

# Die Standsicherheit von Festgesteinsböschungen

Rainer POISEL

## 1. Einleitung

Die Standsicherheit von Festgesteinsböschungen wird vor allem von Trennflächen (Klüften) beeinflusst. Diese ermöglichen den von ihnen gebildeten Gesteinskörpern (Kluftkörpern) Lageveränderungen, wenn die Festigkeit in den für die Standsicherheit maßgebenden Trennflächen überschritten wird. Diese Lageveränderungen können zum Verlust der Standsicherheit führen und bilden dann charakteristische Versagens- bzw. Ablösemechanismen (Abb. 1; POISEL & PREH, 2004). Nach der Ablösung kann die weitere Bewegung als Gleiten und/oder Rotieren erfolgen, die in Stürzen und Fallen übergehen kann.

Eine wesentliche Voraussetzung für realitätsnahe Untersuchungen der Standsicherheit ist daher eine ingenieurgeologische Aufnahme des weiteren Bereichs eines Tagbaus. Im Fall eines Tagbaus in Festgesteinen besteht eine solche Aufnahme vor allem in einer strukturgeologischen Kartierung, bei der die Art (Schichtung, Schieferung, Kluft usw.) und Raumstellung der Trennflächen erfasst und dokumentiert wird. Dabei spielen die Schwankungen der Raumstellungen, für deren Erfassung die Messung von mehreren hundert Trennflächen erforderlich sein kann, eine wesentliche Rolle.

Eine wichtige Vorinformation über die Festigkeit von Trennflächen ermöglicht der sogenannte „Tilt-Test“, der bereits im Rahmen der ingenieurgeologischen Aufnahme durchgeführt werden kann. Dabei werden zwei aufeinanderliegende Kluftkörper so lange gekippt, bis der obere Kluftkörper auf dem darunterliegenden abgleitet. Die Neigung der Trennfläche zwischen den beiden Kluftkörpern, bei der der obere abgleitet, entspricht bei Vernachlässigung der Kohäsion dem Reibungswinkel der Trennfläche.

Bei manchen Versagens- bzw. Ablösemechanismen haben auch die Art und Eigenschaften des Gesteins (des Kluftkörpermaterials) Einfluss. Darauf wird bei der Beschreibung der einzelnen Versagens- bzw. Ablösemechanismen (siehe unten) eingegangen.

## 2. Versagens- oder Ablösemechanismen von Festgesteinsböschungen

### 2.1 Fallen

Reines Fallen als Ablösemechanismus kann nur aus Überhängen erfolgen. Darauf wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, weil in sachgemäß geführten Steinbrüchen Überhänge nicht auftreten.

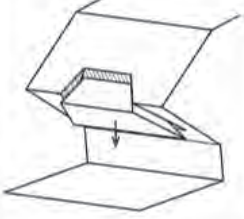
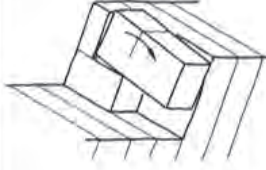
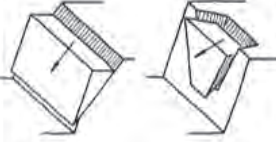

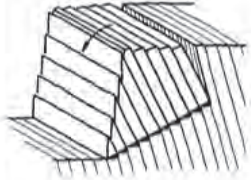
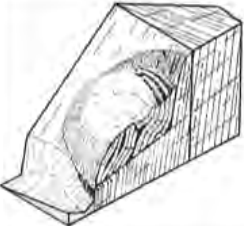


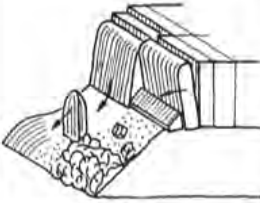

	<p><b>Fallen von Kluffkörpern</b></p>		<p><b>Rotation einzelner Kluffkörper (Torsionsbruch)</b></p>
	<p><b>Gleiten eines Kluffkörpers auf einer oder auf zwei Trennflächen (Translationsgleitung)</b></p>		<p><b>Knicken von säulen- bzw. tafelförmigen Kluffkörpern</b></p>
	<p><b>Gleiten mehrerer Teilkörper auf einer polygonalen Gleitfläche</b></p>		<p><b>Kippen von säulen- bzw. tafelförmigen Kluffkörpern (Vorwärtsrotation; ähnlich wie Dominosteine)</b></p>
	<p><b>Rock slumping (Rückwärtsrotation von Kluffkörpern)</b></p>		<p><b>Biegekippen</b></p>
	<p><b>Gleiten eines Bruchkörpers auf einer muschelförmigen, neugebildeten Gleitfläche (Rotationsgleitung)</b></p>		<p><b>Hangkriechen (i.a. in Fels mit geringer Festigkeit, z.B. in Phyllit)</b></p>
	<p><b>Abfahren, Abgleiten oder Kippen von Kluffkörpern am Rand eines Systems „Hart auf Weich“</b></p>		<p><b>Kink band slumping, („Knickbandsackung“)</b></p>

