

# Felsstürze – Ablösemechanismen

Rainer Poisel

Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Karlsplatz 13, 1040 Wien. rainer.poisel@tuwien.ac.at

## Einleitung

### *Ablösemechanismus versus Sturzprozess*

Gravitative Massenbewegungen beginnen mit einer Phase der Ablösung von Locker- oder Festgesteinsmassen vom Untergrund, die in einen Sturz- bzw. Auslaufprozess (runout) übergehen kann. Diese beiden Phasen sind physikalisch vollkommen unterschiedliche Vorgänge und müssen daher mittels unterschiedlicher mechanischer Modelle simuliert werden. Die Klassifikationen von Massenbewegungen auf phänomenologischen Grundlagen von z.B. Nemcok et al. (1972) und von Varnes (Varnes 1954, 1978; Cruden & Varnes 1996) unterscheiden nicht zwischen den Phasen Ablösung und Abgang. Bei den in Abbildung 1 dargestellten Beispielen für den Prozess „Fallen“ geht ein anfängliches Gleiten erst in einer späteren Phase in einen Fallvorgang über. Diese Klassifikationen beruhen daher nicht auf physikalischen Grundlagen und stellen daher keine Einteilung dar, nach der das für eine rechnerische Standsicherheitsuntersuchung geeignete Modell bestimmt werden kann.

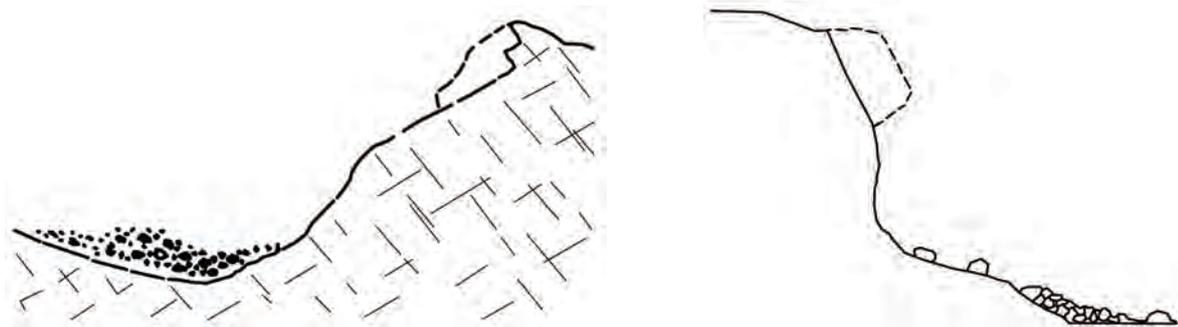


Abbildung 1: Der Prozess „Fall“ nach Nemcok et al. (1972) und nach Cruden & Varnes (1996).

Das Update der Varnes-Klassifikation von Hungr et al. (2014) beseitigte zwar einige Nachteile der ursprünglichen Varnes-Einteilung, brachte aber in Bezug auf eine Einteilung nach physikalischen Grundsätzen keine Verbesserungen. Die vorliegende Arbeit baut auf der Varnes-Klassifikation auf, schlägt aber gleichzeitig eine Einteilung der Versagensmechanismen von Felsböschungen vor, nach der das Rechenmodell für jene Mechanismen ausgewählt werden kann, die zur Ablösung größerer Felsmassen führen können und die damit die Standsicherheit einer Felsböschung gefährden können (Poisel & Preh 2004).

### *ÖNORM B 1997-1-5: 2017-11 „Gesamtstandsicherheit von Böschungen, Hängen und Geländesprüngen“*

Es wird empfohlen, Untersuchungen der Standsicherheit von Böschungen, Hängen und Geländesprüngen in Tagbauen und bei Felsbauarbeiten gemäß ÖNORM B 1997-1-5: 2017-11 durchzuführen. Die Einteilung der Versagensmechanismen sowie die in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagenen Methoden zur Untersuchung der Standsicherheit stimmen mit jenen in der ÖNORM B 1997-1-5 beschriebenen überein. Dabei entsprechen

- Abbauzustände der Schadensfolgeklasse 2 sowie der Bemessungssituation 2 und
- Endzustände der Schadensfolgeklasse 3 sowie der Bemessungssituation 1.

Der Nachweis für den Bemessungsfall Erdbeben ist in Österreich für Endzustände gemäß ÖNORM B 1998-1 in der Regel nur in folgenden Fällen erforderlich:

- in der Erdbebenzone 3 für die Schadensfolgeklasse CC 3,
- in der Erdbebenzone 4 für die Schadensfolgeklassen CC 2 und CC 3.

