

# Der Motor der Hangbewegungen: „Geklärtes & Ungeklärtes“

Michael Moser<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Erlangen-Nürnberg, Deutschland

## Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten hat sich besonders durch komplexe geotechnische Untersuchungen gezeigt, dass nicht nur Rutschungen in Lockergesteinen im alpinen Raum von Art, Dauer und Intensität der Niederschläge bestimmt werden, sondern auch tiefgreifende Hangbewegungen. Zur Analyse der steuernden Faktoren hinsichtlich einer kinematischen Analyse sind am besten geeignet langfristige, flächendeckende und kontinuierliche Messungen. So konnte z.B. das Bewegungsbild der Talzuschubsstirn Gradenbach/Kärnten durch langjährige kontinuierliche Drahtextensometermessungen und 14-tägige Stahlbandmessungen genau aufgelöst werden. Im Zusammenhang mit flächendeckenden Bergwasserspiegelmessungen und GPS-Messungen in verschiedenen Positionen des mobilen Gebirgskörpers konnten als steuernde Faktoren des jahreszeitlichen Bewegungsablaufes die Bergwasserspiegelstände und Schneeschmelzvorgänge erkannt werden. Besonders interessant auch im Hinblick einer Felssturzprognose ist die detaillierte kinematische Analyse von sich ablösenden Felsstürmen am Rande von Bergzerreißungsfeldern. Mit kontinuierlichen Extensometer-, Niederschlags- und Temperaturaufzeichnungen konnten über bestimmte Zeiträume Aussagen über das jahreszeitlich regressiv zyklische Beschleunigungsverhalten in Abhängigkeit vom externen Faktor „Wasserverfügbarkeit“ getätigt werden.

**Schlüsselworte:** Großhangbewegungen, Kinematik, steuernde externe Faktoren

## Abstract

The paper concentrates above all on the kinematics and especially on the influence of external factors of large-scale mass movements such as sagging of mountain slopes (“Talzuschübe”) and mountain splitting areas (“Bergzerreißungsfelder”). Sagging of mountain slopes are deep-seated gravitational slope deformations. Owing to their large aerial extent and their destructive impact on torrent regulation dams, reservoirs, road cuttings, tunnels and settlements, it is important to understand the kinematics and the mechanism of the deep-seated mass movements. This data can only be obtained from extended time series studies. With respect to the time-dependent behavior, the investigations covering many years at the sagging slope Gradenbach/Upper Carinthia can provide informations. The kinematics and causes of the exact course could be explained using long-term time series measurements, consisting not only of movement behavior, but also of control factors, such as precipitation, run-of, snow melt processes and slope water level. Owing to geotechnical studies over a period of ten years, also the process of spreading of mountain ridges could be analysed. A good example for the kinematic features of the whole mountain splitting area and especially for the brittle slab is the Treßdorfer Höhe/Carinthia. Aid of comprehensive monitoring of the kinematics, which include different periodic and continuous measurements, the specific movement behaviour, displacement rates and the varying influence of external factors could be detected.

**Keywords:** Large-scale mass movements, kinematic, external factors

## 1 Einleitung

Außer Muren und Lawinen stellen besonders Hangbewegungen der verschiedensten Art ein Gefahrenpotential im alpinen Raum dar. Für die Bewertung und für die Entscheidungsfindung von zukünftigen aktiven Maßnahmen hat sich besonders die Analyse der steuernden Faktoren einer Hangbewegung als zielführend erwiesen. Betrachtet werden sollen die steuernden externen Faktoren hinsichtlich der kinematischen Prozesse bei Großhangbewegungen im speziellen an Talzuschüben, Bergzerreißungsfeldern und sogenannten Hangmuren. Von den steuernden externen Faktoren, die häufig zu Krisensituationen führen, werden die Jahresniederschlagssumme, extreme Zwei- bis Dreitages-

niederschläge, Schneeschmelzvorgänge, Bergwasserspiegelstände und Unterschneidungsvorgänge analysiert. Häufig können nur lange in die Vergangenheit zurückreichende Messreihen auch die nur selten auftretenden, aber für das Verhalten von Hangbewegungen enorm wichtigen Extremsituationen wie z.B. ungewöhnlich hohe oder niedrige Tages-, Wochen-, oder Jahresniederschläge erfassen. Gerade bei diesen Extremsituationen ist eine nichtlineare z.B. exponentielle Anhängigkeit zwischen einzelnen Einflussgrößen und den Bewegungswerten zu erwarten. Wie sich in letzter Zeit gezeigt hat, sind für das Verständnis der kausalen Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und Deformationen besonders kontinuierliche komplexe Messungen erfolgreich (LIENHART & BRUNNER 2013).



## 2 Die steuernden externen Faktoren bei Talzuschüben

Talzuschübe stellen als großflächige und tiefgreifende Hangbewegungen ein permanentes Gefahrenpotential im alpinen Raum dar. Betroffen sind vor allem der Bestand der Wildbachsperran an der Talzuschubsstirn (z.B. Talzuschübe Gradenbach/Kärnten, Dürnbach/Salzburg), Siedlungen auf der Talzuschubsmasse selbst (z.B. Campo Vallemaggia/Tessin) oder Talsperrenräume (z.B. Hochmais Gepatschspeicher/Tirol). Seit Stiny sind im alpinen Raum zahlreiche besonders morphologische, geologische aber auch geotechnische Untersuchungen vorgelegt worden. Auch Studien zur Kinematik sind zwar schon seit Anfang des letzten Jahrhunderts vorhanden, aber teilweise in großen zeitlichen Meßabständen, so dass keine sinnvollen Aussagen zu den steuernden Faktoren gemacht werden können (z.B. Großhangbewegungen im Lugnez und Heinzenberg/Graubünden). Ein besonders gut untersuchtes Beispiel zur Abklärung der externen Faktoren auf die Kinematik einer solchen Großhangbewegung ist der Talzuschub Gradenbach im oberen Mölltal/Kärnten. Zur detaillierten Auflösung der Kinematik kamen folgende über lange Zeiträume angewandten Meßmethoden zum Einsatz:

- Kontinuierliche Drahttextensometermessungen und Stahlbandmessungen an der Talzuschubsstirn
- GPS Messungen in verschiedenen Höhenlagen
- Großflächige Bergwasserspiegelmessungen in 14-tägigem Abstand

Zusätzlich wurden geodätische Messungen in mehrere Polygonzügen verteilt über die gesamte Talflanke durchgeführt.

### Kurzcharakteristik der Talzuschubsmasse:

- Gestein: Phyllit in verschiedener petrographischer Ausbildung
- Fläche: 2 km<sup>2</sup>, Höhe: 1100 m
- Volumen: ~ 150 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, Tiefgang max. > 150 m
- Durchschnittliche Geschwindigkeit über 20 Jahre: knapp 40 cm/Jahr

Negative Auswirkungen waren besonders verknüpft mit der Unterschneidung der Talzuschubsstirn in den Jahren 1965 und 1966 mit der Bereitstellung von ca. 1,3 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> Gesteine, das die Ortschaft Putschall zur Hälfte zerstörte. Die nach der Katastrophe erstellte Sperrenabstaffelung in der Talzuschubsstrecke zeigte schon 10 Jahre nach Fertigstellung erhebliche Ribbildungen (MOSER & WEIDNER, 1998). Bis Ende der 80iger Jahre waren die armierten Querwerke fast völlig zerstört. Aufgrund der seit 1967 gemachten Erfahrungen wurde Ende der 1990er Jahre mit einem völlig neuen Sanierungskonzept begonnen. Anstatt von starren Betonquerwerken wurden Dämme aus miteinander durch Stahlseile verbundenen Steinbrocken errichtet (EISENBARTH et al. 2004).