Abb. 1. Versagens- bzw. Ablösemechanismen von Festgesteinsböschungen

## 2.2 Gleiten eines Kluffkörpers auf einer oder auf zwei Trennflächen (Translationsgleitung)

Gleiten eines Kluffkörpers ist einer der in Felsböschungen am öftesten auftretenden Versagensmechanismen. Gleiten tritt auf, wenn der Scherwiderstand in der Trennfläche oder in den Trennflächen, entlang derer der Kluffkörper hangabwärts gleitet, von den Scherkräften (hergerufen z.B. durch das Eigengewicht und Wasserdrücken) überschritten wird.

Dieser Mechanismus kann sowohl die Standsicherheit einer Abbauetage gefährden als auch in sehr großen Dimensionen auftreten. Ein Beispiel für das Abgleiten von Felsmassen auf einer Ebene in großen Dimensionen ist der Felssturz im ehemaligen Tagbau Spitz an der Donau am 11.10.2002 (Abb. 2) und der Bergsturz Goldau in der Schweiz 1806.

Der Formelapparat für die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus ist in WYLLIE & MAH (2004) ausführlich beschrieben. Die Berechnung kann direkt mittels des Programms rocplane (<https://www.rocscience.com/rocscience/products/rocplane>) erfolgen.



*Abb. 2. Abgleiten von Felsmassen auf einer Ebene in großen Dimensionen im ehemaligen Tagbau Spitz an der Donau am 11.10.2002 (Blickrichtung Westen)*

Wenn das Abgleiten eines Blockes auf einer Trennfläche in Richtung der Falllinie dieser Trennfläche durch eine andere Trennfläche behindert wird, erhöht dies die Standsicherheit wesentlich (Abb. 3). Umgekehrt kann ein Wegfallen einer solchen Behinderung die Standsicherheit dramatisch reduzieren. Dies führt dazu, dass zufolge der Schwankungen der Raumstellungen der Trennflächen in einem bestimmten Fall keine eindeutige Aussage betreffend die Standsicherheit möglich ist. In einem solchen Fall müssen statistische Methoden zur Beurteilung herangezogen werden. Das Programm „swedge“ (<https://www.rocscience.com/rocscience/products/swedge>) ermöglicht rasche rechnerische Untersuchungen solcher Fälle.

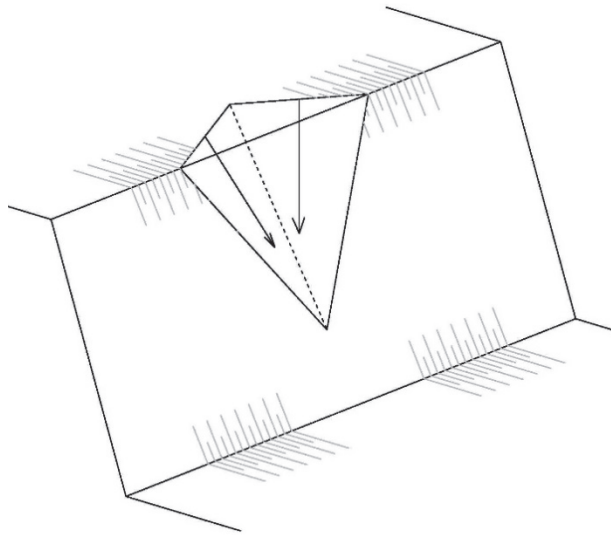


Abb. 3. Versagen einer Felsböschung durch Gleiten eines Kluttkörpers auf zwei Trennflächen (Pfeile stellen die Fallpfeile der beiden Trennflächen dar)

Bei der Untersuchung der Standsicherheit eines Felskörpers nach den oben beschriebenen Vorgangsweisen wird vorausgesetzt, dass alle angreifenden Kräfte durch dessen Schwerpunkt verlaufen, um Rotationen auszuschalten. In der Realität ist dies jedoch nicht der Fall, sodass Rotationen auftreten können, die aber meistens die Standsicherheit wesentlich mehr gefährden als reine Translationen. Bei Untersuchungen der Standsicherheit ist daher von Fall zu Fall zu entscheiden, ob auch Rotationen zu berücksichtigen sind (s. 2.7).

### 2.3 Gleiten mehrerer Teilkörper auf einer polygonalen Gleitfläche

Eine Felsmasse kann nur dann auf einer polygonalen Gleitfläche gleiten, wenn sie durch Bruchflächen, die in den Knickpunkten der Gleitfläche ansetzen, in Teilkörper zerlegt ist (s. Abb. 4). Diese Bruchflächen können sowohl bereits vorhanden sein, als auch im Zuge der Bewegung erst gebildet werden und ermöglichen die für die Bewegung notwendigen Scherverschiebungen zwischen den Teilkörpern.

