on the type of slope movement. This paper demonstrates the various kinds of forecasts for soil slips, sagging of mountain slopes and rock slides and illustrates the individual focuses of forecasts with a few examples. For soil slips the questions of “where and how” can be answered particularly by geotechnical properties, slope inclination, morphology and vegetation cover. The period of time involved can be drawn upon the intensity and duration of rainstorms. Forecasts for large-scale and deep-seated creep processes in sagging of mountain slopes affecting necessary and complex protective works call for information on the rates, the course of creep in time and the control of such deep-seated creeping masses. Forecasts for rock slides rely primarily on the scale, the reach and the time of failure. In contrast to soil slips failure is only exceptionally to be seen directly in conjunction with the intensity and duration of rainstorms. Forecasts for the time of collapse or for the time window can be obtained only from continuous monitoring of displacement. Such forecasts are illustrated by a mountain splitting area with detachment of huge rock pinnacles.

1. Einleitung

Eine detaillierte Prognose von Massenbewegungen stellt einen wichtigen Beitrag zur Angabe möglicher Gefahrenarten, somit der Gefahrenstufe und letztendlich ein unverzichtbares Instrument zur Erstellung der Gefahrenzonenpläne im alpinen Raum dar. Dieser Sachverhalt ist in den letzten 20 Jahren immer wieder betont worden. So kommt schon Grubinger 1976 zu dem Schluss, dass für ein umfassendes Schutzkonzept neben aktiven technischen und ingenieurbiologischen Schutzmassnahmen passive vorbeugende Massnahmen notwendig sind.

Die Abgrenzung von Gefahrenherden und gefährdeten Gebieten stellt das Aufgabengebiet der Geotechnik im umfassenden Sinne dar. Im speziellen bedeutet dies eine Angabe der Grösse, der Form, des Vorganges und besonders der Dynamik potentieller Hangbewegungen.

Aufgrund der Komplexität der Vorgänge werden angefangen von geologisch-morphologischen über boden- und felsmechanischen Untersuchungen bis hin zu forsttechnischen Analysen notwendig sein.

¹ Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossgarten 5, D-91054 Erlangen

Ausführlicher erläutert werden solche Prognosemöglichkeiten einerseits an spontanen Lockergesteins-Rutschungen («soil slips»), andererseits an tiefgreifenden, sich langsam vollziehenden Grosshangbewegungen (Talzuschüben, «sagging of mountain slopes»). Dagegen erfolgt bei den Hangbewegungen in Form von Felsgleitungen («rock slides») nur ein Anreissen der Problematik.

Vorbeugende Maßnahmen

I. Aktiver technischer und ingenieur-biologischer Schutz

punktuell

linear

flächenhaft

II. Passiver Schutz

Rechtsnormen und Zonenausscheidung

Abgrenzung von Gefahrenherden und gefährdeten Zonen

Ausscheidung von Wasser- und Geschiebretentionsräumen (mod. n. Grubinger 1976)

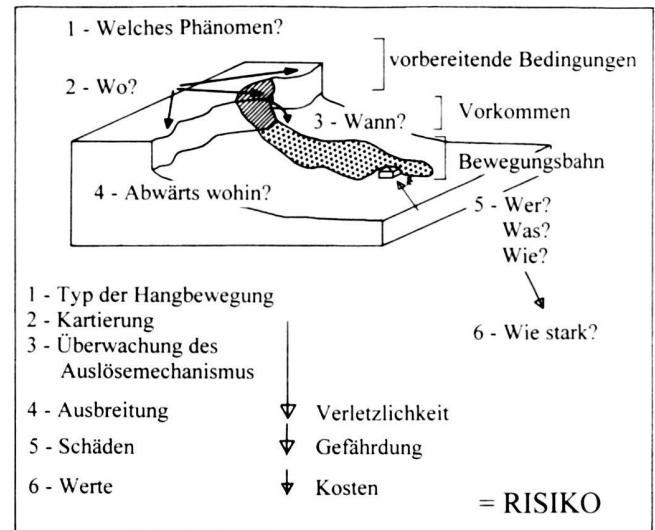


Fig. 1. Parameter der Prognosen von Hangbewegungen (mod. n. Leroi 1996).

Diese Massenbewegungen stellen besonders im alpinen Raum eine dauernde oder in gewissen Zeitabständen immer wiederkehrende Gefahrenquelle für Siedlungen, Infrastrukturen und Bauwerke dar (Fig. 1).

Für oben angeführten Massenbewegungen wird die Prognose jeweils Schwerpunkte zu setzen haben, wobei aber Fragen des «Wie», des «Wo» und des «Wann» aber auch Kriterien bezüglich der Wirkung auf Gebäude und bautechnische Anlagen und Kriterien bezüglich der Gefährdung von Personen im Vordergrund stehen.

2. Kleinflächige Rutschungen in schwach bindigen bis rolligen Lockergesteinen («soil slips»)

Diese zumeist kleinflächigen ($< 1.000 \text{ m}^2$) aber oft mit nicht zu unterschätzender Dynamik auf den Unterhang versehenen Hangbewegungen stellen bei den immer wiederkehrenden Niederschlagskatastrophen besonders in rolligen bis schwach bindigen Lockergesteinen ein besonderes Gefahrenpotential dar. Dieser Typ von Lockergesteinen nimmt sowohl als Verwitterungs- und Hangschutt von Mergeln, Sandsteinen und kristallinen Schiefern als auch als allochthone Lockermassen in Form von Moränen, fluvioglazialen Sedimenten usw. grosse Areale unserer alpinen Hangbereiche ein. Wie die Analysen von extremen Niederschlagsereignissen z. B. 1965, 1966 und 1975 im österreichischen Südalpenraum, 1987 im Veltlin und Tessin und neuerdings wiederum 1994 in Piemont gezeigt haben, können signifikante Parameter angegeben werden, die Grösse, Vorgang und Dynamik solcher Hangbewegungen bestimmen (z. B. Moser & Hohensinn 1983, Guzetti et al. 1992, Aleotti et al. 1996, Polloni et al. 1996).

In der nachfolgenden Schemaskizze können jene Parameter entnommen werden, die eine detaillierte Prognose solcher Hangbewegungen ermöglichen.

Diskussion der einzelnen Parameter:

Ausbildung der Lockergesteine:

Durch eine Klassifikation der Lockergesteine sowohl in geologischer als auch in bodenmechanischer Hinsicht wird es möglich sein, Angaben zur Stabilität im normalen und auch für den aussergewöhnlichen Zustand zu machen. Besonders letztgenannter, der untergeordnet mit Starkregen kurzer Dauer aber vorwiegend mit hohen Ein- und Zweitagesummen in Zusammenhang zu bringen ist, lässt bei bekannten Lockergesteinseigenschaften erste Schlüsse auf Form und Vorgang der Massenbewegung zu. Wie die Untersuchungen im alpinen Bereich der letzten Jahre gezeigt haben, waren vor allem gemischtkörnige Böden im bodenphysikalischen Sinne betroffen (DIN 18196 → Gu, Su; USCS → GC).