## 2.1 Der Bewegungsablauf über die Zeit

Eine detaillierte Aufschlüsselung der Deformationsvorgänge und damit auch der Bezug zu externen Faktoren konnte an der Talzuschubsstirn erstellt werden. Zur Verfügung standen z.T. über 20 Jahre 2 kontinuierlich aufzeichnende Drahttextensometer und eine Stahlbandmessung im 14-tägigen Abstand. Die Stahlbandmessungen zeigen ein regressiv zyklisches Verhalten. Bei Betrachtung eines einjährigen Zeitabschnittes ergibt sich ein differenziertes saisonales Bild, das sich in Wintergeschwindigkeiten mit ca. 0,02 cm/d, in Frühsommergeschwindigkeiten mit 0,4cm/d und in Spätsommer- und Herbstgeschwindigkeiten mit ca. 0,05 cm/d aufgliedern ließ (Abb. 1).

Eine verfeinerte Auflösung der Kinematik an der Talzuschubsstirn konnte mit Hilfe der Drahttextensometermessungen erreicht werden.

Zeitlich betrachtet fällt die Mehrzahl der Abschnitte mit hohen Verschiebungsraten auf die Monate Juni bis August und die Abschnitte mit den niedrigsten Raten auf den Zeitraum zwischen September und April. Das durchschnittliche jahreszeitliche Bewegungsverhalten zwischen 1980 und 1993 kann veranschaulicht werden, wenn alle Messwerte in ein Kalenderjahr projiziert werden und für jeden Tag der arithmetische Mittelwert berechnet wird. In Abb. 2a ist die daraus ermittelte kumulative Verschiebung und in Abb. 2b für charakteristische Abschnitte dieser Kurve durchschnittliche Verschiebungsraten dargestellt. Ab Ende Januar zeigt sich im Mittel ein Rückgang der Bewegungsrate auf ein Minimum mit etwa 0,01 cm/d (Mitte Februar bis Mitte April). Bis Anfang Juni werden durchschnittlich 0,044 cm/d registriert. Die maximale durchschnittliche Bewegungsrate mit 0,143 cm/d wird nur für zwei Wochen erreicht. Die Bewegungsrate hält sich im Anschluss bis Mitte August mit 0,111 cm/d auf hohem Niveau und fällt bis zum Jahresende sogar noch unter die Bewegungsrate vom Jahresbeginn (Abb. 2).

## 2.2 Der Einfluss der Hydrologie auf Betrag und zeitlichen Verlauf der Hangbewegung

Die Auswertung der Beziehungen zwischen den Niederschlägen, dem Bergwasserspiegel und der Hangbewegung sind aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes sehr schwierig. So ist zu bedenken, dass die Niederschläge nicht überall gleichmäßig verteilt oder in gleicher Art (z.B. als Regen oder Schnee) niedergehen. Die Durchlässigkeit des Gebirges variiert stark aufgrund dessen Inhomogenität. Außerdem können die in kurzen Intervallen benötigten Verschiebungsmessungen für die Untersuchung zeitlicher Zusammenhänge mit vertretbarem Aufwand nur an der Talzuschubsstirn durchgeführt werden. Zeitlich fallen Perioden mit hohen Verschiebungsraten fast ausschließlich auf die Monate Juni bis August. Es kann somit ein zyklisch-regressives Verhalten festgestellt werden, das auf jahreszeitlichen Einflüssen beruht (Bergwasserspiegelniveau, Mächtigkeit der Schneedecke und zeitlicher Verlauf des Abschmelzens im Frühjahr) sowie auf selteneren Niederschlags-Extremereignissen.

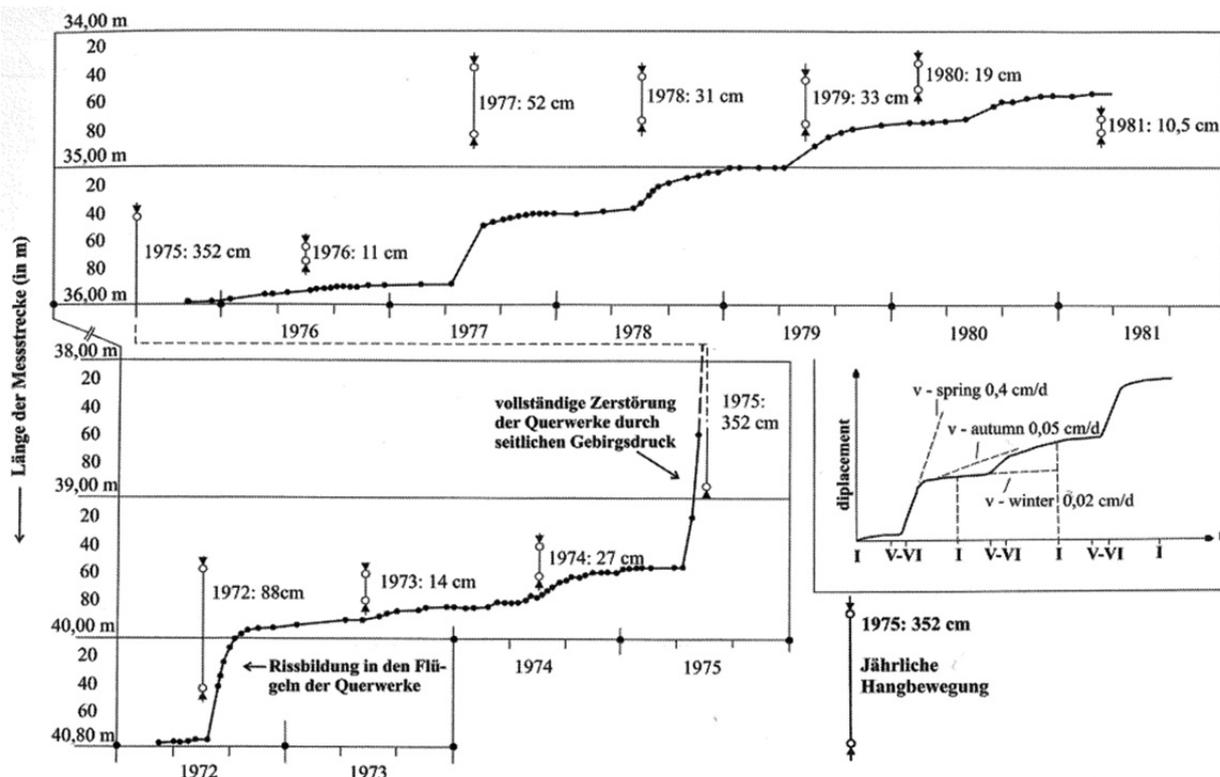


Abb. 1: Stahlbandmessungen an der Talzuschubstirn im 14-tägigem Abstand, Gradenbach/Kärnten (MOSER & WEIDNER 1998).

Fig. 1: 14-day interval steel-tape-measurements at the toe of the sagging of mountain slope Gradenbach/Carinthia (MOSER & WEIDNER 1998).