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus ist mittels der Kinematischen Elemente Methode (GUßMANN, 1988; Abb. 4) oder mittels UDEC (Itasca) möglich.

Ein eindrucksvolles Beispiel für diesen Mechanismus in großen Dimensionen ist die Massenbewegung im Val Vajont (Italien), bei der 250 Mio m<sup>3</sup> Fels in den Vajont-Stausee glitten und die verdrängten Wassermassen die Stadt Longarone im Piavetal zu einem großen Teil zerstörten (Abb. 5).

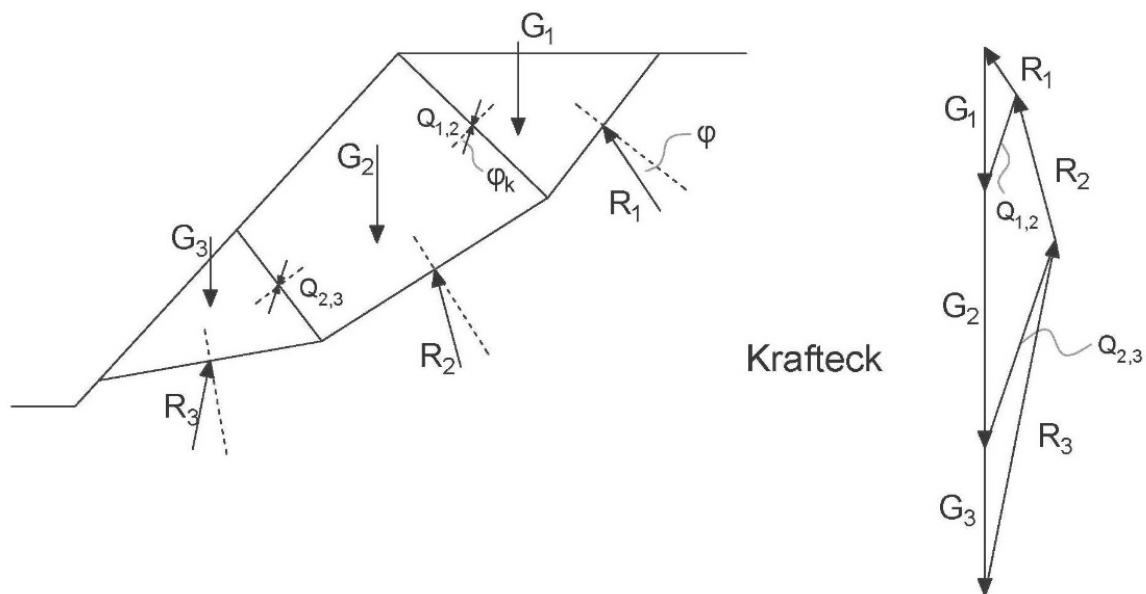


Abb. 4. Standsicherheitsuntersuchung eines in Teilkörper zerlegten Felskörpers auf einer polygonalen Gleitfläche mittels der Kinematischen Elemente Methode.



Abb. 5. Massenbewegung Vajont aufgenommen bei einem Flug über dem Piavetal; Blickrichtung Osten (Vajonttal aufwärts); im Vordergrund die Staumauer, Gleitfläche rechts, Restspeichersee im Hintergrund; Piavetal parallel zur Bildebene. (aus: STÜWE & HOMBERGER, 2011)

## 2.4 Rock slumping (Rückwärtsrotation von Kluffkörpern)

Dieser Versagensmechanismus verläuft ähnlich wie das Gleiten einer zu flach an die Wand angelehnten Leiter (KIEFFER, 2003). Dabei gleiten tafelige Kluffkörper auf horizontalen bis flach hangauswärts fallenden Klüften sowie auf steiler als die Abbauwand einfallenden Klüften (Abb. 6). Dies bedeutet, dass Trennflächen, die allein die Standsicherheit nicht gefährden, in der beschriebenen Kombination sehr wohl zum Versagen der Böschung führen können.

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus erfolgt am zweckmäßigsten mittels UDEC bzw. 3DEC, wenn räumliche Effekte eine Rolle spielen könnten (Abb. 6).

