



AUSTRIAN
SOCIETY FOR
GEOMECHANICS



ÖSTERREICHISCHE
GESELLSCHAFT FÜR
GEOMECHANIK

Empfehlung für die Beurteilung der Standsicherheit von Felsböschungen

2026



Empfehlung

Beurteilung der Standsicherheit von Felsböschungen

1. Auflage
2026

Leitung

Goricki Andreas

3G Geotechnik Graz ZT GmbH

Mitglieder des Arbeitskreises

(in alphabetischer Reihenfolge)

Bach Holger

JE&C ZT GmbH

Baier Stefan

ILF Consulting Engineers Austria GmbH

Bauer Steffen

Tiroler Wasserkraft AG

Frühwirt Thomas

Montanuniversität Leoben

Heiss Christian

Montanuniversität Leoben

Illeditsch Mariella

PI Geotechnik ZT GmbH

John Max

Zivilingenieur für Bauwesen

Koch Gerhard

ASFINAG

Preh Alexander

TU Wien

Sammer Georg

Implenia Österreich GmbH

Sausgruber Thomas

Die Wildbach

Stoxreiter Thomas

MOLDAN Baustoffe GmbH & Co KG

Wagner Horst

Montanuniversität Leoben

Walter Herbert

Ingenieurkonsulent für Bauwesen.

Beirat

(in alphabetischer Reihenfolge)

Antony Christoph

ASFINAG

Galler Robert

Montanuniversität Leoben und ÖGG

Großbauer Karl

iC consulenten ZT GmbH

Harrer Heinz

Montanbehörde

Hassler Christian

Arbeitsinspektorat

Kienreich Rainer

Land Steiermark

Konietzky Heinz

TU Bergakademie Freiberg

Konrad Hermann Michael

Land Steiermark

Laimer Hans-Jörg

ÖBB

Schatz Michael

Montanbehörde

INHALTSVERZEICHNIS

1. Allgemein	1
1.1. Zielsetzung	1
1.2. Anwendungsbereich des Dokuments	1
2. Begriffe	2
3. Anwendung der Eurocodes für Felsböschungen	3
4. Generelle Vorgehensweise	5
5. Erkundung	7
5.1. Grundsätzliches	7
5.2. Umfang der Erkundung	7
6. Versagensmechanismen	8
6.1. Allgemeines	8
6.2. Große Verschiebungen ohne Ablösung von Fels	9
6.3. Ablösemechanismen von einzelnen Kluftkörpern	10
6.4. Ablösemechanismen zusammenhängender Felsbereiche	16
7. Beurteilungsverfahren	20
7.1. Allgemeines	21
7.2. Empirische Verfahren	22
7.3. Kinematische Analysen	23
7.4. Grenzgleichgewichtsverfahren	24
7.5. Numerische Verfahren	26
8. Beurteilung während der Ausführung	28
8.1. Grundsätzlicher Ablauf	28
8.2. Umgang mit zusätzlichen Informationen während der Ausführung	28
8.3. Temporärer Abtrag	29
8.4. Anwendung der Beobachtungsmethode	29
9. Dokumentation der Standsicherheitsbeurteilungen	30

10. Beispiele	31
10.1. Beispiel 1: Tagebau mit geringer Abbaumenge	31
10.2. Beispiel 2: Tagebau mit großer Abbaumenge	32
10.3. Beispiel 3: Einschnitt in Fels	33
10.4. Beispiel 4: Talflanke	34
11. Literaturverzeichnis	35
Abbildungsverzeichnis	38
Anhang 1: Übersicht der Beurteilungsverfahren	39

1. ALLGEMEIN

1.1. Zielsetzung

Ziel der Empfehlung ist die Beschreibung des Ablaufs zur Beurteilung der Standsicherheit von Felsböschungen. Dazu werden die Vorgangsweise zur Standsicherheitsbeurteilung dargestellt, unterschiedliche Möglichkeiten der Standsicherheitsbeurteilung beschrieben und Bedingungen für die Anwendbarkeit definiert. Die Beschreibungen sind grundsätzlich für alle Felsböschungen anwendbar und sind den projektspezifischen Gegebenheiten anzupassen.