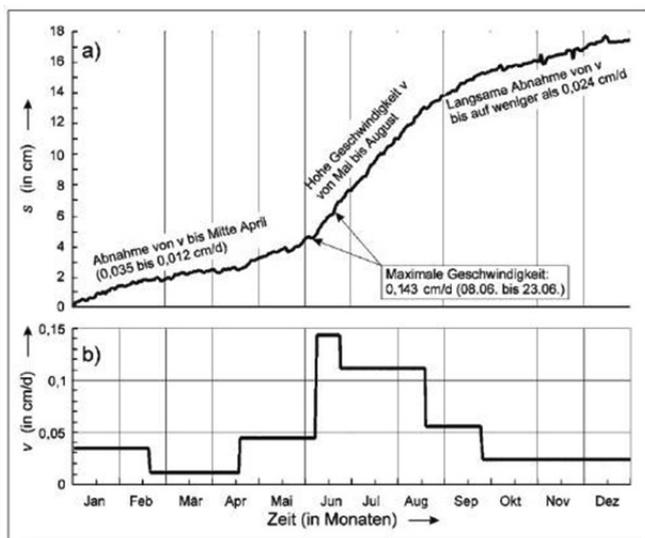


Abb. 2: Durchschnittliches jahreszeitliches Bewegungsverhalten an der Stirn des Talzuschubes Gradenbach.

a) Kumulative Verschiebung; b) Durchschnittliche Verschiebungsraten (linear interpolierte Teilstücke). Datengrundlage: Tägliche Relativverschiebungen an Drahtextensometer 1 (1980 bis 1993) (WEIDNER et al. 2011)

Fig. 2: Average annual movement pattern on the toe of the sagging slope (Gradenbach, Upper Carinthia).

a) Kumulative Verschiebung; b) Durchschnittliche Verschiebungsraten (linear interpolierte Teilstücke). Datengrundlage: Tägliche Relativverschiebungen an Drahtextensometer 1 (1980 bis 1993). (WEIDNER et al. 2011)

### Starkniederschläge gekoppelt mit der Schneeschmelze

Die Wirkung von Starkniederschlägen, die gleichzeitig mit der Schneeschmelze ein Vielfaches der durchschnittlichen Niederschlagshöhen erbringen, ist besonders kritisch, wie der große Bewegungsbetrag von mehr als 3,5 m im Jahre 1975 an der Talzuschubstirn belegt (WEIDNER 2000). Die extrem großen Bewegungsraten im Frühjahr bis Sommer 1975 sind sicher zum Großteil auf die starken Schneefälle von 28.-31. März mit ca. 76 mm Wasseräquivalent (WÄQ) und auf die daran anschließenden weiteren Schnee- und Regenfälle von 3.-7. April mit ca. 160 mm WÄQ zurückzuführen (Abb. 3).

### Die Abhängigkeit der Deformation von den Bergwasserspiegelschwankungen

Im Bereich des Talzuschubes wurden in den Jahren 1979 und 1980 für die Erkundung der Bergwasserverhältnisse insgesamt 16 Pegelbohrungen abgeteuft. Aufgrund der bedingten Zugänglichkeit des Gebietes und der zu erwartenden Teufenlage des Bergwasserspiegels wurden die Pegel nur im unteren und mittleren Teil des Talzuschubes errichtet (1230 m bis 1680 m). An der schon vorgestellten Messreihe am Talzuschub Gradenbach / Kärnten kann sehr deutlich der Kausalkette „Niederschlag – Bergwasserspiegelstände – Hangbewegung“ nachgegangen werden. Die Bergwasserspiegelstände sind ein Abbild der Schneeschmelzvorgänge, die in den Monaten März und April einsetzen und Anfang Mai an der südostexponierten Talflanke abgeschlossen sind. (Abb. 4).

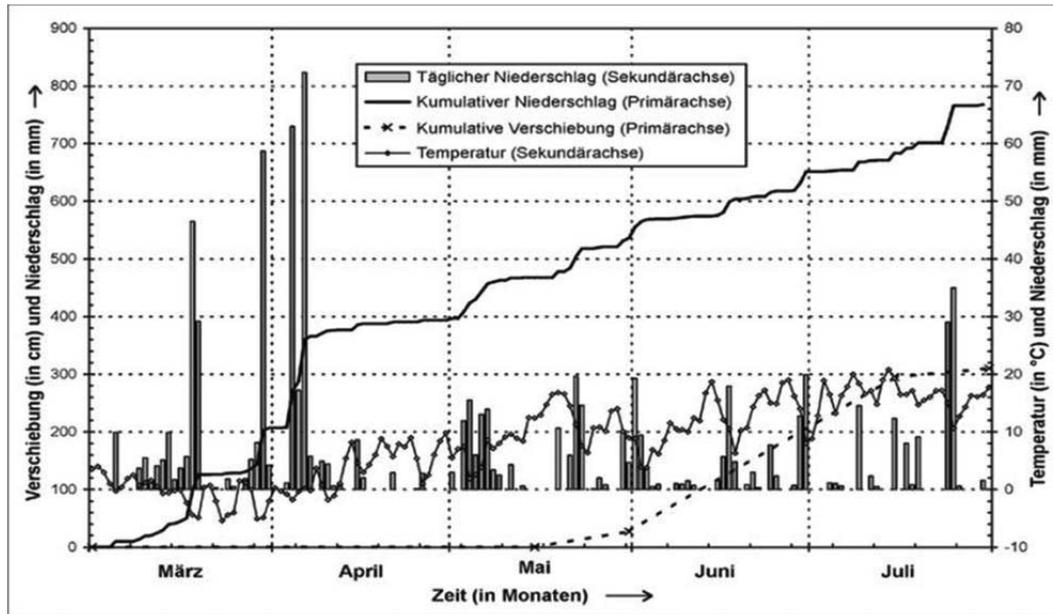


Abb. 3: Tägliche Niederschläge, berechnete kumulative Niederschläge, tägliche mittlere Lufttemperaturen (Station Egg/Fleißner) und kumulative Verschiebung an der Stahlbandmessstelle im Jahre 1975, Talzuschub Gradenbach / Kärnten (WEIDNER 2000).

Fig. 3: Daily precipitation, calculated cumulative precipitation, daily average air temperature (Station Egg/Fleißner) and cumulative displacement at the location of the steel tape measurement in 1975, sagging slope Gradenbach, Upper Carinthia (WEIDNER 2000).

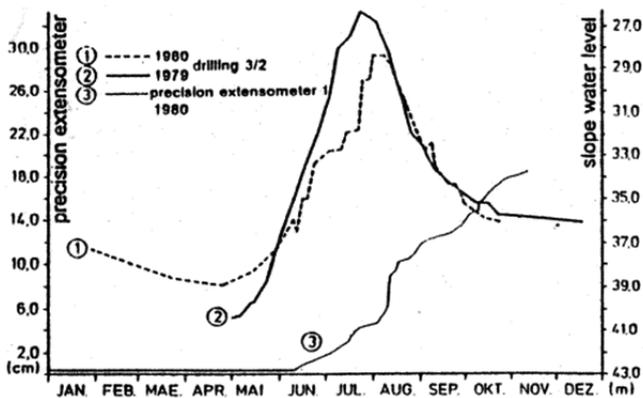


Abb. 4: Zusammenhang zwischen Hangwasserspiegel und Dynamik der Hangbewegung am Talzuschub Gradenbach/ Kärnten (MOSER, 1994).

Fig. 4: Correlation between slope water level and the course of slope movement at the Talzuschub Gradenbach/Carinthia (MOSER, 1994).

Die zeitlichen Zusammenhänge zwischen den Bergwasserspiegel-Schwankungen und der Deformation wurden mittels Kreuzkorrelation untersucht. Dabei wurde sowohl die zeitliche Abhängigkeit der Deformation von den Bergwasserspiegel-Änderungen (Wochenwerte) als auch die Abhängigkeit der Deformation vom Auftreten des Bergwasserspiegel-Maximums ermittelt. Die größten Bergwasserspiegel-Änderungen liegen 4 bis 12 Wochen vor den maximalen Verschiebungsraten an der Talzuschubsstirn, die Bergwassersmaxima dagegen 0 bis 4 Wochen. Die Korrelationskoeffizienten sind insgesamt trotz augenfälliger Übereinstimmung im zeitlichen Verlauf von Hangbewegungen und Bergwasserspiegel relativ gering. Der beste Zusammenhang kann zwischen der Hangbewegung und dem Bergwasserspiegel in Pegel 3b festgestellt werden (Abb. 5).