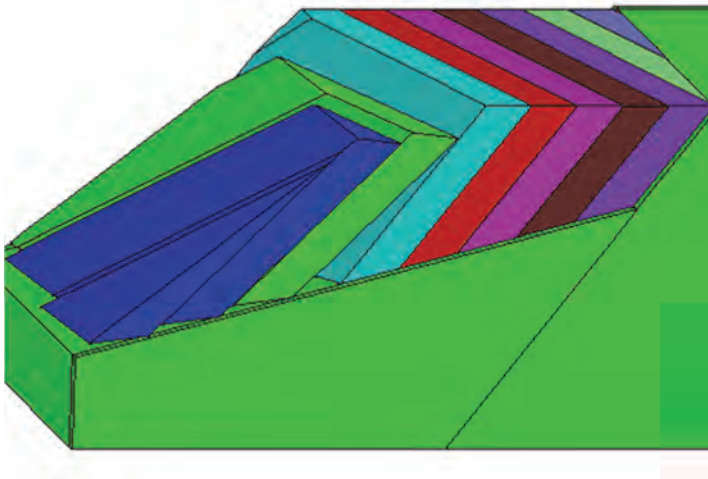


Abb. 6. Räumliche Untersuchung von Rock slumping mittels 3DEC. (aus: WOLLINGER, 2003)

## 2.5 Gleiten eines Bruchkörpers auf einer muschelförmigen, neugebildeten Gleitfläche (Rotationsgleitung)

Dieser Versagensmechanismus kann in Fels mit geringen Festigkeiten, z.B. in stark zerlegtem oder verwittertem Fels auftreten. Dabei ist die Kluffkörpergröße wesentlich kleiner als die Böschungshöhe. Dieses Verhalten ähnelt damit dem Versagen einer Lockergesteinsböschung in Form eines Gleitkreises.

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus kann mittels Programmen, die auf BISHOP (1955) beruhen, oder mittels „Slide“ (<https://www.rocscience.com/rocscience/products/slide>) erfolgen.

## 2.6 Abfahren, Abgleiten oder Kippen von Kluffkörpern am Rand eines Systems „Hart auf Weich“

Das Abfahren, Abgleiten oder Kippen turmartiger bzw. plattenförmiger Kluffkörper am Rand eines Systems „Hart auf Weich“ tritt bei Lagerung eines kompetenten (steifen, festen) Felskörpers auf einem inkompetenten (weichen, weniger festen) Sockel auf (POISEL & EPPENSTEINER, 1988 und 1989). Dabei kommt es zufolge des Auspressens und Ausweichens des Sockelmaterials zu einer Zugbeanspruchung im darüber lagernden, steifen Felskörper und in weiterer Folge zu einer Zerlegung in turmartige und plattenförmige Großkluffkörper am Rand des steifen Felskörpers (Abb. 7), sofern eine solche Zerlegung nicht schon vorher vorhanden war. Das aufrechte Abfahren der Großkluffkörper tritt vor allem dann auf, wenn sie bereits tief in das Sockelmaterial eingedrungen sind. Das Abgleiten führt zur Versiegelung des Sockelmaterials und damit zu einer Stabilisierung. Kippen tritt vor allem bei steilen Sockelböschungen auf und ist der gefährlichste der genannten drei Möglichkeiten, weil er oft unvermittelt auftritt.



*Abb. 7. Zerlegung des kompetenten Felskörpers auf einem inkompetenten Sockel am Rande eines Systems „Hart auf Weich“ (Südabstürze der Veitschalpe; im Wesentlichen Wettersteinkalke und -dolomite auf Werfener Schichten).*

Ein in Steinbrüchen häufiger Fall eines Systems „Hart auf Weich“ ist eine Wechsellagerung von steifen, festen und weichen, weniger festen Gesteinen. In einem solchen System ziehen die steifen Lagen die Spannungen an und übernehmen damit die Funktion einer Bewehrung. Das Brechen der steifen Lagen ist daher wesentlich gefährlicher als ein Nachgeben der weniger festen Lagen.

Die rechnerische Untersuchung des Verhaltens eines solchen Systems ist nur mittels numerischer Methoden möglich.

## **2.7 Rotation einzelner Kluffkörper (Torsionsbruch nach GOODMAN, 2003)**

Rotationen von Kluffkörpern gefährden die Standsicherheit von Festgesteinsböschungen meistens wesentlich mehr als reine Translationen, wenn sie kinematisch möglich sind. Die Entscheidung, ob Rotationen eines Kluffkörpers kinematisch möglich sind, kann z.B. mittels eines Modellversuchs (physikalisches Modell des Kluffkörpers einschließlich seiner Lagebedingungen) gefällt werden.

Abbildung 8 zeigt den Zustand des ehemaligen Tagbaus Spitz an der Donau unmittelbar vor dem Felssturz 1984. Durch die Änderung der Abbaurichtung und die Annäherung des neuen Bruchs an das südliche Widerlager des Felsgewölbes im alten Bruch wurde das Widerlager so aufgelockert und geschwächt, dass es am 4.10.1984 versagte und die darüber liegenden Felspartien, die sich noch auf das nördliche Widerlager abstützen konnten und dadurch um eine Achse normal auf die Gleitfläche rotierten, abglitten. Die Rotation hatte zur Folge, dass die abgelöste Felsmasse nicht nur in die alte Bruchsohle abglitt, sondern ein Teil davon auch in den neuen Bruch abstürzte und dabei Arbeiter und Geräte gefährdete.