Die Teilsicherheitsbeiwerte für Bodenkenngrößen  $\gamma_{\phi;c}$  betragen daher für Abbauzustände 1,10 und für Endzustände 1,30. Die Teilsicherheitsbeiwerte für ständige und veränderliche ungünstig wirkende Einwirkungen sind 1,00 zu setzen (für veränderliche ungünstig wirkende Einwirkungen beträgt der Teilsicherheitsbeiwert 1,00 abweichend von der Festlegung der ÖNORM B 1997-1-5). Etagenbereiche, die oberhalb von Felspartien liegen, für die in Abbauzuständen mit den genannten Teilsicherheitsbeiwerten die Standsicherheit nicht nachgewiesen werden kann, sind obere Gefahrenbereiche.

Bei Verwendung von Rechenverfahren (Computerprogrammen), die einen globalen Standsicherheitsfaktor ausweisen, erfolgt der Nachweis der Standsicherheit gemäß ÖNORM B 1997-1-5 durch:

$$\text{Ausnutzungsgrad } \mu = \gamma_{\phi;c} / \eta \leq 1 \rightarrow \gamma_{\phi;c} \leq \eta$$

$\gamma_{\phi;c}$  Teilsicherheitsbeiwert für den Reibungswinkel und für die Kohäsion

$\eta$  globaler Standsicherheitsfaktor

Diese Vorgangsweise soll gemäß ÖNORM B 1997-1-5 Abschnitt 11.3 auch bei Standsicherheitsberechnungen mittels numerischer Verfahren angewendet werden.

### *Dimensionen der Versagensmechanismen*

Die in der Folge beschriebenen Versagensmechanismen können nur Etagenböschungen, aber auch das ganze Böschungssystem erfassen. So kann z.B. das Abgleiten eines Felskörpers auf einer Trennfläche sowohl die Standsicherheit einer Abbauetage gefährden als auch in sehr großen Dimensionen auftreten. Beispiele für das Abgleiten von Felsmassen auf einer Trennfläche in großen Dimensionen sind der Felssturz im ehemaligen Tagbau Spitz an der Donau im Jahr 2002 und der Bergsturz Goldau in der Schweiz im Jahr 1806.

### *Parameterermittlung*

Die Ermittlung von Parametern des Untergrunds soll so weit wie möglich durch Rückrechnungen abgegangener Felspartien erfolgen, da Extrapolationen von Werten aus Laborversuchen, Festlegungen mittels Klassifikationen usw. mit großen Unsicherheiten behaftet sind, die durch die Teilsicherheitsbeiwerte meist nicht abgedeckt sind. Die Schweizer Norm SN 505 267:2013 „Geotechnik“ empfiehlt, rückgerechnete Parameter als charakteristische Werte zu betrachten.

## **Ablösemechanismen im Fels**

Im Folgenden werden Ablösemechanismen (Versagensmechanismen) im Fels beschrieben und Rechenmodelle, die diese Mechanismen simulieren und mittels derer die Standsicherheit untersucht werden kann, empfohlen.

*Rotationsgleitung (Abschnitte 7.2.2 „Rotation eines kreiszylindrischen Gleitkörpers“ und 7.3.1 „Rotation eines schalenförmigen Gleitkörpers“ in ÖNORM B 1997-1-5)*

Dieser Mechanismus tritt in stark zerlegtem oder verwittertem Fels mit geringer Festigkeit auf, der dadurch einem Lockergestein ähnlich ist. Die Kluftkörpergröße ist dabei wesentlich kleiner als die Böschungshöhe und die Raumstellungen der Trennflächen spielen eine untergeordnete Rolle. Dieses Verhalten ähnelt damit dem Versagen einer Lockergesteinsböschung in Form eines Gleitkreises (Abb. 2).

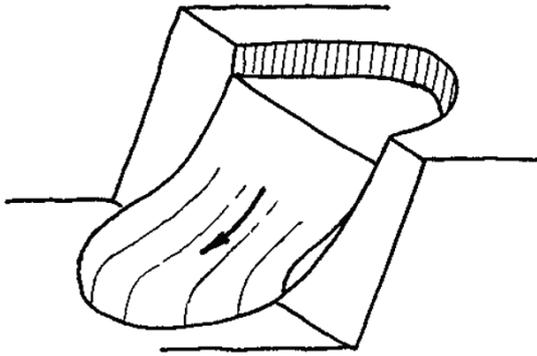


Abbildung 2: Rotationsgleitung.