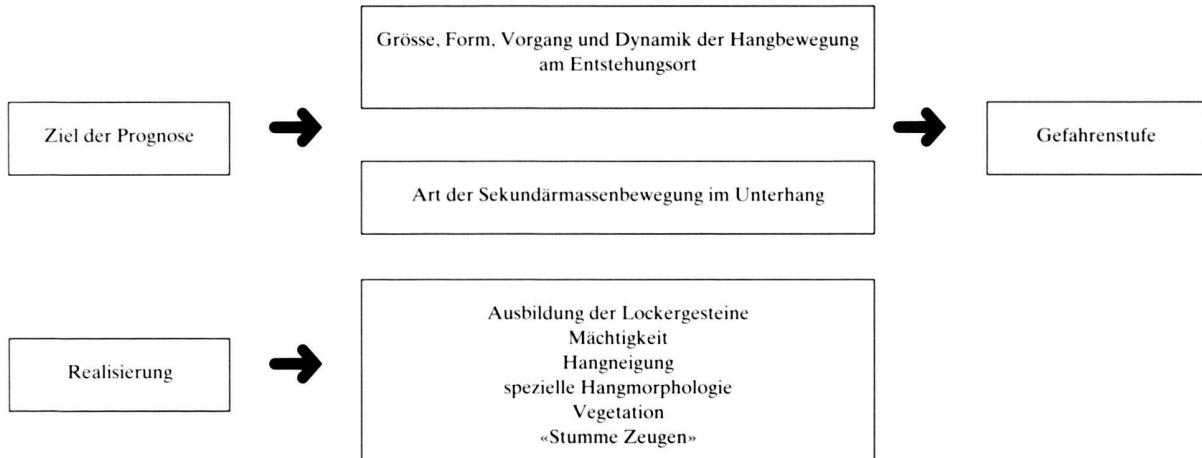
Mächtigkeit:

Die Mächtigkeit einer Lockerüberlagerung wird sehr stark Grösse und Vorgang und damit auch die Dynamik solcher Hangbewegungen beeinflussen. Während sich auf geringmächtigen Lockergesteinsdecken vorwiegend seichtschalige Anbrüche mit translativer Gleitfläche entwickeln, sind bei grosser Mächtigkeit der Lockerüberlagerung tiefgreifende Rutschungen mit z. T. rotationsförmiger Bruchfläche zu erwarten. Bei mächtiger Lockerüberlagerung sind sehr häufig Hangwasserexplosionen zu verzeichnen, die deutlich die Gefahr der Murgangbildung erhöhen.

Hangneigung:

Wie gerade neuerdings wieder sehr deutlich hingewiesen wurde (Liener et al. 1996), kommt der Hangneigung im Zu-

Prognose von Lockergesteins-Rutschungen («soil slips»)



sammenhang mit den geotechnischen Parametern der Lockergesteine bei der Prognose d. h. bei der Ausscheidung potentieller Anbruchsgebiete eine zentrale Bedeutung zu. Für Mischböden ($\phi' = 30-35^\circ$ $c' = 0$) können folgende Ergebnisse hinsichtlich der Hangneigung vorgelegt werden (Fig. 2):

a.) Unterer kritischer Hangneigungswinkel:

Es hat sich gezeigt, dass zur Erklärung des unteren kritischen Hangneigungswinkels das Modell eines unendlich langen Hanges mit ebener Gleitfläche verwendet werden kann, das schon von Skempton & Delory (1957) vorgeschlagen worden ist.

Für den allgemeinen Fall mit Reibung und Kohäsion des Materials und mit Hangwasserströmung parallel zur Hangoberfläche gilt

$$FS = \frac{c'}{\gamma_r \times h \times \sin\beta} + \frac{(\gamma_r - m \times \gamma_w) \times \tan\phi'}{\gamma_r} \times \frac{\tan\phi'}{\tan\beta}$$

FS = Sicherheit, c = Kohäsion,

ϕ' = Reibung,

β = Hangneigung

γ_r = Raumgewicht des gesättigten Bodens,

γ_w = spezifisches Gewicht des Wassers

h = Mächtigkeit der Lockerüberlagerung

m = Mächtigkeit der gesättigten Schicht

Bei der Annahme $c' = 0$, Hangwasserspiegel an der Geländeoberfläche und $\gamma_r = 20 \text{ KN/m}^3$ vereinfacht sich die Gleichung.

$$FS = \frac{\tan\phi'}{2\tan\beta} \quad \text{oder} \quad \tan\beta = \frac{1}{2} \tan\phi'$$

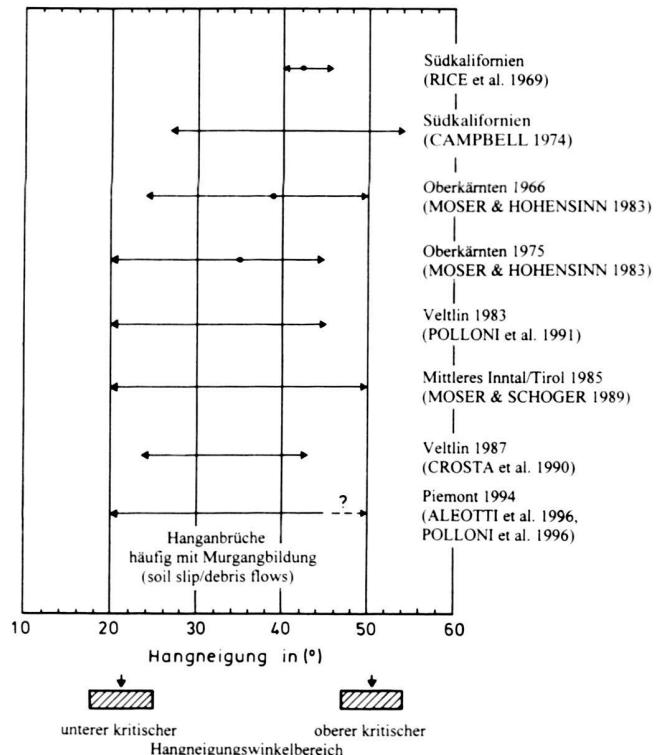


Fig. 2. Hangneigung und ihre Beziehung zur Entstehung von Hangbrüchen in schwach bindigen bis rolligen Lockergesteinen («soil slips»); Pfeile bedeuten die Bandbreite, ausgefüllte Kreise die Mittelwerte der aufgetretenen Hangbrüche.

→ Überschlägige Abschätzung der Hangbereiche, die auch unter ungünstigsten Bedingungen stabil sind.

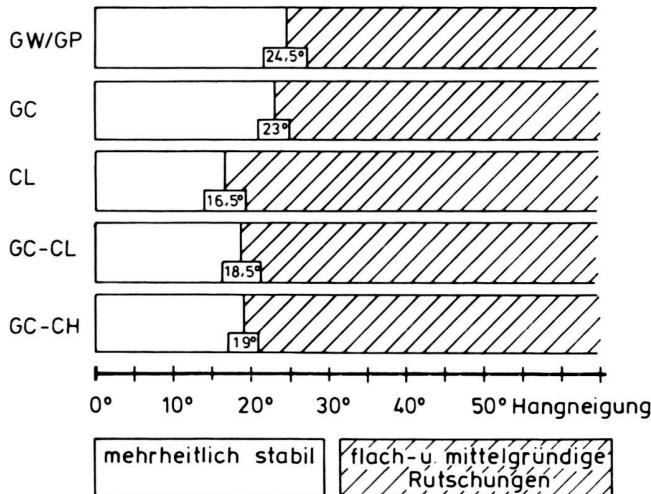


Fig. 3. Hangneigungsklassen der einfachen Gefahrenhinweiskarte («EGHK»), n. Liener et al. 1996.

b.) Oberer kritischer Hangneigungswinkel:

Ab etwa 50° Hangneigung ist keine durchgehende bzw. nur mehr eine sehr geringmächtige Lockergesteinsauflage durch die dauernden Denudationsprozesse vorhanden.