Bei der Umsetzung von Standsicherheitsbeurteilungen sind technische und gesetzliche Vorgaben jedenfalls für die jeweiligen Anwendungsfälle projektspezifisch zu prüfen und entsprechend anzuwenden. Die relevanten Beschreibungen und Vorgaben des EC7 sind in der Empfehlung gesondert dargestellt.

1.2. Anwendungsbereich des Dokuments

Die Empfehlung basiert auf dem aktuellen Entwicklungsstand und gilt für die Beurteilung von Böschungen aus Festgestein (Felsböschungen). Eine Beurteilung von Böschungen aus Lockergestein, die als Kontinuum betrachtet werden können, ist durch dieses Dokument nicht abgedeckt.

In dieser Empfehlung wird das initiale Versagen, d.h. der Ablöseprozess und dessen Einfluss auf die Standsicherheit behandelt. Steinschlagereignisse an natürlichen Böschungen und Auslaufprozesse werden nicht behandelt.

2. BEGRIFFE

Böschungssystem

Ein aus mehreren räumlich zusammenhängenden Einzelböschungen gebildetes System.

Einzelböschung

Einschnitt im Ingenieurbau oder Etage im Tagbau.

Etage oder Berme

Horizontales bis schwach geneigtes Flächenelement als Bestandteil eines Böschungssystems.

Felsböschung

Geneigter natürlicher oder künstlich geschaffener Geländebereich im Fels.

Gebirgsart

Gebirgsvolumen, das in seinen maßgebenden, das geotechnische Verhalten beeinflussenden Eigenschaften, innerhalb einer festzulegenden Bandbreite gleichartig ist.

Anmerkung: Der Größenmaßstab der räumlichen Erstreckung einer Gebirgsart ist im Rahmen der Planung zu definieren und hat den Größenbezug zum geplanten Bauwerk zu berücksichtigen (gem. ÖGG Richtlinie Geotechnische Planung von Untertagebauten Zyklischer und Kontinuierlicher Vortrieb).

Homogenbereich

Teil der Felsböschung mit gleicher Gebirgsart, gleichartigen Gebirgseigenschaften und gleichen Versagensmechanismen.

Persistenz, Trennflächendurchgängigkeit

Ausbisslänge einer Trennfläche an der Oberfläche in Meter.

Standsicherheit

Sicherheit gegen Versagen (Bruchzustand) einer Felsböschung infolge Überschreitung der Scherfestigkeit des Baugrundes und gegebenenfalls der Widerstände der konstruktiven Elemente (Definition in Anlehnung an ÖNORM B 1997-1-5 (2017)).

Systemverhalten

Verhalten des Systems aus Gebirge und gewählten bautechnischen Maßnahmen (Felsabtrag oder Gewinnungstätigkeit, eventuell Einsatz von Stützmitteln).

Temporäre Böschung

Böschung, die im Zuge der Abtrags- oder Gewinnungstätigkeit einen Zwischenzustand darstellt.

Versagensmechanismus

Vorherrschender Ablöseprozess von Kluftkörpern.

3. ANWENDUNG DER EUROCODES FÜR FELSBÖSCHUNGEN

Die Eurocodes gelten allgemein für Entwurf, Berechnung und Bemessung von Tragwerken und geotechnischen Bauwerken. Im Eurocode 7 (EN 1997-1 2014) für geotechnische Bauwerke gibt es keinen speziellen Abschnitt für Felsböschungen. In der zweiten Generation wird klar unterschieden, welche Regelungen für Baugrund (ground) allgemein, nur für Boden (soil) oder nur für Fels (rock) gelten. Der folgende Überblick bezieht sich auf die voraussichtlich ab 2027 gültige zweite Generation der Eurocodes (Schlussentwurf 2024), sinngemäß gilt der Großteil auch für die erste Generation.