Die Untersuchung der Standsicherheit hat gemäß ÖNORM B 1997-1-5 nach dem Verfahren von Bishop (1955) zu erfolgen. Die Berechnung kann mittels eines Gleitkreisprogramms (wie z.B. „Böschungsbruch“, <http://www.geosoft.at/Produkte.htm?/Boeschungsbruch.htm>, oder „Slide“, <https://www.rocscience.com/rocscience/products/slide>) erfolgen. Für die dreidimensionale Simulation werden numerische Methoden (z.B. FLAC3D, <https://www.itascacg.com/software/flac3d>) empfohlen.

*Translation eines Gleitkörpers auf einer Trennfläche (Abschnitt 7.2.4 in ÖNORM B 1997-1-5)*

Gleiten eines Klutfkörpers (ähnlich jenem eines Blocks auf einer schiefen Ebene; Abb. 3) ist einer der in Felsböschungen am öftesten auftretenden Versagensmechanismen. Gleiten tritt auf, wenn der Scherwiderstand in der Trennfläche, entlang derer der Klutfkörper hangabwärts gleitet, von den Scherkräften (hervorgerufen z.B. durch das Eigengewicht und durch Wasserdrücke) überschritten wird.

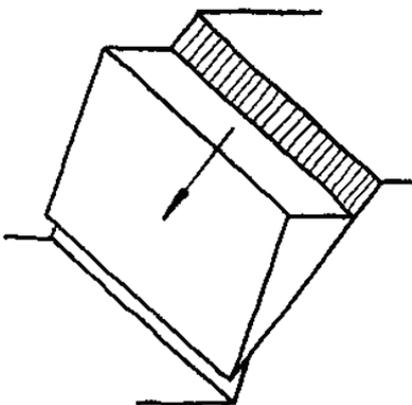


Abbildung 3: Translationsgleitung eines Klutfkörpers auf einer Trennfläche.

Die rechnerische Untersuchung der Standsicherheit kann nach der in ÖNORM B 1997-1-5 Abschnitt 11.2.5 beschriebenen Vorgangsweise oder mittels des Programms Rocplane (<https://www.rocscience.com/rocscience/products/rocplane>) erfolgen.

*Translation mehrerer Gleitkörper auf einer polygonalen Gleitfläche (Abschnitt 7.2.5 in ÖNORM B 1997-1-5)*

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 (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.

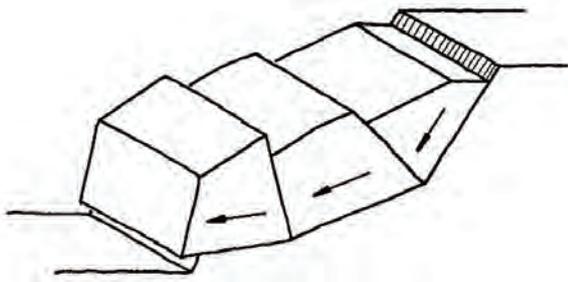


Abbildung 4: Translation mehrerer Gleitkörper auf einer polygonalen Gleitfläche.

Die graphische und rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus ist in ÖNORM B 1997-1-5 Abschnitt 11.2.6 beschrieben und ist mittels des Programms „Böschungsbruch“ (<http://www.geo-soft.at/Produkte.htm?/Boeschungsbruch.htm>) oder mittels UDEC (<https://www.itascacg.com/software/udec>) möglich.

#### *Kippen (Abschnitt 7.2.6 in ÖNORM B 1997-1-5)*

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 säulen- oder tafelförmige Kluftkörper zerlegt, kann es zum Hangauswärtskippen von Kluftkörpern kommen (Abb. 5). Dieser Vorgang ist dem Umfallen von Büchern im Regal oder jenem von Dominosteinen ähnlich.

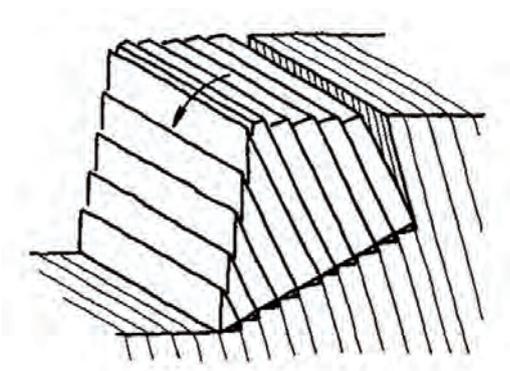


Abbildung 5: Kippen von säulen- bzw. tafelförmigen Kluftkörpern.