Insgesamt können aus den Untersuchungen hinsichtlich der Hangneigung folgende Schlüsse gezogen werden:

- Bei gemischtkörnigen Böden mit geringem Tongehalt liegt die stärkste Gefährdung bei 30–40°.
- Hangbereiche < 20° und > 50° sind nicht betroffen.

Liener et al. (1996) haben sich diese beiden wichtigsten Parameter – geotechnische Eigenschaften der Lockergesteine und Hangneigung – zu Nutze gemacht, um für verschiedene Lockergesteinstypen einfache Gefahrenhinweiskarten («EGHK») zu entwerfen. Aus ihnen kann entnommen werden, ab welcher Hangneigung für einen bestimmten Lockergesteinstyp unter Berücksichtigung eines bestimmten Wassersättigungsgrades flach- und mittelgründige Rutschungen vom Typ «soil slip» einsetzen (Fig. 3).

Die Möglichkeit mit einfachen Modellvorstellungen, gefährdete und nicht gefährdete Hangbereiche hinsichtlich der Entwicklung von Hanganbrüchen auszuscheiden, stösst in der Praxis durchaus auf Schwierigkeiten, besonders bei der Klassifizierung grossflächiger Areale, da folgende Eigenschaften der Hangbereiche nicht mit ausreichender Genauigkeit den normalerweise vorhandenen Kartenwerken zu entnehmen sind:

- die Art der Lockergesteine (vor allem: Kohäsion, Reibungswinkel, Mächtigkeit)
- Hangneigung
- genaue Hangmorphologie (Mulden, Hangkanten usw.)

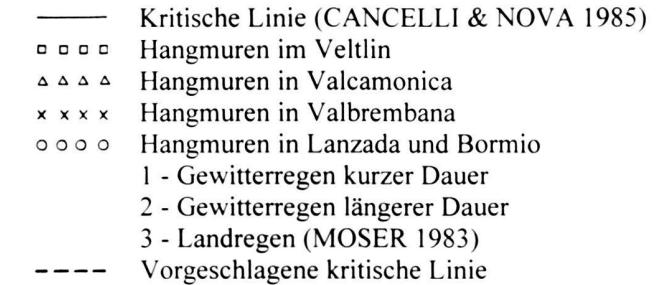


Fig. 4. Intensität und Dauer der Niederschläge und ihre Beziehung zum Auftreten von Hanganbrüchen in der Lombardei (n. Ceriani et al. 1992).

So wird in Liener et al. (1996) hingewiesen, dass vielfach eine spezielle Bearbeitung notwendig ist, um die gewünschten Parameter in ausreichender Genauigkeit zu erhalten. Auch Wu et. al (1996) weisen auf gewisse Unsicherheiten hin, die mit diesem Infiltrations- und Stabilitätsmodell verbunden sind.

Spezielle Hangmorphologie:

Auch hier haben die Aufnahmen der letzten Niederschlagskatastrophen gezeigt, dass folgende morphologischen Gegebenheiten eine Anbruchsbildung fördern.

- Hangkanten (Oberkärnten 1966 bzw. 1975 = 65% bzw. 55%)
- Hangmulden (Oberkärnten 1966 bzw. 1975 = 15% bzw. 25%)

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Polloni et al. (1996) im Veltlin und Aleotti et al. (1996) in Piemont.

Vegetation:

Obwohl hier die Zusammenhänge sehr komplex sind, besonders bei Berücksichtigung der Art des verursachenden Niederschlages (z. B. Sturm), so können doch gewisse Gesetzmäßigkeiten mitgeteilt werden.

- Der Wald bietet bei Elementarereignissen ohne flächenhafte Sturmschäden, aufgrund hydrologischer und festigkeitsmechanischer Charakteristiken sowohl hinsichtlich der Zahl als auch der Gesamtanbruchsfäche der entstehenden Anbrüche die stabileren Voraussetzungen. Dies zeigen die Untersuchungen Oberkärnten 1966 (80 % Freilandböden, 20 % Wald), Oberkärnten 1975 (95 % Freilandböden, 5 % Wald, Moser 1980). Ähnliche Ergebnisse ohne quantitative Untersuchungen teilen mit Engelen (1967) und Jahn (1987).
- Bei Niederschlagsereignissen verbunden mit Sturm ist die Gesamtanbruchsfäche jedoch im Waldbestand häufig grösser als auf Freilandböden.

Die Niederschlagscharakteristik:

Wie aus den vorausgegangenen Ausführungen zu entnehmen ist, muss das Entstehen solcher Massenbewegungen in Abhängigkeit von der Niederschlagscharakteristik gesehen werden. Die Auswertung zahlreicher Hanganbrüche im alpinen Bereich lässt den Schluss zu, dass durch die beiden Parameter Dauer und Intensität der Niederschläge Grenzwerte angegeben werden können, ab denen vermehrt mit Hanganbrüchen und, resultierend aus diesen, Murgangbildung zu erwarten ist (Fig. 4).

Solche Betrachtungen können dann in die Angabe der Gefahrenstufe einfließen, die sinnvoll durch die Intensität und die Eintretenswahrscheinlichkeit der Prozesse (s. a. Kienholz 1996) bestimmt werden kann.

3. Die Prognose von Talzuschüben

Definition Talzuschiebung («sagging of mountain slopes»):

Talzuschübe sind grossflächige (z. T. mehrere km²) und tiefgreifende (z. T. > 100 m) Hangbewegungen. Hierdurch wird eine tiefgreifende Deformation der Gebirgshänge bewirkt, wobei es aber nicht zu einem Bruch kommt wie bei Bergstürzen, wo die zumeist nischenförmige Anbruchsfäche und die daran anschliessende Gleit- und Sturzbahn ausgeprägt ist. Zu beobachten sind diese tief in den Gebirgskörper eingreifenden Massenbewegungen vor allem in Glimmerschiefern, Gneisen und Phylliten. Bei der Betrachtung der verformten Masse als ganzes bleibt der Zusammenhang gewahrt, doch kann im Massstab von Felsaufschlüssen eine Auflösung der kontinuierlich erscheinenden Verformung beobachtet werden. Die negativen Einwirkungen solcher tiefgreifender Hangbewegungen auf bautechnische Anlagen, Infrastrukturen und Siedlungen können erheblich sein (Fig. 5).

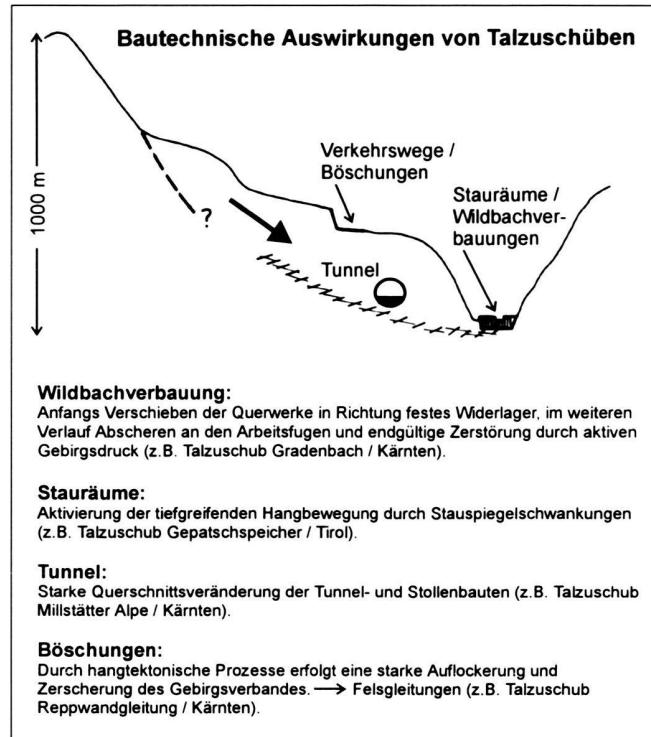


Fig. 5. Bautechnische Auswirkungen von Talzuschüben.