Abb. 8. Ehemaliger Tagbau Spitz an der Donau unmittelbar vor dem Felssturz am 4.10.1984

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus (einschließlich der Kinematik) ist wesentlich aufwändiger als die Untersuchungen reiner Translationen und kann mittels des Formelapparats von WITTKÉ (1984), nach PÖTSCH & SCHUBERT (2006) oder mittels UDEC (im zweidimensionalen Fall) oder 3DEC (im dreidimensionalen Fall) erfolgen.

## 2.8 Knicken von säulen- bzw. tafelförmigen Kluftkörpern

(Aus-)Knicken von säulen- bzw. tafelförmigen Kluftkörpern ereignet sich bei Etagenhöhen bis zu 15 m nur in äußerst dünnbankigen Gesteinen und tritt daher in sachgemäß betriebenen Steinbrüchen nur selten auf.

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus ist mittels des auf sehr konservativen Ansätzen beruhenden Verfahrens von CAVERS (1981) möglich. PREH (2004) zeigte, dass die Knicklänge in solchen Hängen wesentlich kürzer und die Standsicherheit daher wesentlich größer als gemäß CAVERS (1981) ist.

## 2.9 Kippen von säulen- bzw. tafelförmigen Kluftkörpern (Blockkippen)

Wird der Fels in einem Hang durch

- steil in den Hang einfallende Trennflächen sowie durch
- hangauswärtsfallende, etwa normal auf die in den Hang steil einfallenden Trennflächen stehende Klüfte

in Kluftkörper (Blöcke) zerlegt, kann es zum Hangauswärtskippen der Kluftkörper kommen (Abb. 9). Dieser Vorgang ist dem Umfallen von Büchern im Regal oder jenem von Dominosteinen ähnlich.



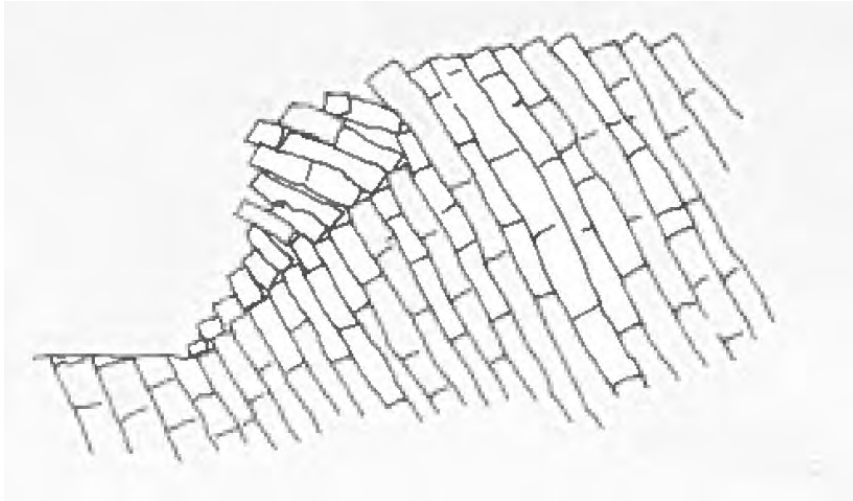


Abb. 9: Kippen von säulen- bzw. tafelförmigen Kluttkörpern (Blockkippen).  
aus: GOODMAN & BRAY (1976)

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus ist mittels des von GOODMAN & BRAY (1976) entwickelten Verfahrens möglich, auf dem das Programm „roctopple“ (RocTopple – Rocscience (<https://www.rocscience.com/rocscience/products/roctopple>)) beruht. Da dieses Verfahren meist schlecht konvergiert, wird empfohlen, diesen Mechanismus mittels UDEC bzw. 3DEC, wenn räumliche Effekte eine Rolle spielen könnten, zu untersuchen.

## 2.10 Biegekippen

Ist das für Blockkippen notwendige, flach hangauswärts fallende Kluttsystem nicht ausgebildet, kommt es zum Verbiegen der steil in den Hang einfallenden Felsplatten, die wie Kragträger wirken (Abb. 10). Dabei kann es zur Bildung von Biegezugrissen kommen, wodurch Biegekippen in Blockkippen übergehen kann.

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus kann mittels UDEC erfolgen.