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus ist mittels des von Goodman & Bray (1976) entwickelten Grenzgleichgewichtsverfahrens möglich, auf dem das Programm „Roctopple“ (<https://www.rocsience.com/rocsience/products/roctopple>) beruht. Es wird empfohlen, diesen Mechanismus zusätzlich mittels UDEC (<https://www.itascacg.com/software/udec>) bzw. 3DEC (<https://www.itascacg.com/software/3dec>), wenn räumliche Effekte eine Rolle spielen (Wollinger 2003), zu untersuchen und die Ergebnisse zu vergleichen sowie auf Plausibilität zu überprüfen (Poisel et al. 2011).

#### *Translation eines keilförmigen Gleitkörpers (Abschnitt 7.3.2 in ÖNORM B 1997-1-5)*

Wenn das Abgleiten eines Blockes auf einer Trennfläche in Richtung der Falllinie dieser Trennfläche durch eine andere Trennfläche behindert wird, erhöht dies die Standsicherheit gegenüber jener eines Blocks auf einer Trennfläche (Abschnitt Translation eines Gleitkörpers auf einer Trennfläche) wesentlich

(Abb. 6). 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. Die ÖNORM B 1997-1-5 empfiehlt in einem solchen Fall, die Berechnung unter Variation der Raumstellungen der Trennflächen mehrfach zu wiederholen (und die geringste dabei ermittelte Standsicherheit als maßgebend anzusehen). Diese Vorgangsweise kann durch Anwendung statistischer Methoden (z.B. Monte Carlo – Verfahren; Wyllie & Mah 2004) und Ermittlung einer Versagenswahrscheinlichkeit präzisiert werden. Als akzeptable Versagenswahrscheinlichkeiten in Steinbrüchen empfiehlt Gibson (2011) Werte

- unter 1% für das Gesamtböschungssystem bei der Gefährdung von wichtiger Infrastruktur,
- von 1 bis 2% für das Gesamtböschungssystem, wenn keine wichtige Infrastruktur gefährdet ist,
- von 15 bis 30 % für Etagenböschungen.

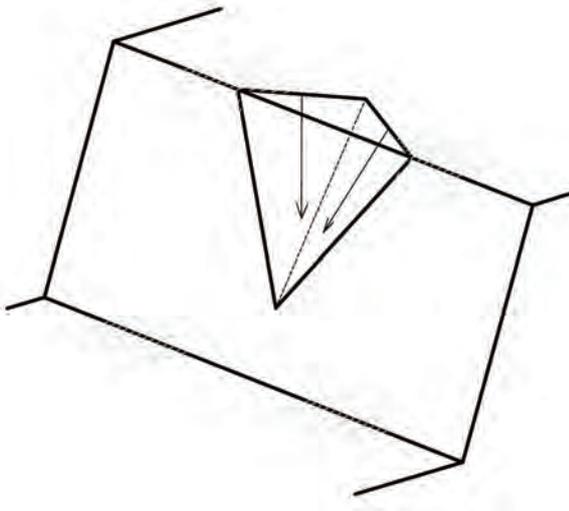


Abbildung 6: Translationsgleitung eines Kluftkörpers auf zwei Trennflächen.

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus ist mittels der in ÖNORM B 1997-1-5 Abschnitt 11.2.7 beschriebenen Vorgangsweise möglich oder kann mittels des Formelapparats in Wyllie & Mah (2004) oder mittels des Programms „Swedge“ (<https://www.rocscience.com/rocscience/products/swedge>) erfolgen. Mittels dieses Programms können auch Versagenswahrscheinlichkeiten z.B. zufolge der Schwankungen der Raumstellungen der Gleitflächen rasch berechnet werden.

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 oft nicht der Fall, sodass Rotationen auftreten können, die aber die Standsicherheit oft wesentlich mehr gefährden können als reine Translationen. Bei Untersuchungen der Standsicherheit ist daher von Fall zu Fall zu entscheiden, ob auch Rotationen zu berücksichtigen sind (s. auch Abschnitt Rotation einzelner Kluftkörper). Die Entscheidung, ob Rotationen eines Kluftkörpers kinematisch möglich sind, kann z.B. mittels eines Modellversuchs (physikalisches Modell des Kluftkörpers einschließlich seiner Lagerungsbedingungen) gefällt werden. Falls Rotationen berücksichtigt werden müssen, wird empfohlen, die Standsicherheit mittels 3DEC (<https://www.itascacg.com/software/3dec>) zu untersuchen.