Eine Prognose, aus der die Gefahrenstufe abzulesen ist, der weiterhin Angaben zu Verbauungsmassnahmen oder Sanierungskonzepte zu entnehmen sind, sollte sich u. a. auf folgende Parameter stützen:

- Substanzeigenschaften, Trennflächengefüge
- Fläche, Volumen, Tiefgang
- Lage und Form der Gleitzonen, Gleitkörpergeometrie
- Bewegungsgeschwindigkeit
- Art des detaillierten Bewegungsablaufes
- Steuerung der Bewegung durch externe Faktoren
- Räumlicher und ebener Bewegungsvektor
- Fragen eines Kollapses.

Wie aus diesem Katalog ersichtlich ist, kann die Beantwortung der aufgelisteten Fragen vorwiegend nur mit grossem finanziellen und personellen Aufwand und mit Untersuchungen über einen längeren Zeitraum erreicht werden. Im folgenden sollen einige Fragen, die eine Prognose hinsichtlich der in Fig. 5 angegebenen Auswirkungen (Verbauungsmassnahmen, usw.) ermöglichen, kurz andiskutiert werden.

Bewegungsgeschwindigkeit:

Aufgrund der Analyse zahlreicher Talzuschübe im alpinen Bereich können folgende Schlüsse gezogen werden:

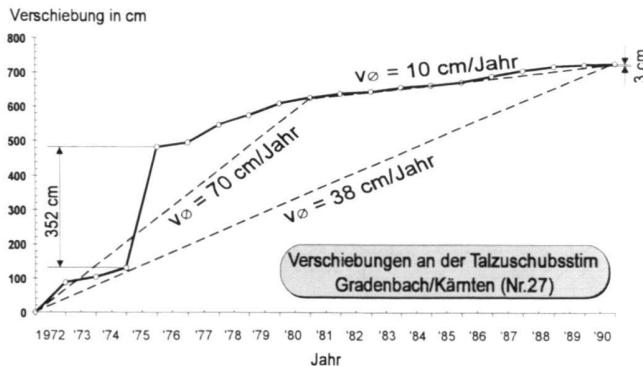


Fig. 6. Bewegungsgeschwindigkeit an der Talzuschubsstirn des Talzusches Gradenbach/Kärnten von 1972 bis 1990. Deutlich ist zu ersehen, dass die Prognose für sachgerechte Verbauungsmassnahmen und Sanierungskonzepte oft nicht aus gemittelten Werten nur einer kurzen Messperiode abgeleitet werden kann.

- Angaben von Durchschnittsgeschwindigkeiten sagen zum Bewegungsablauf und -mechanismus wenig aus und werden dem rheologischen Verhalten solcher Massenkörper nicht gerecht. Eine jährliche Kriechgeschwindigkeit, z. B. aus 3 Folgemessungen (z. B. Talzuschub Peiden/Lugnez-Graubünden: 22 cm/a aus einem Gesamtbetrag von 15 m in 67 Jahren) abzuleiten, spiegelt sicher nicht die kinematischen Verhältnisse innerhalb eines solchen Massenkörpers wider.
- Aus Durchschnittsgeschwindigkeiten, ermittelt aus wenigen Folgemessungen in sehr grossen Zeitabständen (5–10 Jahre), lassen sich gerade für die Praxis hinsichtlich
 - sinnvoller Verbauungstechniken und Sanierungskonzepte in der Grabensohle,
 - Fragen zum normalen oder ausserordentlichen Zustand, möglicher Kollapsmechanismen und Geschiebeherdbildung an der Talzuschubsstirn und damit für die Gefahrenstufe keine relevanten Schlüsse ziehen.

Diese Zusammenhänge können am Beispiel des Talzusches Gradenbach/Kärnten näher erläutert werden (Fig. 6).

Kurzcharakteristik:

Gestein: Phyllite der Matreier Zone

Höhe: 1.100 m, Länge: 2.350 m, Breite: 1.000 m

Volumen der bewegten Masse: $> 150 \times 10^6 \text{ m}^3$

Tiefgang: 200 m

- In der Zeit von 1971 bis 1990 schwanken die jährlichen Bewegungsgeschwindigkeiten erheblich: 3 cm bis 352 cm.
- Die möglichen grossen Bewegungsraten werden in der Grabensohle selbst massive Verbauungstypen zerstören.

- Bei Betrachtung eines kleineren Zeitraumes z. B. von 1981 bis 1990 wären die grossen Bewegungsraten für das Jahr 1972 und 1975 nicht erfasst worden.

- Fehleinschätzung von neuen geplanten Verbauungs- und Sanierungstechniken.
- Die Vermutung, dass der Bewegungsvorgang nicht nur eine Funktion der Substanzeigenschaften des Gebirges und der Ausbildung des Trennflächengefüges ist, sondern offenbar von anderen Faktoren gesteuert wird, wird durch solche langfristigen und in relativ kurzen Zeitabständen durchgeföhrten Messungen weiter erhärtet (Fig. 7).
- Auch extrem grosse Bewegungsbeträge (z. B. 1975 ca. 350 cm) führen nicht unbedingt zu einem Kollaps.
- Keine Abriegelung des Tales durch das Eingleiten eines grossen Massenkörpers und Seebildung.

Auch am Beispiel des Talzusches Campo/Tessin zeigt Bonzanigo (1988), dass die Bewegungsraten über einen Zeitraum von 60 Jahren von einem Quasi-Stillstand bis zu etwa 45 cm/a reichen können. An einem intensiven Beobachtungszeitraum wird deutlich, dass Spitzenwerte (bis 200 cm/a), die unbedingt für Sicherheitsbeurteilungen oder für die Analyse des Bewegungsverhaltens berücksichtigt werden müssen, durch stark mittelnde Verfahren übergangen werden.

Der genaue zeitliche Bewegungsablauf:

Die Erkundung des genauen Bewegungsablaufes kann vorzugsweise nicht flächenhaft über den gesamten Massenkörper sondern nur an einigen ausgewählten kleinflächigen Bereichen, aus finanziellen und technischen Gründen nur mit Konzept «punktweise» (Kovari, 1988) durchgeföhr werden. Dies bedeutet aber, dass geprüft werden muss, ob die gemessene Bewegung als signifikant für die gesamte Hangbewegung oder wenigstens für grössere Bereiche des Massenkörpers (z. B. Talzuschubsstirn) angesehen werden kann. Aus technischen Gründen kommen besonders Stahlbandmessungen (manuell) oder kontinuierlich aufzeichnende Präzisionsdrahtextensometer in Frage, die besonders günstig an der Stirnfront solcher Massenkörper montiert werden können.