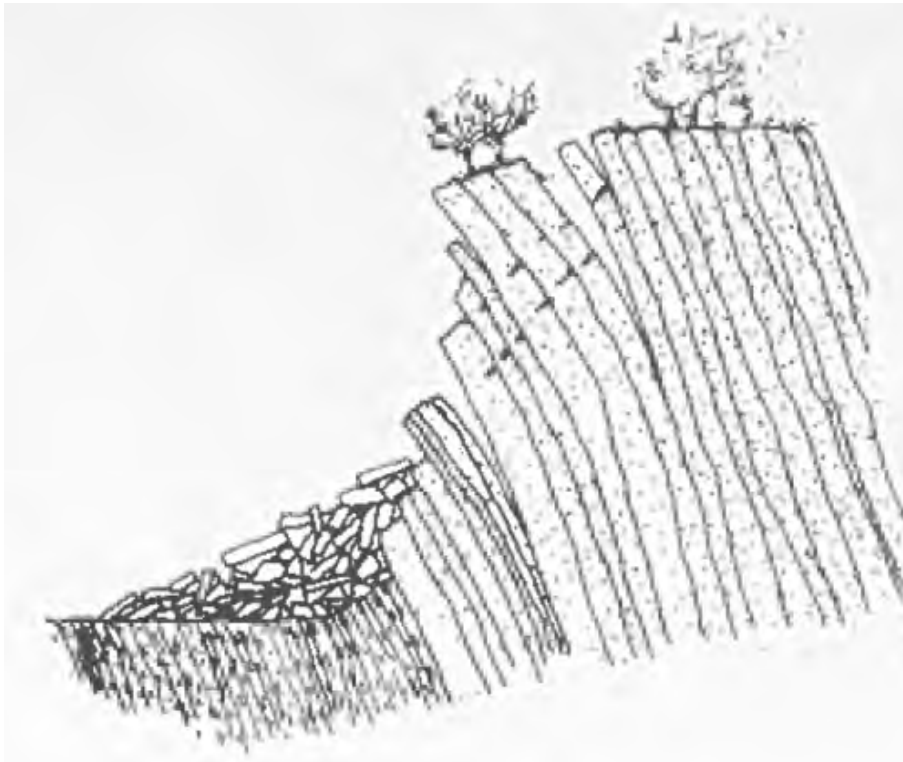


Abb. 10. Biegekippen von plattenförmigen Kluttkörpern.  
aus: GOODMAN & BRAY (1976)

## 2.11 Hangkriechen

„Kriechen“ ist ein Begriff mit sehr vielen Bedeutungen. Oft werden Hänge, die sich langsam bewegen, unabhängig von ihrem Bewegungsmechanismus als Kriechhänge bezeichnet. Einerseits kann ein sich kaum verformender Felskörper auf einer („kriechenden“) Bewegungszone hangabwärts bewegen („sprunghafter“ Übergang bewegt – unbewegt). Andererseits zeigen Inklinometermessungen in Hängen in Gesteinen mit geringer Festigkeit (z.B. Phyllit oder stark zerlegter Fels) oft mit zunehmender Tiefe kontinuierlich abnehmende Verschiebungen (Abb. 11; POISEL, 1998). Dieser Mechanismus wird im Folgenden „Hangkriechen“ genannt.

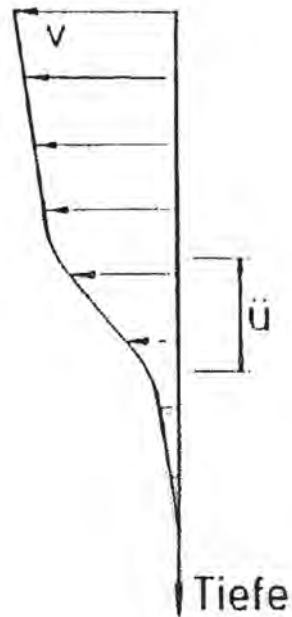


Abb. 11. Verteilung der (horizontalen) Verschiebungen über die Tiefe in einem bestimmten Zeitraum (Verschiebungsgeschwindigkeiten) beim Hangkriechen

Hangkriechen ist oft die Vorstufe zum Übergang in die Hangabwärtsbewegung eines sich kaum verformenden Felskörpers auf einer („kriechenden“) Bewegungszone und in weiterer Folge in eine Rotationsgleitung, wenn die Schubdeformationen in jenem Bereich, in dem die Scherverschiebungen hauptsächlich stattfinden ( $\dot{\epsilon}$  in Abbildung 11), zur Entfestigung führen. Diese (Scher-)Festigkeitsabnahme kann zum Übergang vom Kriechen zum Gleiten (Abb. 12) und in weiterer Folge zu einer Verringerung der Standsicherheit führen (ZISCHINSKY, 1966). Die in Inklinometermessungen beobachtbare Verringerung der Dicke der Scherverschiebungszone ( $\dot{\epsilon}$  in Abbildung 11), in der der Übergang vom unbewegten in den bewegten Untergrund erfolgt, zeigt daher den Übergang zu möglicherweise kritischen Zuständen an.