### *Knicken (Abschnitt B.3 in ÖNORM B 1997-1-5)*

(Aus-)Knicken von säulen- bzw. tafelförmigen Kluftkörpern (Abb. 7) ereignet sich bei einem Verhältnis von der Säulen- bzw. der Plattendicke zur schrägen Böschungshöhe von etwa 1:100. Dieser Mechanismus tritt daher nur in äußerst dünnbankigen Gesteinen bei großen Wandhöhen auf.

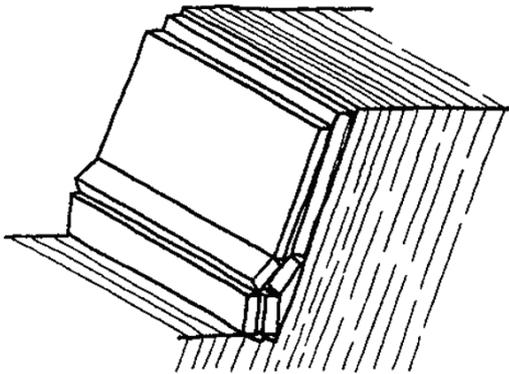


Abbildung 7: Knicken.

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.

### *Fallen von Kluftkörpern (Abschnitt B.4 in ÖNORM B 1997-1-5)*

Reines Fallen als Ablösemechanismus kann nur aus Überhängen in massigem Fels mit (nahezu) vollständig durchtrennten Klüften erfolgen (Abb. 8).

Die Überprüfung, ob bei einem bestehenden Trennflächensystem Fallen eines Kluftkörpers aus einem Überhang kinematisch möglich ist, kann mittels der Block Theory von Goodman & Shi (1985) erfolgen.

### *Rückwärtsrotation von Kluftkörpern (Abschnitt B.5 in ÖNORM B 1997-1-5)*

Dieser Versagensmechanismus, der oft auch als „Rock slumping“ bezeichnet wird (Kieffer 2003), verläuft ähnlich wie das Gleiten einer zu flach an die Wand angelehnten Leiter. Dabei gleiten tafelige Kluftkörper auf horizontalen bis flach hangauswärts fallenden Klüften sowie auf gleich wie bzw. steiler als die Abbauwand einfallenden Klüften (Abb. 9). Dies bedeutet, dass Trennflächen, die allein die Standsicherheit nicht gefährden, in der beschriebenen Kombination sehr wohl zum Versagen der Böschung führen können.

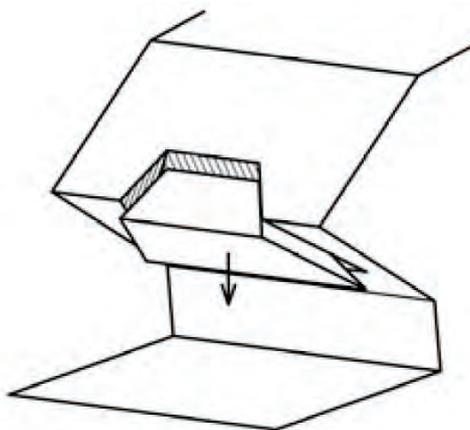


Abbildung 8: Fallen eines Kluftkörpers aus einem Überhang.

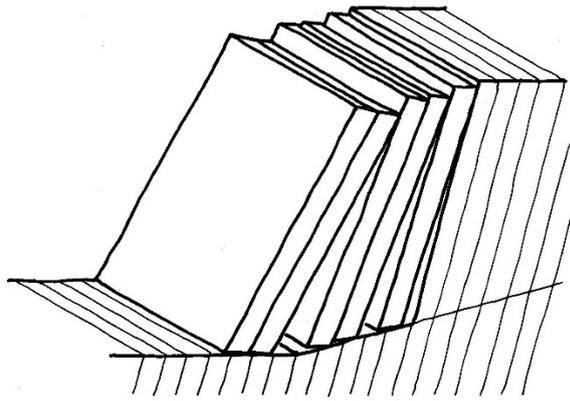


Abbildung 9: Rückwärtsrotation von Kluftkörpern (Rock slumping).