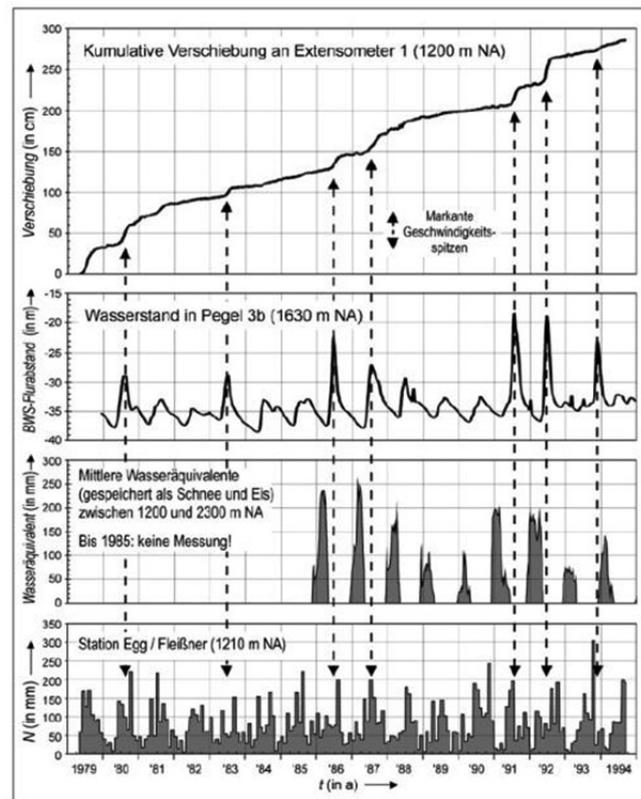


Abb. 5: Synoptische Darstellung von kumulativer Verschiebung  $x$  und Verschiebungsgeschwindigkeit  $v$  an Extensometer 1 sowie des Bergwasserspiegels in Pegel 3b und der Monatssummen der mittleren täglichen Niederschläge  $N$  an der Station Fleißner, Talzuschub Gradenbach/Kärnten (WEIDNER et al. 2011).

Fig. 5: Synoptic representation of cumulative displacement, slope water level, mean water equivalents at the hillslope and monthly precipitation totals, sagging slope Gradenbach/Carinthia (WEIDNER et al. 2011).

### Unterschneidungsvorgänge an der Talzuschubstirn

Ein weiterer externer Faktor, der zu einer Destabilisierung und Aktivierung besonders der Talzuschubstirn und angrenzender Bereiche beitragen kann, ist die Unterschneidung bei extremem Hochwasserabfluss am Fuß der Großhangbewegung. Ein besonders eindrucksvolles Beispiel für das staffelförmige Zurückgreifen von Instabilitäten über den gesamten Bereich der Talzuschubstirn ist die Reppwand-Gleitung/Kärnten. Durch ein Hochwasser im Jahre 1986 entwickelten sich tiefgreifende Rutschungen, die auch die Naßfeldbundesstraße auf 300 m fast völlig zerstörten. In Abb. 6 sind Ursachen und Wirkungen solcher Unterschneidungsvorgänge am Beispiel der Talzuschubstirn der Reppwand-Gleitung/Kärnten eingehender erläutert.

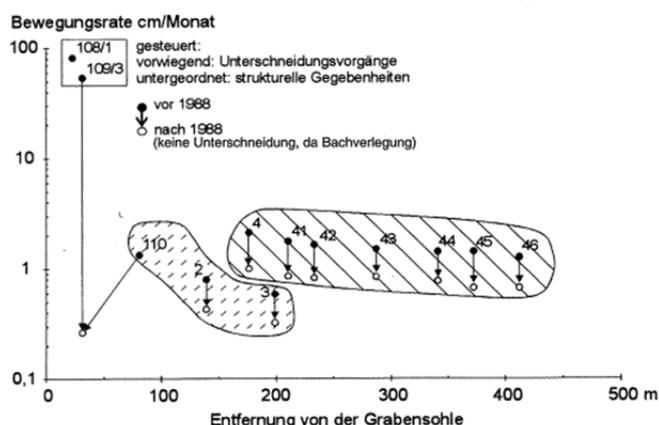


Abb. 6: Kinematische Homogenbereiche an der Talzuschubstirn der Reppwand-Gleitung/Kärnten. Kausalkette: extreme Niederschlagsituation (z.B. VB-Lagen im Süden der Alpen) → Abflusssteigerung von  $2\text{ m}^3/\text{s}$  auf  $60\text{ m}^3/\text{s}$  → Unterschneidung an Grabeneinhängen → verstärktes staffelförmiges Nachsitzen des Gebirgsverbandes → Aktivierung der gesamten Talzuschubmasse → Bildung enormer Geschiebmassen → Bedrohung talabwärtsliegender Ortschaften. (MOSER & WEIDNER 1998).

Fig. 6: Kinematical homogenous areas at the toe of the sagging mass Reppwand-Gleitung/Carinthia (MOSER & WEIDNER 1998).

### 3 Die steuernden externen Faktoren bei Bergzerreißungsfeldern („mountain splitting areas“)

Bergzerreißungsfelder stellen besonders an ihren talseitigen Rändern ein erhebliches Gefahrenpotential dar. Die geotechnische Situation ist gekennzeichnet durch die Bildung von Felsstürmen und immer wiederkehrenden Felsstürzen z.T. in  $10.000\text{ m}^3$ -Bereich (z.B. Treßdorfer Höhe/Kärnten, Zwerchwand/Oberösterreich, Hornbergl-Reutte/Tirol).

Sehr häufig wird die geologisch-geotechnische Konstellation bestimmt durch das Geomechanik-System „Hart auf Weich“. Ein weicher duktiler Sockel verursacht in der auflagernden harten spröden Deckplatte die Zerlegung der Platte in mehrere Randbereiche. Prinzipiell sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Eine spröde Deckplatte überlagert einen mächtigen, duktilen Sockel wie z.B. Feinklastika, Phyllite, Haselgebirge (z.B. Zwerchwand/Oberösterreich).

- Eine spröde Deckplatte überlagert eine geneigte, relativ gering mächtige, duktile Schicht bzw. eine Wechselfolge relativ kompetenter und inkompetenter Gesteine (z.B. Treßdorfer Höhe)

Das von der geotechnischen Konstellation „Hart auf Weich“ ausgehende Gefahrenpotential für Siedlungen und Infrastruktur erhält eine besondere Aktualität durch die Entwicklung sekundärer Massenbewegungen. Die Mobilisierung der duktilen Unterlage durch das Herabstürzen von Felsmassen kann in Abhängigkeit geologischer und morphologischer Faktoren eine Aktivierung größerer Schuttströme mit z.T. murenartigem Charakter bewirken. Z.B. waren die Felsstürze der Jahre 1978 bis 1982 an der Zwerchwand (Oberösterreich) Auslöser des Schuttstromes Stambach ( $8.000.000\text{ m}^3$ ), der im März 1982 zu einer akuten Bedrohung der Gemeinde Bad Goisern führte (ROHN 1991, LOTTER 2001).