Für die Analyse des Bewegungsablaufes und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Prognose soll der schon erwähnte Talzuschub Gradenbach/Kärnten näher erläutert werden. Hier kann für das detaillierte Bewegungsverhalten eine nun 19jährige Messreihe, die in 14tägigen Abständen an der Talzuschubsstirn erstellt wurde, herangezogen werden (s. Fig. 7). Die genaue Auflösung der Hangbewegung und die Betrachtung eines 1jährigen Zeitabschnittes zeigt, dass das jährliche Bewegungsbild Zeiten weitgehender Ruhe und Beschleunigungsphasen umfasst. Dieses jährliche Bewegungsbild lässt sich auch über mehrere Jahre verfolgen, so dass von einem regressiv zyklischen Verhalten gesprochen werden kann, wobei sich einzelne Abschnitte hinsichtlich Intensität und ihrem zeitlichen Einsatz etwas unterscheiden können.

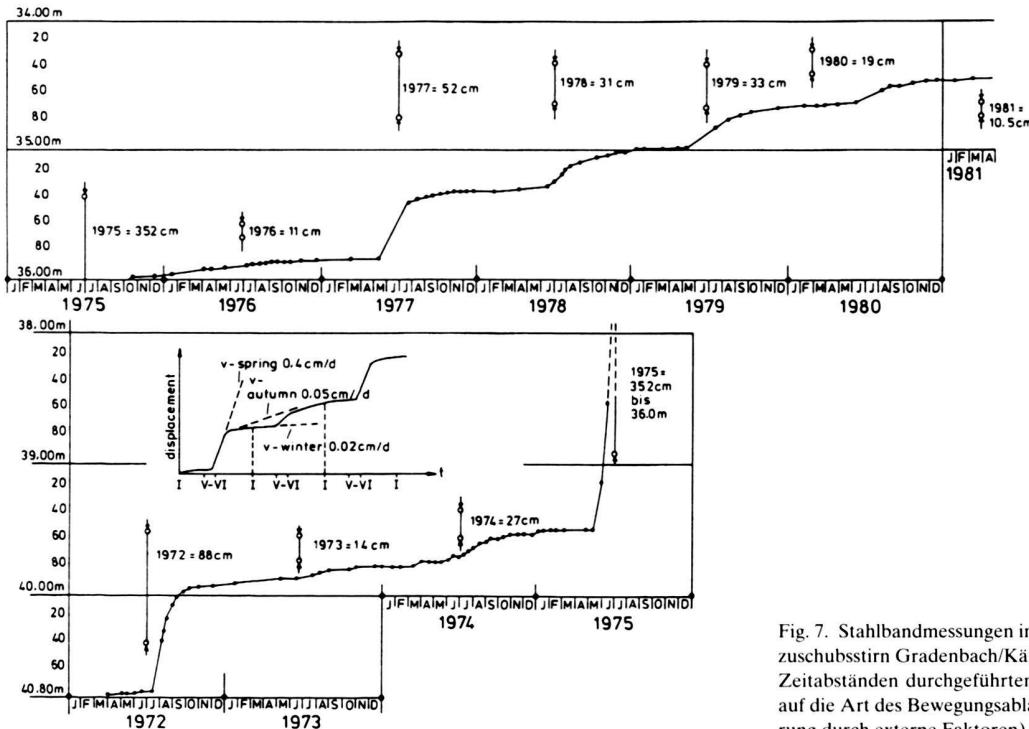


Fig. 7. Stahlbandmessungen in z. T. 14tägigem Abstand an der Talzuschubstirn Gradenbach/Kärnten; die langfristigen und in kurzen Zeitabständen durchgeführten Messungen erlauben einen Schluss auf die Art des Bewegungsablaufs (z. B. zyklisch, regressiv, Steuerung durch externe Faktoren).

4. Die Prognose von spontanen Hangbewegungen in Festgestein (Felsgleitung, Felssturz, «rockslide, rockfall»)

Dem nachstehenden Schema können Fragen zur Prognose, die bei der geologisch-geotechnischen Untersuchung von Felsgleitungen im Vordergrund stehen, entnommen werden (Tab. 1):

Tab. 1: Ziele und Realisierungsmöglichkeiten bei der Untersuchung von Felsgleitungen und Felsstürzen

Wichtige Problemkreise:	
– Größenordnung geologisch-geotechnische Situation	→ Möglichkeiten der Untersuchung: geologisch-geotechnische Aufnahme
– Art und Geometrie des Bruches	→ geologisch-geotechnische Aufnahme, quantitative diskontinuierliche Messungen (z. B. geodätische Vermessung und Neigungsmessung)
– Steuerung – normaler oder ausserordentlicher Zustand	→ kontinuierliche Messreihen z. B. Präzisionsextenrometer gekoppelt mit Datensammler und Niederschlagsmessgerät)
– Zeitpunkt, Zeitfenster	→ empirische Methoden Modellansätze
– Reichweite	

In diesem Rahmen soll nur kurz auf den Zeitpunkt des Versagens bzw. auf sog. Zeitfenster eingegangen werden.

Allgemeines:

Die messtechnische Erfassung und Überwachung von Deformationsprozessen an Felshängen ist eine wichtige Grundlage zur Bestimmung des Gefährdungspotentials, des gegenwärtigen Gleichgewichtszustandes und der zeitlichen Größenordnung des Bewegungsablaufs. Die Quantifizierung plastischer und elastischer Deformationsmechanismen mittels relativer und absoluter Messmethoden muss bei aktiven hangtektonischen Zerlegungsvorgängen als Ausgangspunkt einer Beurteilung über den Zustand eines Felshanges angesehen werden. Die Notwendigkeit von fortlaufenden Deformationsmessungen an instabilen Hängen und daraus abzuleitende Modelle als Entscheidungsgrundlage für Risikobewertung, eventuellen Stabilisierungsmassnahmen und Prognosen des zukünftigen Verlaufs betont z. B. Aeschlimann (1994). Das Erkennen von Zyklen, Trend und Beschleunigungen im Ablauf von Deformationsprozessen ist entscheidend für eine auf einer Extrapolation des bisherigen Verhaltens beruhenden Prognose (Kostak 1993). In diesem Zusammenhang betonen Kostak & Rybar (1993) die Notwendigkeit der Definition kritischer Bewegungsraten bzw. Verschiebungsbeträge, deren Kriterien nur durch ingenieurgeologische und geomechanische Untersuchungen erhalten werden können.

Mathematische Beziehungen zwischen den Parametern Deformation, Deformationsrate, Geschwindigkeit, Beschleunigung und konstanten Größen definiert Voight (1988). Der Begriff der inversen Geschwindigkeitsrate («inverse velocity») findet seine Anwendung in einer graphisch-rechnerischen Me-

Bergzerreißung Treßdorfer Höhe
schematischer geologisch-geotechnischer Längenschnitt