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus erfolgt am zweckmäßigsten mittels

- UDEC (<https://www.itascacg.com/software/udec>) bzw.
- 3DEC (<https://www.itascacg.com/software/3dec>), wenn räumliche Effekte eine Rolle spielen.

*Abfahren, Abgleiten oder Kippen turmartiger bzw. plattenförmiger Kluftkörper am Rand eines Systems „Hart auf Weich“ (Abschnitt B.6 in ÖNORM B 1997-1-5)*

Das Abfahren, Abgleiten oder Kippen turmartiger bzw. plattenförmiger Kluftkörper am Rand eines Systems „Hart auf Weich“ tritt bei Lagerung eines kompetenten (steifen, festen) Felskörpers auf einem inkompetenten (weichen, weniger festen) Sockel auf (Abb. 10; Poisel & Eppensteiner 1988, 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 Großkluftkörper am Rand des steifen Felskörpers, sofern eine solche Zerlegung nicht schon vorher vorhanden war.

Das aufrechte Abfahren der Großkluftkörper tritt vor allem dann auf, wenn sie bereits tief in das Sockelmaterial eingedrungen sind und von Hangschutt umhüllt 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.

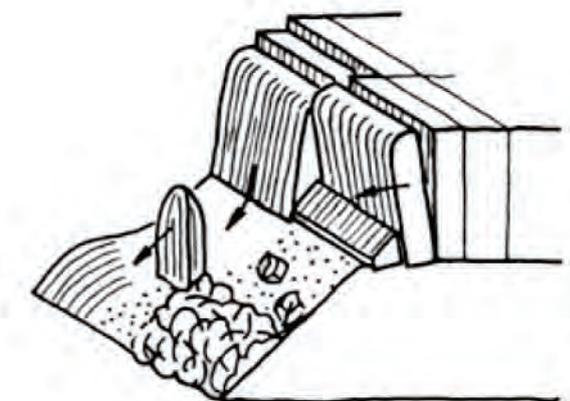


Abbildung 10: Abfahren, Abgleiten oder Kippen turmartiger bzw. plattenförmiger Kluftkörper am Rand eines Systems „Hart auf Weich“.

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

### *Rotation einzelner Klufkörper (Abschnitt B.7 in ÖNORM B 1997-1-5)*

Rotationen von Klufkörpern (Abb. 11) gefährden die Standsicherheit von Festgesteinsböschungen meistens wesentlich mehr als reine Translationen, wenn sie kinematisch möglich sind. Die Entscheidung, ob Rotationen eines Klufkörpers kinematisch möglich sind, kann z.B. mittels eines Modellversuchs (physikalisches Modell des Klufkörpers einschließlich seiner Lagerungsbedingungen) gefällt werden (siehe Abschnitt Translation eines keilförmigen Gleitkörpers).

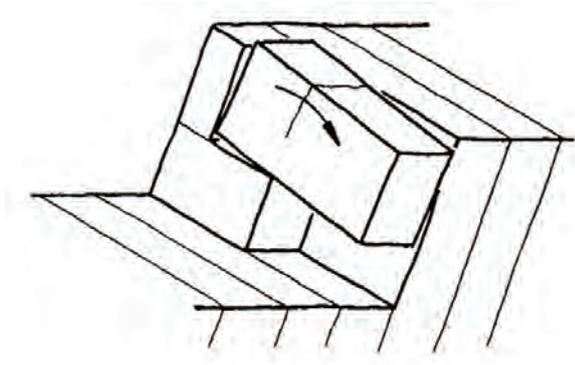


Abbildung 11: Rotation eines Klufkörpers („Torsion failure“ nach Goodman 2003).

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus (einschließlich der Kinematik) ist wesentlich aufwändiger als die Untersuchungen reiner Translationen und kann mittels des Formelapparats von Wittke (1984), nach Pötsch & Schubert (2006) oder mittels UDEC (im zweidimensionalen Fall; <https://www.itascacg.com/software/udec>) oder 3DEC (im dreidimensionalen Fall; <https://www.itascacg.com/software/3dec>) erfolgen.

### *Biegekippen (Abschnitt B.8 in ÖNORM B 1997-1-5)*

Ist das für Blockkippen notwendige, flach hangauswärts fallende Kluftsystem nicht ausgebildet und treten nur steil in den Hang einfallende Trennflächen auf, kommt es zum Verbiegen der steil in den Hang einfallenden Felsplatten, die in diesem Fall wie Kragträger wirken (Abb. 12). Dabei kann es zur Bildung von Biegezugrissen kommen, wodurch Biegekippen in Blockkippen übergehen kann.