Ein besonders detailliert untersuchtes Beispiel für die Ablösung solcher Felsstürme und ihrer Steuerung durch externe Faktoren ist das Bergzerreißungsfeld Treßdorfer Höhe (Abb. 7). Die Treßdorfer Höhe ist ein plateauformiger Berg, dessen Deckplatte aus Kalkstein flach nach Westen einfällt. Im Bereich des Zerreißungsfeldes beträgt die durchschnittliche Hangneigung ca.  $12^\circ$ , bevor talwärts an einer markanten konvexen Hangkante (Rand der Deckplatte) der Übergang in die steiler mit ca.  $30^\circ$  geneigten, zum Rudnigbach leitenden Hänge erfolgt (LOTTER & MOSER 2007).

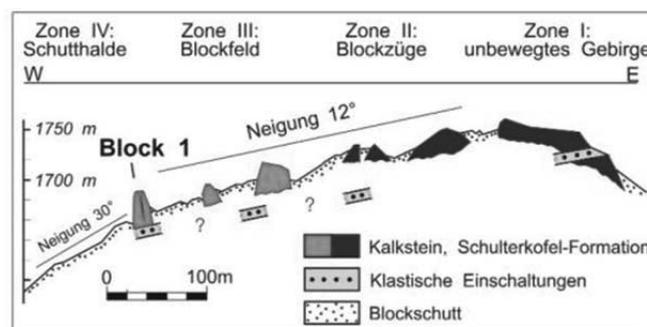


Abb. 7: Schematisch geologisch-morphologischer Längenschnitt des Bergzerreißungsfelds Treßdorfer Höhe/Kärnten (modifiziert nach GLAWE & MOSER 1993).

Fig. 7: Geological cross section of the mountain splitting area Treßdorfer Höhe/Carinthia, mod. after GLAWE & MOSER 1993.

Den westlichen talseitigen Abschluss des Bergzerreißungsfeldes bildet der Felssturm 1, dessen Teilblock 1A (ca.  $7000\text{ m}^3$ ) ein besonderes Felssturzpotential darstellt (10. Juni 2005 Kippbruch). Die Kinematik des Kippvorganges wurde von 1987 bis 1999 detailliert untersucht (GLAWE & MOSER 1993, LOTTER 2001; Abb. 8).

Nach einem zunächst ausgesprochen linearen Bewegungsverlauf („Kriechphase“) war ab 1993 eine kontinuierliche Zunahme der Bewegungsraten zu verzeichnen. Die Kipptrate gemittelt über die Jahre 1989 bis 1994 betrug ca.  $3\text{ mm}$  pro Höhenmeter und Jahr, für den Zeitraum 1996 bis 1998 hatte sie sich bereits auf knapp  $6\text{ mm}$  pro Höhenmeter und Jahr fast verdoppelt. Die Gesamtverschiebung am Top von Block 1A hatte sich dadurch für 1996 bis 1998 auf knapp  $20\text{ cm/a}$  erhöht. In den Jahren 1997 bis 1999 konnte eine detaillierte zeitliche Auflösung des Kippvorganges erreicht



werden. Zum Einsatz kamen Präzisionsextensometer mit Niederschlags- und Temperaturmessungen. Dies erlaubt die kontinuierliche Beobachtung der Kippbewegung unter dem Einfluss externer Faktoren mit einer zeitlichen kurzfristigen Auflösung des kinematischen Verhaltens (Abb. 9)

- Die Beschleunigung bei Schneeschmelze (verstärkt durch Niederschlag)
- Eine leichte Beruhigung im Hoch- bis Spätsommer
- Eine Herbst- bis Frühwinterbeschleunigung bei jahreszeitlich typisch hohen Regensummen
- Die deutliche Verzögerung mit dem Einsetzen der Frostperiode (Tab. 1)

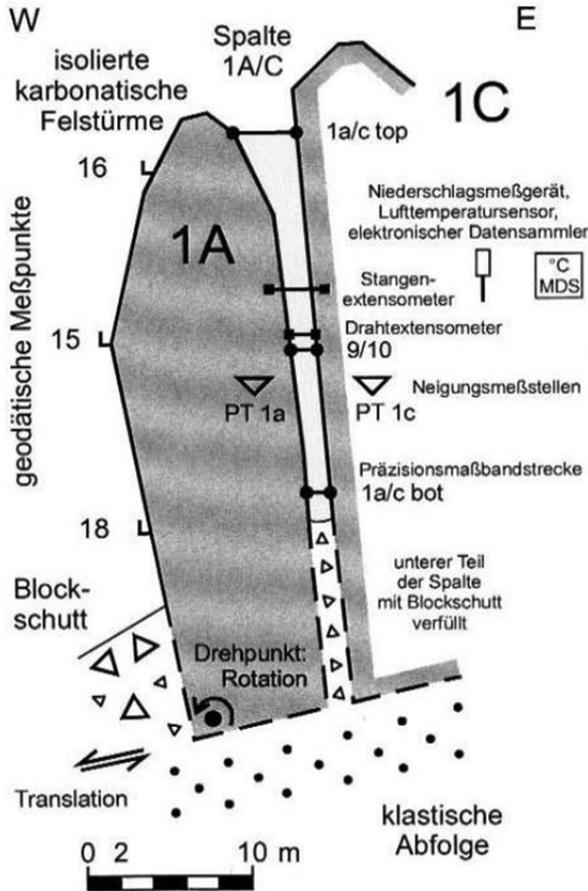


Abb. 8: Schematischer Längenschnitt durch die Teilblöcke 1A und 1C mit den Messeinrichtungen zur Erfassung der Kinematik. Der freistehende Felsturm 1A ist am 10. Juni 2005 durch Kippen kollabiert, Bergzerreißung Treßdorfer Höhe, Kärnten (LOTTER & MOSER 2007).

Fig. 8: Cross section of Block 1A including the monitoring sites (schematic), the failure of the pinnacle owing to toppling occurred at 10.June 2005, mountain splitting area Treßdorfer Höhe / Carinthia (LOTTER & MOSER 2007).

Der Bewegungsverlauf der kontinuierlichen Kluftöffnung gliedert sich in jahreszeitliche Phasen, die mit den externen Faktoren Niederschlag und Temperatur korrelieren und mit den parallel dazu periodisch erhaltenen Ergebnissen der Präzisionsmaßbandmessstrecke 9/10 übereinstimmen.

### Zusammenfassung der externen Einflüsse (Niederschlag, Schneeschmelze)

Kurz- und mittelfristig (von Minuten bis mehreren Monaten/jahreszeitlich) wird die durch den Kippvorgang von Block 1A verursachte Spaltenöffnung zwischen den Teilblöcken 1C und 1A ausgeprägt vom externen Faktor Wasserverfügbarkeit in Form von Niederschlag und dem temperaturabhängigen Verlauf der Schneeschmelze beeinflusst. Das regressiv zyklische Beschleunigungsverhalten über ca. ein bis drei Monate wird gesteuert durch:

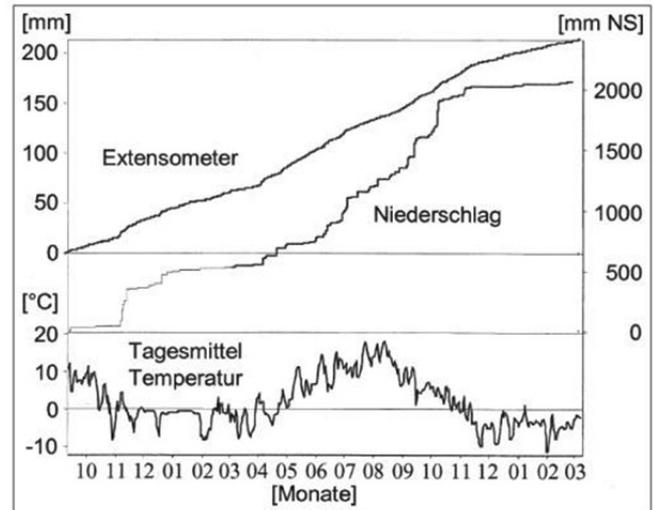


Abb. 9: Kontinuierliche Aufzeichnung der aufsummierten Öffnung der Spalte zwischen den Teilblöcken 1A und 1C (Divergenz des Drahtextensometers), Niederschlagssummenkurve und Tagesmittel-Temperaturgang vom 10.9.1997 bis 7.3.1999, (LOTTER & MOSER 2007).