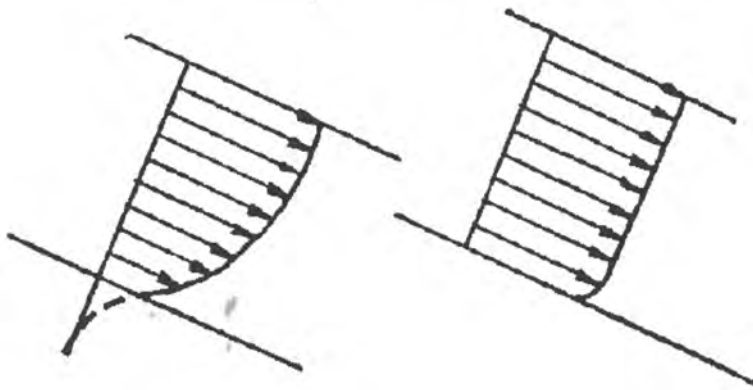


Abb. 12. Verschiebungsprofil bei Hangkriechen (links) und bei Gleiten (rechts). aus: ZISCHINSKY (1966)

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus erfolgt am zweckmäßigsten mittels numerischer Methoden unter Ansatz eines viskoplastischen Materialverhaltens (Bingham-Körper; ZIENKIEWICZ et al., 1975; Abb. 13). Damit ergeben sich realitätsnahe Verschiebungsgeschwindigkeitsverteilungen.

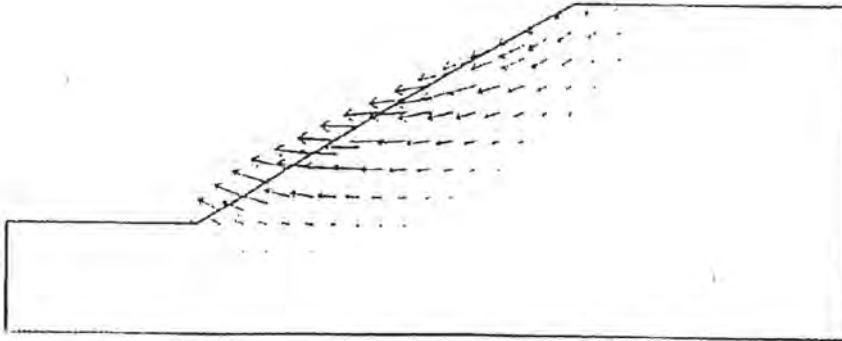


Abb. 13. Numerisch ermittelte Verteilung der Verschiebungsgeschwindigkeiten in einem Hang, wenn das Verhalten von Fels gemäß einem Bingham-Körper simuliert wird

## 2.12 Kink band slumping („Knickbandsackung“)

Kink band slumping (KIEFFER, 1998) tritt nur in dünnplattigen Gesteinen mit relativ geringer Festigkeit auf, in denen nur selten ein Gesteinsabbau stattfindet. Dieser Mechanismus führt im oberen Hangbereich zu Abschiebungen und im unteren Hangbereich zur typischen S-förmigen Deformation der Gesteinslamellen (Abb. 14).

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus ist mittels UDEC möglich (PREH & POISEL, 2004).

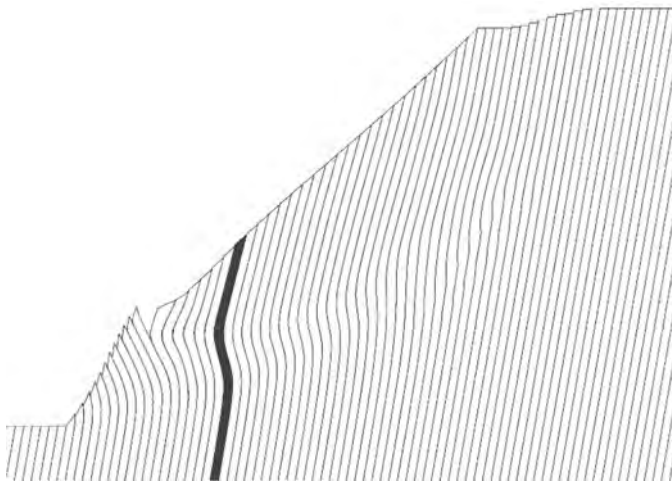


Abb. 14. Numerisches Modell von „kink band slumping“ (aus: PREH & POISEL, 2004)

## 3. Abgehen von Ablösemechanismen bereitgestellter Felsmassen

Das Abgehen von Felskörpern, die sich wie oben beschrieben vom Untergrund ablösen können, ist ein komplexer dynamischer Vorgang. Er kann in Steinbrüchen in Form von Stein Schlag, Felsgleitungen und Felsstürzen erfolgen, wenn die Standsicherheit nicht mehr gegeben ist. Die rechnerische Modellierung solcher Ereignisse ist nur mittels numerischer Methoden möglich.