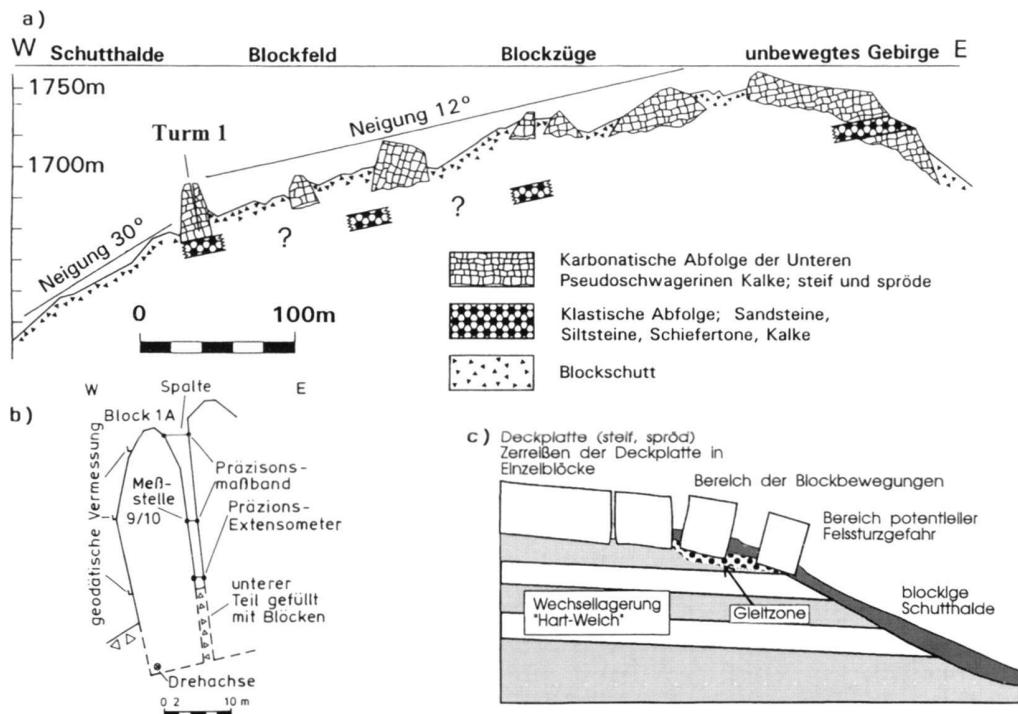


Fig. 8. Bergzerreißung Tressdorfer Höhe/Kärnten.

a) schematischer geologisch-geotechnischer Längenschnitt, b) geotechnische Situation des Felsturmes 1 mit Messeinrichtungen, c) Prinzipskizze zur Entstehung von Hangbewegungen bei der Konstellation «Hart-Weich».

thode zur Vorhersage eines Böschungsversagens. Größenordnungsmässig unterscheidet Voight (1988) eine langfristige Vorhersage (Monate bis Jahre) mit einem daraus resultierenden Zeitfenster für den Eintritt eines Ereignisses und eine kurzfristige Vorhersage (Tage bis Monate), die das Ereignis präzise ca. eine bis mehrere Wochen vorher erkennen sollte. Eines der bekanntesten Beispiele einer messtechnischen Überwachung mit einer daraus abgeleiteten zeitlichen Prognose des Böschungsversagens ist die Kupfermine Chuquicamata/Chile (Voight & Kennedy 1979). Als weitere Beiträge einer messtechnischen Erfassung und Überwachung instabiler Felshänge einschliesslich Korrelation zu externen Faktoren, z. T. mit konkreten Prognosen über die weitere Entwicklung des Hang-

verhaltens, können exemplarisch die Arbeiten von Johnsen (1981), Flotron (1976), Zvelebil (1984), Azimi et al. (1988) und Glawe et al. (1993) genannt werden.

Nach Glawe & Lotter (1996) ergeben sich für die oben genannten Fallbeispiele folgende Schlüsse:

- Einer Periode mit quasi konstantem Kriechen folgt eine Beschleunigungsphase (z. B. Wesen/Schweiz, Jaeckli & Kempf 1974).
- Die Bewegungsbeträge sind direkt beeinflusst von Temperatur und Niederschlag (z. B. Decin/Tschechische Republik, Zvelebil 1984).
- Die tertiäre, finale Phase kann durch Niederschläge und

- seismische Vorgänge ausgelöst werden (z. B. Chuquicamata/Chile, Voight & Kennedy 1979) und
- Voraussagen wurden **nur** in der Beschleunigungsphase erstellt.

Zeitpunkt des Versagens, Zeitfenster am Beispiel der Bergzerreissung Tressdorfer Höhe/Kärnten:

In der Fig. 8a, c ist die geologisch-geotechnische Situation des Bergzerreissungsfeldes in einem Längenschnitt und einer Prinzipskizze dargestellt. Weiterhin können die für die zeitliche Voraussage des Felssturzes wichtigsten Messeinrichtungen und die geotechnische Konstellation des Felsturmes 1 selbst entnommen werden (s. Fig. 8b).

Der hier näher geschilderte Fall gibt eine weltweit typische Felsgleitungs- und Felssturzsituation wieder, die durch eine geringmächtige, duktil reagierende (geneigte) Gleitzone unten sowie eine spröde Deckplatte gekennzeichnet ist (Fig. 8c). Hier erfolgt das Einsetzen eines Kriech- bzw. Gleitvorganges von Felstürmen und -blöcken entlang der mechanisch schwächsten Schicht in dieser Abfolge. Mit dem Zerscheren der Gesteinsabfolge sind erste Blockrotationen verbunden, die je nach Mächtigkeit der weichen Gesteinsabfolgen beschränkt sein können. Beisst die Gleitzone an der Talflanke aus, schließen sich an die Gleit- und Kippbewegungen Fels- und Bergstürze an, die zur Anlage grossflächiger Blockhalden führen.

Durch geologische Untersuchungen wurde festgestellt, dass besonders von den Felstürmen an der Hangkante eine potentielle Gefahr in Form von Felsstürzen ausgeht. Auch im Hinblick auf die Praxis – ca. 200 Höhenmeter unterhalb führt eine Skipiste durch – sollte durch verschiedene Messmethoden versucht werden, ein Zeitfenster zu erstellen bzw. vielleicht den Zeitpunkt des Versagens näher einzugrenzen. Die angewendeten Methoden reichen von genauen morphometrischen Analysen über diskontinuierliche Messverfahren bis hin zu kontinuierlichen Aufzeichnungen des Ablösevorganges und des Niederschlages (Fig. 8b).

Aus folgenden Gegebenheiten wurde versucht, ein Zeitfenster zu erstellen:

- Lage des Schwerpunktes des Blockes 1 A
- kritischer Verschiebungsbetrag an der Messstelle 9/10 (Kurve e = 1295 mm, Fig. 10)
- Hangeinwärtswandern der Rotationsachse (Kurve reduzierter kritischer Verschiebungsbetrag, Fig. 10)
- Ablösegeschwindigkeit bzw. Verschiebungsbetrag an der Messstelle 9/10 (zwischen Block 1 A und B, Fig. 9a)

Aus der Ablösegeschwindigkeit kann entnommen werden

- fast linearer Verlauf von Okt. 1987 bis Okt. 1992 (Kurve a, $s = 0,17 \text{ t}$)
- fast linearer Verlauf ab Okt. 1992 (Kurve b, $s = 0,28 \text{ t}$, Fig. 10)