Fig. 9: synchronous electronic record of displacement, temperature and precipitation at site 9/10 (LOTTER & MOSER 2007).

Tab. 1: Die monatliche Kluftöffnung am Drahtextensometer in der Spalte zwischen den Teilblöcken 1A und 1C und deren Bezug zur Niederschlagsmenge bzw. zur Wasserverfügbarkeit einschließlich der Schneeschmelze für den angegebenen Zeitraum, Bergzerreißung Treßdorfer Höhe / Kärnten (LOTTER 2001).

Tab. 1: Monthly joint opening in the crack between block 1A and 1C in relation to precipitation and water availability including snow melt processes for the given time frame, mountain splitting area, Treßdorfer Höhe / Carinthia (LOTTER 2001).

Block 1	Drahtextensometer Kluft 1A/C und Niederschlag 10/97 bis 02/99			
Monat/Jahr	Divergenzbetrag [mm]	mittl. Tagesrate [mm/d]	Niederschlag [mm]	Wasserverfügbarkeit, Faktoren (qualitativ) <sup>1)</sup>
Oktober 97	8,34	0,27	7,8	gering
November 97	17,85	0,60	321,9	hoch, ergiebiger Regen
Dezember 97	11,80	0,38	125,6	mittel, Regen u. Schnee
Januar 98	7,85	0,25	25,4	gering, Frost/Schnee
Februar 98	8,03	0,29	9,2	rel gering, z.T. Tauwetter
März 98	6,07	0,20	16,8	gering, Frost/Schnee
April 98	18,20	0,61	164,0	Schneeschmelze u. NS
Mai 98	17,03	0,55	64,9	v. a. Schneeschmelze
Juni 98	16,90	0,56	218,2	Schneeschmelze/Regen
Juli 98	13,63	0,44	202,2	anhalt. erhöht d. Regen
August 98	11,10	0,36	151,4	abnehmend, weniger NS
September 98	15,96	0,53	285,0	hoch, ergiebiger Regen
Oktober 98	18,79	0,61	311,9	hoch, ergiebiger Regen
November 98	13,43	0,45	72,8	abnehmend, weniger NS
Dezember 98	7,94	0,26	11,1	gering, Frost/Schnee
Januar 99	7,07	0,23	10,6	gering, Frost/Schnee
Februar 99	5,29	0,19	22,3	gering, Frost/Schnee
1998 gesamt	154,93	0,42	1532,9	NS unterdurchschnittlich (?), aber von April bis November anhaltende Durchfeuchtung ohne längere Trockenperioden

### Der Einfluss seismischer Ereignisse: das Nahbeben am 12.4.1998 im oberen Isonzo-Tal

Das Epizentrum lag nur ca. 30 km südöstlich der Treßdorfer Höhe bei der slowenischen Ortschaft Bovec im oberen Isonzo-Tal und verursachte dort erhebliche Schäden an Gebäuden und Leitungen. Das Erdbeben ereignete sich während einer kinematischen Phase der Stabilisierung von Teilblock 1A, d.h. bei abnehmender Öffnungsrate der Kluft 1A/C durch sinkende Wasserverfügbarkeit und zunehmende Festigkeit des klastischen Unterlagers. Die Erschütterungen durch das Erdbeben um 11.57 Uhr (MEZ) führen zu einer sprunghaften Divergenz von 0,27 mm auf 0,47 mm bei der nächsten Meßwertnahme um 10 Uhr (Abb. 10).

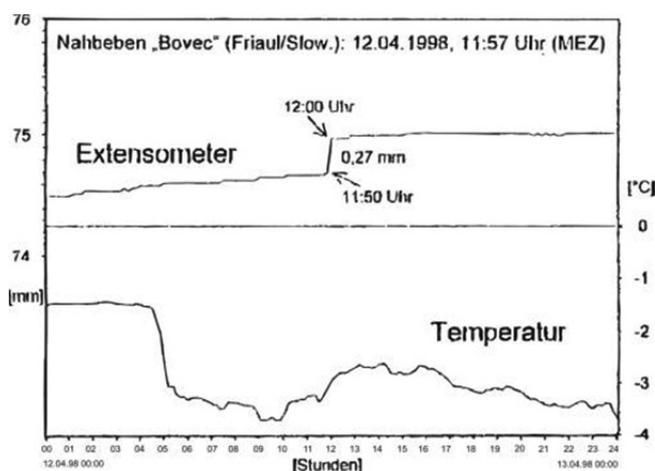


Abb. 10: Tagesverlauf des Drahtextensometers und des Temperatursensors am 12. April 1998 am Block 1: das seismische Ereignis (Epizentrum 30 km entfernt) bewirkt einen diskontinuierlichen, sprunghaften Bewegungsanteil, Berzzerreißung Treßdorfer Höhe, Kärnten (LOTTER 2001).

Fig. 10: Daily displacement curve of the continuous electronic extensometer and the temperature sensor at tower 1 in the 12. of April 1998: the seismic event leads to a discontinuous movement, mountain splitting Treßdorfer Höhe, Carinthia (LOTTER 2001).

Am Bergzerreißungsfeld HornberglReutte/Tirol kann z.B. wiederum der Einflussgröße Schneeschmelze nachgegangen werden. Die Großhangbewegung ist über 400 Höhenmeter durch eine erhebliche Gebirgsauflösung in Form von Bewegungsbahnen, breiten Bewegungszonen und Spalten gekennzeichnet. Durch flächendeckende Präzisionsstahlbandmessungen über einen Zeitraum von 16 Jahren und in 2-monatigen zeitlichen Abständen konnten die Deformationsvorgänge zeitlich näher aufgelöst werden. Die höchsten Bewegungsraten ergeben sich in den Frühsommermonaten herrührend von der Schneeschmelze. Außerdem kann entnommen werden, dass besonders hohe Schneerücklagen z.B. 1999 zu weit über dem Mittelwert liegenden Bewegungsraten führen (Abb. 11).

## 4 „Ungeklärtes“

Folgende Fragen sind bei Großhangbewegungen in Form von Talzuschüben schwierig zu beantworten und bieten immer wieder Anlass zu Spekulationen:

- Ist mit einem Bruch eines Teiles oder der gesamten Talflanke zu rechnen?
- Welche Gegebenheiten könnten diese Situation hervorrufen?
- Welche Kubaturen müssten für eine run-out Analyse berücksichtigt werden?