Das Abgehen von Einzelkörpern wird in Steinbrüchen mittels Sturzversuchen untersucht, um z.B. Gefahrenbereiche festzulegen.

## 4. Schlussfolgerungen

Für Untersuchungen von in Tagbauen in Festgesteinen auftretenden und die Standsicherheit dadurch gefährdenden Versagensmechanismen von Felsböschungen stehen moderne und anwenderfreundliche Rechenprogramme zur Verfügung. Aufbauend auf ingenieurgeologischen Untersuchungen können wirklichkeitsnahe Untersuchungen der Standsicherheit von Festgesteinsböschungen durchgeführt werden.

In bestehenden Steinbrüchen kommt einer umfassenden Dokumentation von Ereignissen, wie z.B. Ablösungen von Felskörpern und Wasseraustritten aus Klüften, besondere Bedeutung zu. Rückrechnungen solcher Ereignisse, deren Geometrie möglichst genau erfasst wurde, ermöglichen darüber hinaus unter Berücksichtigung der Wetterdaten die Bestimmung realitätsnaher Festigkeitsparameter.

## Literatur

BISHOP, A.W.: The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes. *Geotechnique* 5, S. 7–17 (1955).

CAVERS, D.S.: Simple methods to analyze buckling of rock slopes. *Rock Mechanics* 14, S. 87–104 (1981).

GOODMAN, R.E.: A Hierarchy of Rock slope Failure Modes. *Felsbau* 21, No.2, pp. 8–12 (2003).

GOODMAN, R.E. & BRAY, J.W.: Toppling of rock slopes. In: Proc. Conf. Rock Engineering for foundations and slopes. Vol. 2, pp 201–234 (1976).

GUßMANN, P.: KEM (Kinematical Element Method) in geomechanics. Proc. 6<sup>th</sup> Congr. Numerical Methods in Geomechanics. Innsbruck, 1988, pp. 823–828 (1988)

KIEFFER, D.S.: Rock slumping: A compound failure mode of jointed hard rock slopes. PhD Dissertation, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., University of California, Berkeley (1998).

KIEFFER, D.S.: Rotational Instability of Hard Rock slopes. *Felsbau* 21, No.2, pp. 31–38 (2003).

POISEL, R. & EPPENSTEINER, W.: Gang und Gehwerk einer Massenbewegung. Teil 1: Geomechanik des Systems "Hart auf Weich". *Felsbau* 6, 189–194 (1988)

POISEL, R. & EPPENSTEINER, W.: Gang und Gehwerk einer Massenbewegung. Teil 2: Massenbewegungen am Rand des Systems "Hart auf Weich". *Felsbau* 7, 16–20 (1989)

POISEL, R.: Kippen, Sacken, Gleiten - Geomechanik von Massenbewegungen und Felsböschungen. *Felsbau* 16, S. 135–140 (1998).

POISEL, R. & PREH, A.: Rock Slope Initial Failure Mechanisms and their Mechanical Models. *Felsbau* 22, No.2, 40–45 (2004).

PÖTSCH, M. & SCHUBERT, W.: Rotational kinematics of rock blocks with arbitrary geometries. *Felsbau* 24, No.3, 30–36 (2006).

PREH, A.: Modellierung des Verhaltens von Massenbewegungen bei großen Verschiebungen mit Hilfe des Particle Flow Codes. PhD Dissertation, Inst. for Engrg. Geology, Vienna University of Technology (2004).

PREH, A. & POISEL, R.: A UDEC model for “Kink band slumping” type failures of rock slopes. Proc. 1<sup>st</sup> Int. UDEC/3DEC Symposium: Numerical Modelling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering. Bochum 2004, 243–247 (2004).

STÜWE, K. & HOMBERGER, R.: High above the Alps. A Bird's Eye View of Geology. Weishaupt Publishing. (<http://www.alpengeologie.org/>) (2011).

WITTKE, W.: Felsmechanik. Springer, Berlin (1984).

WYLLIE, D.C. & MAH, C.W.: Rock slope engineering. 4<sup>th</sup> Edition. Spon Press: London, New York (2004).

WOLLINGER, C.: Untersuchung der Standsicherheit von Böschungen in geklüftetem Fels mittels 3DEC. Master's thesis. Inst. for Engrg. Geology, Vienna University of Technology (2003).

ZIENKIEWICZ, O.C., HUMPHESON, C. & LEWIS, R.W.: Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics. Geotechnique 25, pp. 671–689 (1975).

ZISCHINSKY, U.: On the deformation of high slopes. Proc. 1st ISRM Congr., Lisbon, Vol. 2, 179-185 (1966).

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Geologischen Bundesanstalt](#)

Jahr/Year: 2016

Band/Volume: [117](#)

Autor(en)/Author(s): Poisel Rainer

Artikel/Article: [Die Standsicherheit von Festgesteinsböschungen 21-33](#)