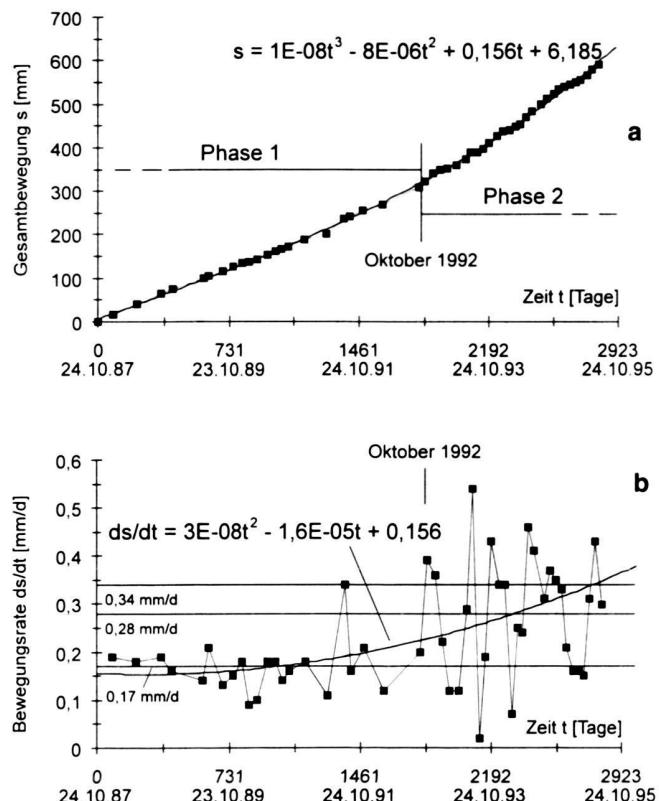


Fig. 9. a) Gesamtöffnungsbeträge an der Messstelle 9/10 (zur Lage s. Fig. 8) des Felsturmes und b) die täglichen Verschiebungsbeträge gemittelt über eine Periode von 28 Tagen für die Zeit von Okt. 87 bis Okt. 95 (n. Glawe & Lotter 1996).

- beste Anpassung für den Gesamtzeitraum von Okt. 1987 bis Okt. 1995 so wie von Okt. 1992 bis Juli 1995 ist ein Polynom 3. Ordnung, d. h. die Geschwindigkeiten erhöhen sich quadratisch (Fig. 9b).

Beim Stand vom Juli 1995 wird angenommen, dass ein Felssturz erfolgen wird, wenn in Fig. 10 die Kurve des reduzierten kritischen Verschiebungsbetrages (Kurve d) und die Kurven des Ablösebetrages (Kurven c, b) sich schneiden. Entsprechend der geotechnischen und kinematischen Bedingungen sollte ein Bruch im Jahre 1997 erfolgen.

Auch dieses Beispiel zeigt wieder, dass, solange die tertiäre finale Phase nicht eingetreten ist, nur ein Zeitfenster angegeben werden kann. Ebenso wird ersichtlich, dass das Zeitfenster sehr stark von der Kurve des reduzierten kritischen Verschiebungsbetrages (Kurve d in Fig. 10) abhängt, deren Verlauf über die Zeit hinweg schwierig zu bestimmen ist.

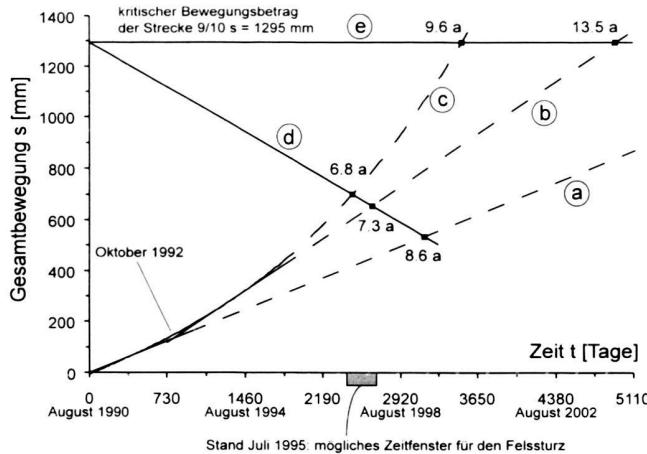


Fig. 10. Beobachtete (durchgezogene Linie) und extrapolierte Bewegungen (gestrichelte Linie). Ab Okt. 1992 geändertes Bewegungsverhalten, das mit den Kurven b und c beschrieben werden kann. Der kritische Bewegungsbetrag von 1295 mm an der Stelle 9/10 wird durch die bergwärts wandernde Rotationsachse reduziert (Kurve d), so dass ein Kollaps für das Jahr 1997 erwartet wird (n. Glawe & Lotter 1996).

5. Schlussfolgerungen

Für eine zielgerechte Prognose von Massenbewegungen müssen zahlreiche Parameter bekannt sein, wobei besonders Größe, Form, Vorgang und Dynamik die entscheidenden Faktoren sind. Für die einzelnen Arten von Massenbewegungen wird die Prognose und die Angabe einer Gefahrenstufe jeweils Schwerpunkte zu setzen haben, wobei aber Fragen des «Wie» des «Wo» und des «Wann» im Vordergrund stehen. Für die Massenbewegungen, Hangbrüche in Lockergesteinen («soil slips»), Talzuschübe («sagging of mountain slopes») und Felsgleitungen, Felsstürze («rockslides, rockfalls») konnten folgende Aspekte herausgestellt werden.

Für **Lockergesteins-Rutschungen** («soil slips») sind vor allem bodenmechanische Kennziffern (Reibungswinkel, Kohäsion), die Mächtigkeit, die Hangneigung und die spezielle Hangmorphologie zu berücksichtigen. Diese Parameter sollten Eingang in ein Infiltrations- und Stabilitätsmodell finden, um kritische Hangneigungswinkel abgrenzen zu können.

Für die Angabe der Gefahrenstufe ist besonders die Entwicklungsmöglichkeit der Anbrüche im Unterhang von besonderer Bedeutung.

Das «Wann» ist mit der Intensität und der Dauer der Niederschläge verknüpft.

Bei der Prognose von **Talzuschüben** («sagging of mountain slopes») stehen aufgrund ihres grossflächigen und tiefgreifenden Charakters sehr häufig Fragen von finanziell aufwendigen Verbauungstechniken und Sanierungskonzepten im Vordergrund. Die Lösung dieser Fragen wird sich besonders auf die Angabe der Bewegungsgeschwindigkeit in den einzelnen Be-

reichen, der Art des detaillierten Bewegungsablaufes und der Steuerung dieser Bewegung durch externe Faktoren stützen können. Vornehmlich an den übersteinen Talzuschubsstirnen müssen Fragen eines Kollapses abgeklärt werden.

Als Grundlage für eine Prognose von **Felsstürzen** und **Felsgleitungen** («rockfalls, rockslides») muss die genaue Kennzeichnung der geologisch-geotechnischen Situation angesehen werden. Im speziellen bedeutet dies die Erhebung der Stellung und der Art der Trennflächen des Gebirgsverbandes, der Ausbildung inkompetenter Gesteinsserien und die Angabe der Kubatur. Für die wichtige Frage der Reichweite müssen zuerst empirische Methoden herangezogen werden. Die Beantwortung des «Wann», eine zentrale Fragestellung, d. h. die langfristige Angabe eines Zeitfensters bzw. des genauen Zeitpunktes des Versagens wird nur mit verschiedenen, vornehmlich kontinuierlichen Messmethoden zu erreichen sein.

Verdankungen

Für die finanzielle Unterstützung wird der Deutschen Forschungsgemeinschaft gedankt. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. G. Schmitt, Geodätisches Institut Universität Karlsruhe, für die jahrelange geodätische Betreuung am Bergzerreissungsfeld Tressdorfer Höhe/Kärnten.