Besonders nach der Katastrophe von Vajont im Jahre 1963 aber auch nach dem ersten Aufstau des Gepatschspeichers/Tirol im Jahre 1965 sind immer wieder solche Fragen diskutiert worden. Prinzipiell sind die geologischen und geotechnischen Verhältnisse bei Großhangbewegungen dieses Typs anders geartet als bei Großhanggleitungen (z.B. Goldau), wo mit einem plötzlichen Versagen des gesamten Bereiches zu rechnen war. Die petrographische Ausbildung des Gesteine und geotechnische Gebirgsfazies der häufig beteiligten Tonschiefer, Phyllite und Glimmerschiefer lassen keine lang durchhaltenden Gleitbahnen entstehen, wie es z.B. bei der Großhanggleitung Vajont der Fall war. In der Vergangenheit gab es trotzdem bei stark erhöhten Bewegungsbeträgen und besonders bei sich exponentiell steigenden Deformationsraten die Überlegungen hinsichtlich eines Bruches eines größeren Bereiches der instabilen Talflanke. Hier sind als Beispiele außer der schon erwähnten Hangbewegung Hochmais am Gepatschspeicher die Talzuschübe 1975 Gradenbach/Kärnten, 1987 La Clapière/Meeralpen, 1989 Campo Vallemaggia/Tessin und in den 90iger Jahren Sedrun/Graubünden zu nennen.

Warum traten Kollapse von größeren Bereichen der Talflanken nicht ein?

- Die Bewegungsraten waren zwar erheblich erhöht, zeigten aber keinen dauerhaft exponentiellen Anstieg, der normalerweise zu einem Bruch des Gebirgskörpers führt (z.B. Talzuschub Gradenbach in den Frühsommermonaten 1975, s.a. Abb. 3)
- Die z.T. beobachteten exponentiell sich steigenden Deformationsraten betreffen nur kleinere Felsbereiche des in ein Schollenmosaik auf gelösten Gebirgsverbandes im oberen Bereich der instabilen Talflanke. Sie spiegeln offenbar nicht die geomechanische Situation der gesamten kriechend-gleitenden Masse wider (z.B. Großhangbewegung La Clapière im Jahre 1987, INTEREG 1996).

Der mögliche Grad der Bedrohung von Infrastruktur und Siedlungen im alpinen Raum wird sehr stark von der Reichweite einer abgehenden Felsmasse und damit von Volumen bestimmt. Einigermaßen plausible Angaben zu möglichen Kubaturen lassen sich aber nur für Teilbereiche der Großhangbewegung angeben. So konnte z.B. für die Stirn des Talzschubes Sedrun ausreichend präzise Volumenangaben gemacht und run-out Analysen erstellt werden (AMANN 2005).

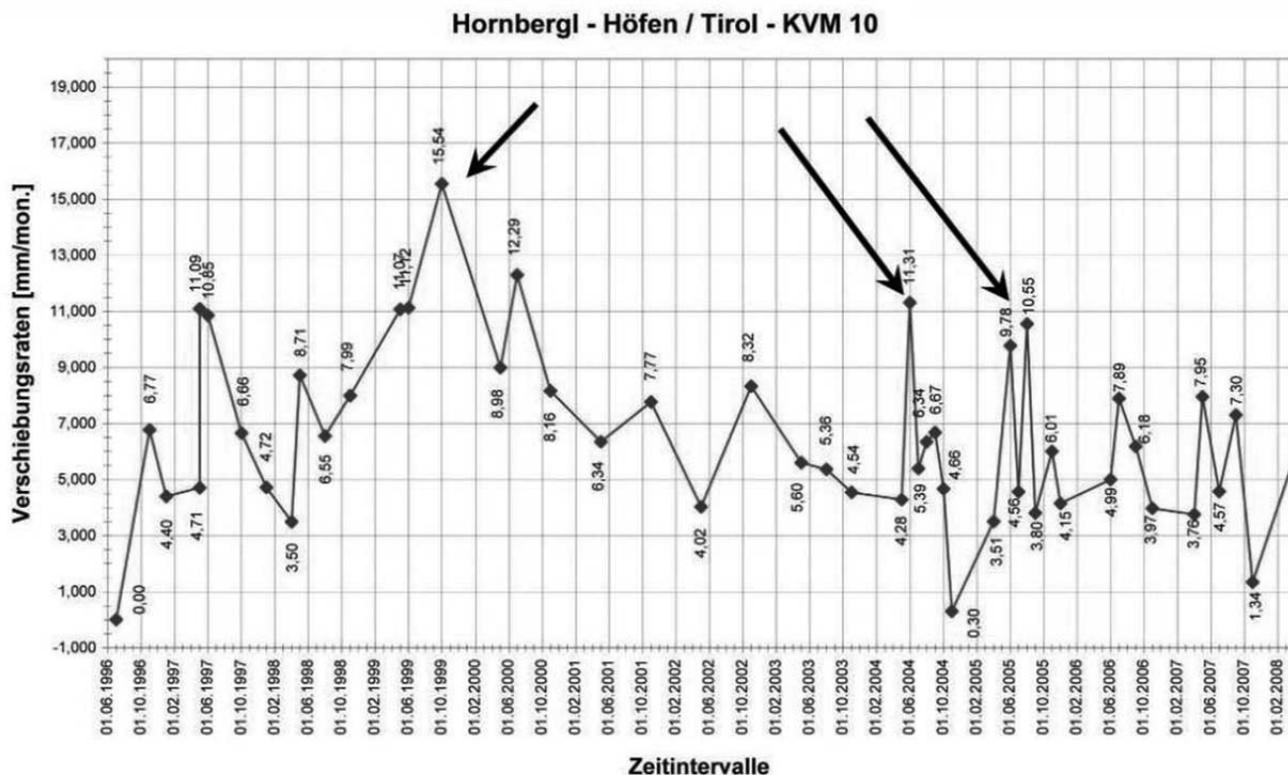


Abb. 11: Präzisionsstahlbandmessungen an einer größeren Bewegungszone im Bergzerreibungsfeld Hornberg-Reutte/Tirol. Die Verschiebungsraten (mm/Monat) zeigen deutlich erhöhte Bewegungsraten in den Frühsommermonaten und besonders in Jahren mit erheblichen Schneerücklagen (z.B. 1999) (Moser et al. 2009).

Fig. 11: Steel tape measurements between 1996 and 2007 at the mountain splitting area Hornbergl-Reutte/Tyrol. The displacement-time curve (mm/month) in a big trench shows accelerate deformation in the early summer month (MOSER et al. 2009).

Ein ungeklärtes Problem am Rande besonders von Bergzerreibungsfeldern ist die Felssturzprognose. Als Beispiel kann wiederum das Bergzerreibungsfeld TreßdorferHöhe/Kärnten herangezogen werden. Im Vorfeld einer in naher Zukunft erwartenden Felssturzes durch Kippbruch von Teilblock 1A (7000 m<sup>3</sup>, s.a. Abb.8) wurde Anfang der neunziger Jahre ein erstes Prognosemodell erstellt (GLAWE et al. 1993). Es beruht auf einer kinematischen, statischen und phänomenologischen Analyse des Blocks. Nach VOIGHT (1988) ist dies der Versuch einer langfristigen Vorhersage (Monate bis Jahre) mit der Angabe von verschiedenen Zeitfenstern. Diese basieren auf gemessenen Größen wie auch auf Annahmen, die den möglichen Eintritt des Ereignisses zeitlich eingrenzen sollen. Das Modell hat sich in den darauffolgenden Jahren auch nach Korrektur gemäß der laufenden Bewegungsmessungen nur teilweise in der angenommenen Form bestätigt (LOTTER et al 2001).

Ungeklärt ist bei allen vorgestellten Hangbewegungen besonders die Voraussage der Langzeitentwicklung und möglicher Krisensituationen. Es muss von sehr komplexen Faktoren ausgegangen werden, die aus Regionalmodellen abgeleitet werden müssen. Die Erstellung von regionalen Klimamodellen bereitet ebenso wie die Berechnung der globalen Modelle derzeit noch erhebliche Schwierigkeiten.