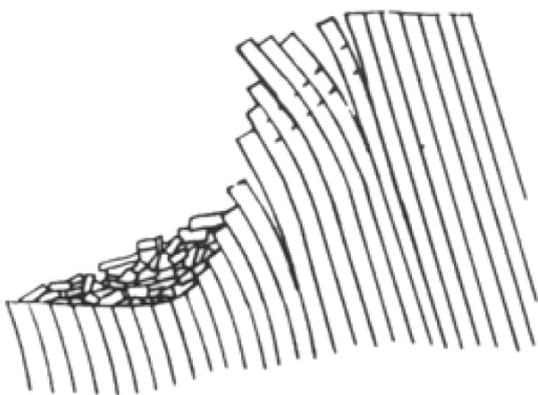


Abbildung 12: Biegekippen.

Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus kann mittels UDEC (<https://www.itascacg.com/software/udec>) erfolgen.

### *Mechanismen mit großen Verschiebungen, bei denen es aber nicht zur Ablösung großer Felsmassen kommt*

Das Verhalten und die Standsicherheit von Böschungen und Hängen, in denen Mechanismen mit großen Verschiebungen auftreten, bei denen aber keine durchgehende Ablösefläche ausgebildet wird und bei denen daher keine Ablösung großer Felsmassen stattfindet, wie z.B. Hangkriechen (Abb. 13; Abschnitt B.2 in ÖNORM B 1997-1-5; Poisel & Preh 2004) und Knickbandsackung (Abb. 14; Abschnitt B.9 in ÖNORM B 1997-1-5; Preh & Poisel 2004), können rechnerisch nur mittels numerischer Methoden untersucht werden.

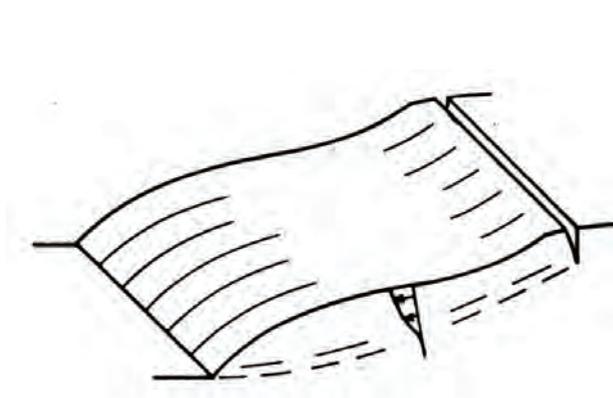


Abbildung 13: Hangkriechen.

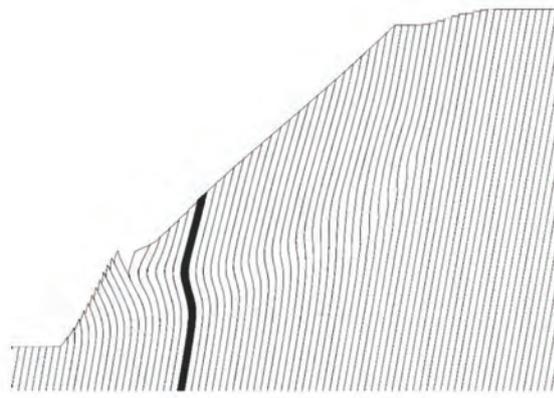


Abbildung 14: Knickbandsackung.

### **Abschließende Bemerkungen**

Unabdingbare Voraussetzungen für eine realitätsnahe Beurteilung der Standsicherheit einer Felsböschung sind

- ein möglichst genaues Geländemodell, das unter Benützung moderner Methoden (z.B. terrestrischer Laserscan) erstellt wurde,
- eine fachkundige ingenieurgeologische Kartierung der Gesteinsverhältnisse, des Trennflächengefüges sowie von Strukturen, die im Zusammenhang mit einem Versagen stehen und damit Rückrechnungen von Festigkeitsparametern ermöglichen,
- in unzugänglichen Bereichen oder in Bereichen, die z.B. wegen Steinschlaggefahr nicht betreten werden können bzw. dürfen, eine Bestimmung des Trennflächengefüges mittels ShapeMetrix (<http://3gsm.at/produkte/shape-metrix/>),
- eine Dokumentation der Bergwasserverhältnisse,
- eine Dokumentation von Schadensereignissen,
- Festlegungen von Materialparametern, bevorzugt durch Rückrechnungen,
- Bestimmungen von Versagensmechanismen mittels einer Synthese von beobachteten Strukturen,
- die Festlegung von Rechenmodellen, die diese Versagensmechanismen simulieren können.