LITERATURVERZEICHNIS:

- AESCHLIMANN, H. 1994: Messungen – Entscheidungsgrundlage oder Alibi? Kursunterlagen Contec, ETH Zürich, Natürliche Hanginstabilitäten im Spannungsfeld von Risiko, Schaden und Sanierungskosten, Zürich.
- ALEOTTI, P., BALDELLI, P. & POLLONI, G. 1996: Landsliding and flooding event triggered by heavy rains in the Tanaro Basin (Italy). Proc. Int. Symp. Interpraevent 1, 435–446.
- AZIMI, C., BIAREZ, J., DESVARREUX, P. & KEIME, F. 1988: Prévision d'éboulement en terrain gypseux. Proc. 5th Int. Symp. Landslides 1, 531–536.
- BONZANIGO, L. 1988: Etude des mécanismes d'un grand glissement en terrain cristallin: Campo Vallemaggia. Proc. 5th Int. Symp. Landslides 2, 1313–1316.
- CAMPBELL, R. A. 1974: Debris flows originating from soil slips during rainstorms in southern California. Quat. J. of Engineering Geol. 7, 339–349.
- CERIANI, M., LAUZI, S. & PADOVAN, N. 1992: Rainfalls and landslides in the alpine area of Lombardia region - Central Alps, Italy. Int. Symp. Interpraevent 2, 9–20.
- CROSTA, G. & MARCHETTI, M., GUZETTI, F. & REICHENBACH, P. 1990: Morphological classification of debris-flow processes in South-Central Alps (Italy). 6th Int. IAEG Congress, 1565–1572.
- ENGELEN, G. B. 1967: Landslides in the metamorphic northern border in the Dolomites (North Italy). Engineering Geol. 2, 135–147.
- FLOTTRON, A. 1976: Fels- und Eissturzprognosen aus Deformationsmessungen. VII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen hoher Präzision, Symposium der FIG-Kommissionen, 29.09.–08.10.1976, Technische Hochschule Darmstadt.
- GLAWE, U. & LOTTER, M. 1996: Time prediction of rock slope failures based on monitoring results. Proc. 7th Symp. Landslides 3, 1551–1555.
- GLAWE, U. & MOSER, M. 1993: Messtechnische und theoretische Bearbeitung von Bergzerreissungen und Blockbewegungen. Felsbau 11, 5, 235–250.
- GLAWE, U., ZIKA, P., ZVELEBIL, J., MOSER, M. & RYBAR, J. 1993: Time prediction of a rock fall in the Carnic Alps. Quart. J. Engineering Geol. 26, 185–192.
- GRUBINGER, H. 1976: Der Schutz alpiner Lebensräume. Österr. Wasserwirtsch. 28, 41–46.

- GUZZETTI, F., CROSTA, G., MARCHETTI, M. & REICHENBACH, P. 1992: Debris flows triggered by the July, 17–19, 1987 storm in the Valtellina area (Northern Italy). *Int. Symp. Interpraevent* 2, 193–204.
- JAECKLI, H. & KEMPF, T. 1975: Der Felssturz von Amden vom 21. Januar 1974. Separatdruck aus «Schweizerische Bauzeitschriften», 93. Jahrg., 25, 3–8.
- JOHNSEN, G. 1981: Bewegungsmessungen im Bereich von Blockrutschungen an der Röt/Wellenkalk- Schichtstufe Thüringens. *Z. angew. Geol.* 27, 8, 386–392.
- KIENHOLZ, H. 1996: Gefahrenkarten: Massgebliche Parameter und Kriterien zur Festlegung von Intensitätsstufen. *Int. Symp. Interpraevent* 3, 47–58.
- KOSTAK, B. 1993: Remarks to prediction and monitoring. *Proc. 7th Int. Conf. and Field Workshop on Landslides, Ostrava/Bratislava*, 155–159.
- KOSTAK, B. & RYBAR, J. 1993: Alarming limits in slope deformation monitoring. *Proc. 7th Int. Conf. and Field Workshop on Landslides, Ostrava/Bratislava*, 169–174.
- KOVÁRI, K. 1988: General report: Methods of monitoring landslides. *Proc. 5th Int. Symp. Landslides* 3, 1421–1433.
- LEROI, E. 1996: Landslide hazard – Risk maps at different scales. Objectives, tools and developments. *Proc. 7th Int. Symp. on Landslides* 1, 35–51.
- LIENER, S., LINIGER, M., KRUMMENACHER, B. & KIENHOLZ, H. 1996: Abgrenzung rutschgefährdeter Gebiete – Entwicklung eines DispositionsmodeLLs. *Int. Symp. Interpraevent* 3, 151–160.
- MOSER, M. 1980: Zur Analyse von Hangbewegungen in schwach bindigen bis rolligen Lockergesteinen im alpinen Raum anlässlich von Starkniederschlägen. *Int. Symp. Interpraevent* 1, 93–101.
- MOSER, M. 1994: Geotechnics of Large-Scale Slope Movements («Talzuschübe») in Alpine Regions. *Proc. 7th IAEG Congr.*, 1533–1542.
- MOSER, M. & GLUMAC, S. 1982: Zur Kinematik von Talzuschüben, dargestellt am Beispiel des Talzuschubes Gradenbach/Kärnten. [Kinematics of the Talzuschub Gradenbach/Carinthia.]. *Allg. Vermessungsnachr.*, 89. Jg., H 5, 174–189.
- MOSER, M. & HOHENSINN, F. 1983: Geotechnical aspects of soil slips in alpine regions. *Engineering Geol.* 19, 185–211.
- MOSER, M. & SCHOGER, H. 1989: Die Analyse der Hangbewegungen im mittleren Inntal anlässlich der Unwetterkatastrophe 1985. *Wildbach- u. Lawinenverbau*, 53. Jg., 110, 1–22.
- POLLONI, G., CERIANI, M., LAUZI, S., PADOVAN, N., CROSTA, G. 1991: «Rainfall and soil slipping events in Valtellina.» *Proc. 6th Int. Symp. on Landslides* 1, 183–188.
- POLLONI, G., ALEOTTI, P., BALDELLI, P. & NOSETTO, A. 1996: Heavy rain triggered landslides in the Alba area during November 1994 flooding event in the Piemonte region (Italy). *Proc. 7th Int. Symp. Landslides* 3, 1955–1960.
- RICE, R. M., CORBETT, E. S. & BAILEY, R. G. 1969: Soil slips related to vegetation, topography and soil in California. *Water Resour. Res.* 5, 647–659.
- SCHINDLER, C., CUÉNOD, Y., EISENLOHR, T. & JORIS, C.-L. 1993: Die Ereignisse vom 18. April und 9. Mai 1991 bei Randa (VS) – ein atypischer Bergsturz in Raten. *Eclogae geol. Helv.* 86, 643–665.
- SKEMPTON, A. W., DELORY, F. A. 1957: Stability of natural slopes in London Clay. *Proc. 4th Int. Conf. Soil. Mech.* 2, 378–381.
- VOIGHT, B. 1988: Materials science law applies to time forecasts of slope failure. *Proc. 5th Int. Symp. Landslides* 3, 1471–1472.
- VOIGHT, B. & KENNEDY, B. A. 1979: Slope Failure of 1967–1969, Chuquicamata Mine, Chile. *Rockslides and Avalanches* 2, 595–632.
- WU, T. H., LATIF & WIECZOREK, F. 1996: Landslide hazard prediction. *Proc. 7th Int. Symp. on Landslides* 1, 423–428.
- ZELLER, I. & TOGNINI, F. 1996: Die Rovana im Kanton Tessin: «Kleine» Ursache, grosse Wirkung. *Int. Symp. Interpraevent* 2, 169–179.
- ZVELEBIL, J. 1984: Time Prediction of a Rockfall from a Sandstone Rock Slope. *Proc. 4th Int. Symp. on Landslides* 3, 93–95.

Manuskript eingegangen 30. Dezember 1996
Revidierte Fassung angenommen 28. Mai 1997