## 5 Auslösende Ursachen bei kleinflächigen Lockergestein-Rutschungen

Der auslösende Faktor von Hangbewegungen dieser Art ist in fast allen Fällen im Alpenraum ein Niederschlagsereignis, wobei dessen Charakteristik in Abhängigkeit der Intensität und Dauer der Niederschläge steht (MOSER 1997, RICKLI et al. 2000). So kann man grundsätzlich zwischen 3 Klassen unterscheiden (Abb. 12):

- Klasse 1: Gewitterregen kurzer Dauer
- Klasse 2: Gewitterregen längerer Dauer
- Klasse 3: Landregen

### Beispiel Klasse 1 (Sachseln/Melchtal 1997):

In Sachseln und im Melchtal wurden Niederschlagsintensitäten von 70-90 mm/h und 120-150 mm in 2 Stunden gemessen. Die gesamte Gewitterzelle liefert in einem Zeitraum von 4½ Stunden 149 mm Niederschlag. Das Ergebnis wurde als das zweitgrößte seit 1978 in der Schweiz registriert. In Abb. 12 ist das Ereignis von Sachseln/Melchtal der Klasse 1 zuzuordnen.

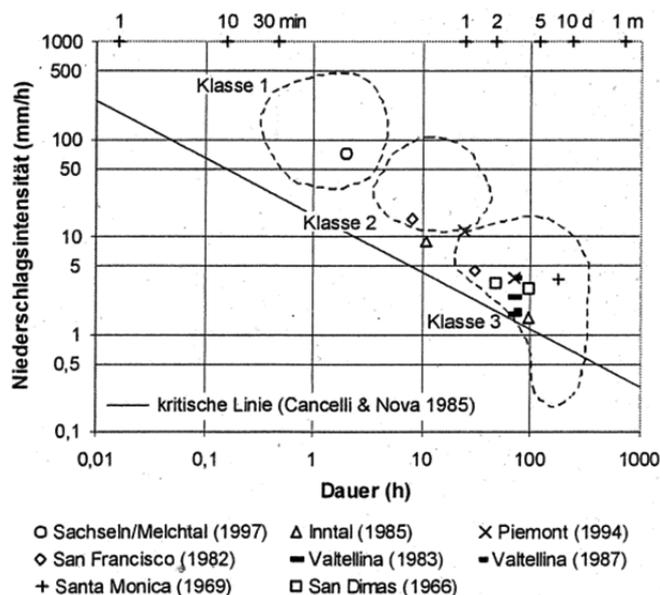


Abb. 12: Wechselwirkung zwischen Intensität und Dauer der Niederschläge und dem Anbruchereignis

Fig. 12: Relationship between intensity and duration of the precipitation and the detachment of the soil slips

## Literatur

- AMANN, F. (2005): Großhangbewegung Cuolm Da Vi (Graubünden, Schweiz), Geologisch-geotechnische Befunde und numerische Untersuchungen zu Klärung des Phänomens. – Unveröff. Diss., Friedrich-Alexander-Univ. Erlangen-Nürnberg, 204 S., Erlangen
- BRÜCKL, E., BRUNNER, F.K. & KRAUS, K. (2006): Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. – *Engineering Geology*, 88, 149-159, Amsterdam (Elsevier)
- EISENBARTH, ST., MOSER, M. & WEIDNER, ST. (2004): Zur Nachhaltigkeit von Baumaßnahmen bei tiefgreifenden Hangbewegungen im alpinen Raum. – *Int. Symp. Interpraevent*, IV, 115-126, Riva
- GLAWE, U. & MOSER, M. (1993): Meßtechnische und theoretische Bearbeitung von Bergzerreibungen und Blockbewegungen. – *Felsbau*, 11/5, 235-250, Essen (Verlag Glückauf GmbH)
- GLAWE, U., ZIKA, P., ZVELEBIL, J., MOSER, M. & RYBAR, J. (1993): Time prediction of a rock fall in the Carnic Alps. – *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 26, 185-192, London
- INTEREG I (1996): Risques generes par les grands mouvements de versant. Etude comperative de 4 sites des Alpes franco-italiennes.- Programme INTEREG 1/Italy – France, 270 S., Grenoble
- LIENHART, W. & BRUNNER, K. (2013): Geodätische Überwachung von gravitativen Massenbewegungen am Beispiel des Gradenbach-Observatoriums. – *Landslide* (in press)
- LOTTER, M. (2001): Geotechnische und kinematische Untersuchungen an instabilen Felshängen im alpinen Raum. – Unveröff. Diss., Friedrich-Alexander-Univ. Erlangen-Nürnberg, 324 S., Erlangen
- LOTTER, M., MOSER, M. & MEIER, H. (2001): Langzeitverhalten und Deformationsanalyse von instabilen Felshängen. – Nationale Tagung für Ingenieurgeologie Karlsruhe 2001, *Geotechnik*, Sonderband 13, 27-34, Essen
- LOTTER, M. & MOSER, M. (2007): Die Massenbewegungen der Naßfeldregion. – *Abh. Geol. B.-A.*, 61, 159-173, Wien
- MOSER, M. (1994): Geotechnics of large-scale slope movements (“Talzuschübe”) in Alpine regions. – 7<sup>th</sup> Int. IAEG Congress, 1533-1542, Lisboa
- MOSER, M. (1997): Zur Prognose von Massenbewegungen.- *Ecolgae Geol. Helv.*, 90, 381-391, Basel
- MOSER, M. & WEIDNER, S. (1998): Die Auswirkungen von Talzuschüben auf die alpine Umwelt. – *N. Jb. Geol. Paläont. Anh.*, 208, 531-548, Stuttgart (Schweizerbart)
- MOSER, M. WUNDERLICH, T. A. & MEIER, H. (2009): Kinematische Analyse der Bergzerreibung Hornbergl-Reutte (Tirol).- *Jb. Geol. B.-A.*, Bd. 149, 177-193, Wien
- POISEL, R. & EPPENSTEINER, W. (1989): Gang und Gehwerk einer Massenbewegung. Teil 2: Massenbewegungen am Rande des Systems ‚Hart auf Weich‘. – *Felsbau* 7: 16-20, Essen
- RICKLI, C., ZIMMERLI, P. & ZÜRCHER, K. (2000): Waldwirkungen auf oberflächennahe Rutschungen anlässlich der Unwetterereignisse vom August 1997 in Sachseln, Schweiz.- *Int. Symp. Interpraevent 2000*, 1, 305-316, Villach
- ROHN, J. (1991): Geotechnische Untersuchungen an einer Großhangbewegung in Bad Goisern (Oberösterreich).- *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe*, 14, XVIII+193 S., Karlsruhe
- WEIDNER, S. (2000): Kinematik und Mechanismen tiefgreifender alpiner Hangdeformationen unter besonderer Berücksichtigung der hydrologischen Verhältnisse.- Unveröff. Diss., Friedrich-Alexander-Univ. Erlangen-Nürnberg, 246 S., Erlangen
- WEIDNER, S., MOSER, M. & LANGE, E. (1998): Influence of hydrology on sagging of mountain slopes (“Talzuschübe”) – New results of time series analysis. – 8<sup>th</sup> International IAEG Congress, Vol. 2, 1259-1266, Rotterdam (Balkema)
- WEIDNER, S., MOSER, M. & LANG, E. (2011): Geotechnische und kinematische Analyse des Talzuschubes Gradenbach (Kärnten/Österreich).- *Jb. Geol. B.-A.*, Bd. 151, 17-60, Wien