Der Aufbau dieser Modelle ist ein iterativer Vorgang, weil mit Zunahme des Wissens und von Beobachtungsergebnissen Modellvorstellungen meist revidiert werden müssen.

## Literatur

- Austrian Standards International (2017): ÖNORM B 1997-1-5 (Ausgabe: 2017-11-01): Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik. Teil 1-5: Gesamtstandsicherheit von Böschungen, Hängen und Geländesprüngen.
- Austrian Standards International (2017): ÖNORM B 1998-1 (Ausgabe 2017 07 01): Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1998-1 und nationale Erläuterungen.
- Bishop A.W. (1955): The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes. *Geotechnique*, 5, 7–17.
- Cavers D.S. (1981): Simple methods to analyze buckling of rock slopes. *Rock Mechanics*, 14, 87–104.
- Cruden D.M. & Varnes D.J. (1996): Landslide types and processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds.): *Landslides – investigation and mitigation*. Special report 247. Transportation research board. National Research Council. National Academy Press: Washington, D.C.
- Gibson W. (2011): Probabilistic methods for slope analysis and design. *Australian Geomechanics Journal*, 46/3, 29–39.
- Goodman R.E. & Bray J.W. (1976): Toppling of rock slopes. In: Proc. Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes. Boulder, Colorado, ASCE Vol.2, 201–234.
- Goodman R.E. & Shi G.-h. (1985): *Block Theory and its application to rock engineering*. 338 p., Prentice-Hall: New Jersey.
- Goodman R.E. (2003): A Hierarchy of Rock slope Failure Modes. *Felsbau*, 21/2, 8–12.
- Hungr O., Leroueil S. & Picarelli L. (2014): The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194.
- Kieffer D.S. (2003): Rotational Instability of Hard Rock slopes. *Felsbau*, 21/2, 31–38.
- Nemcok A., Pasek J. & Rybar J. (1972): Classification of landslides and other mass movements. *Rock Mechanics*, 4, 71–78.
- Poisel R. & Eppensteiner W. (1988): Gang und Gehwerk einer Massenbewegung. Teil 1: Geomechanik des Systems "Hart auf Weich". *Felsbau*, 6, 189–194
- Poisel R. & Eppensteiner W. (1989): Gang und Gehwerk einer Massenbewegung. Teil 2: Massenbewegungen am Rand des Systems "Hart auf Weich". *Felsbau*, 7, 16–20.
- Poisel R. & Preh A. (2004): Rock Slope Initial Failure Mechanisms and their Mechanical Models. *Felsbau*, 22/2, 40–45.
- Poisel R., Mair am Tinkhof K. & Preh A. (2011): From the interaction of material parameters and calculation approaches. In: Proc. Workshop "Calculation methods in geotechnics – Failure Mechanisms and Determination of Parameters". Salzburg (Austria).
- Pötsch M. & Schubert W. (2006): Rotational kinematics of rock blocks with arbitrary geometries. *Felsbau*, 24/3, 30–36.
- Preh A. (2004): Modellierung des Verhaltens von Massenbewegungen bei großen Verschiebungen mit Hilfe des Particle Flow Codes. PhD Dissertation, Inst. for Engrg. Geology, Vienna University of Technology.
- Preh A. & Poisel R. (2004): A UDEC model for "Kink band slumping" type failures of rock slopes. In: Proc. 1st Int. UDEC/3DEC Symposium: Numerical Modelling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering. Bochum 2004, 243–247.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2013): SN 505 267:2013 „Geotechnik“.
- Varnes D.J. (1954): Landslide types and processes. In: Eckel E.B. (ed) *Landslides and engineering practice*, special report 28. Highway research board. National Academy of Sciences, Washington, DC, 20–47.
- Varnes D.J. (1978): Slope movement types and processes. in: Schuster R.L. & Krizek R.J. (eds): *Landslides, analysis and control*, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., 11–33.
- Wittke W. (1984): *Felsmechanik*. Springer, Berlin.
- Wyllie D.C. & Mah C.W. (2004): *Rock slope engineering*. 4<sup>th</sup> Edition. Spon Press: London, New York.
- Wollinger C. (2003): Untersuchung der Standsicherheit von Böschungen in geklüftetem Fels mittels 3DEC. Master's thesis. Inst. for Engrg. Geology, Vienna University of Technology.