Es gibt einen speziellen Abschnitt 4 „Böschungen, Einschnitte und Dämme“ im EN 1997-3 (2024), der die Regelungen für Entwurf, Berechnung und Bemessung von diesen Konstruktionen zusammenfasst und viele Verweise auf die allgemeineren Regeln in EN 1997-1 (2024) (vorwiegend Berechnung und Bemessung) und EN 1997-2 (2024) (vorwiegend Baugrunduntersuchung) enthält. Anhang A.4 „Rechenmodelle für die Berechnung der Stabilität von Fels“ enthält eine Tabelle mit einer Übersicht über Berechnungsverfahren für Felsböschungen. Allgemeine Regelungen bezüglich zulässiger Berechnungsverfahren, das Sicherheitskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten, die Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungen, Kombinationsbeiwerte etc. sind in der zweiten Generation der Eurocodes in EN 1990-1 (2022) (für neue Bauwerke) und EN 1990-2 (2022) (für Bestandsbauten) zusammengefasst. Wie bisher enthält die Reihe EN 1991 Festlegungen zu Einwirkungen und EN 1998 Vorschriften für die Erdbebenbemessung.

Der Nachweis der Grenzzustände darf außer durch Berechnung auch durch „erfahrungsbasiert festgelegte Vorgaben“ (prescriptive rules), durch Versuche oder durch Anwendung der Beobachtungsmethode erfolgen. Die gängigen empirischen Verfahren werden im Kontext der vorliegenden Empfehlung als Eurocode-konform angesehen (siehe „prescriptive rules“). Für Voraussetzungen, unter welchen dies erfolgen kann, wird auf das Kapitel 7 Beurteilungsverfahren verwiesen.

Die rechnerische Beurteilung der Standsicherheit erfolgt in den Eurocodes meist mit Hilfe des sogenannten semi-probabilistischen Konzepts. Grenzzustände der Tragfähigkeit müssen untersucht werden. Es muss nachgewiesen werden, dass die Bemessungswerte der Einwirkungen nicht größer als die Bemessungswerte der Widerstände sind. Die Bemessung erfolgt unter Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten aus charakteristischen Werten der Einwirkungen und repräsentativen Werten der Widerstände. Die repräsentativen Werte der Widerstände werden auf Grundlage der „abgeleiteten Werte“ der Baugrundkenngrößen bestimmt. Details dazu sind in EN 1990-1 (2022) sowie in EN 1997-1 (2024) geregelt.

Geometrische Eigenschaften werden im EC7 normalerweise durch Nennwerte a_{nom} repräsentiert. Dies gilt auch für die geometrischen Eigenschaften der Diskontinuitäten (EN 1990-1 (2022), 6.3 (1)-(5)). Bemessungswerte a_d für geometrische Eigenschaften sollten durch Berücksichtigung von Abweichungen Δa , also $a_d = a_{nom} \pm \Delta a$ bestimmt werden, wenn der Tragwerksentwurf empfindlich gegenüber Änderungen einer geometrischen Eigenschaft ist (EN 1990-1 (2022), 8.3.7). Der Nennwert von geometrischen Eigenschaften von Diskontinuitäten darf mittels einer Sensitivitätsanalyse anhand eines probabilistischen Ansatzes bestimmt werden. Geometrische Eigenschaften von Trennflächen müssen Informationen hinsichtlich Ausrichtung, Abstand, Persistenz, Öffnungsweiten und Rauigkeit einschließen (EN 1997-1 (2024), 4.3.3(3)-(6)). Bei der rechnerischen Beurteilung der Standsicherheit von Felsböschungen ist eine Untersuchung der Variabili-

tät unter Verwendung aller gemessenen Trennflächenorientierungen durchzuführen. Laut ÖNORM EN 1990-2 (Schlussentwurf 2022) kann ein probabilistischer Ansatz genutzt werden, aber auch andere Verfahren, wie der kombinatorische Ansatz (Analyse Keilversagen), sind erlaubt. Beim kombinatorischen Ansatz werden alle möglichen Kombinationen der Trennflächenorientierungen, die einen Keil bilden können, analysiert, um den Keil mit der geringsten Standsicherheit zu ermitteln. Als Alternative zum semi-probabilistischen Konzept dürfen auch andere zuverlässigkeitsbasierte Verfahren herangezogen werden, was besonders bei einem Gebirge, dessen Verhalten durch das Verhalten der Trennflächen bestimmt wird, notwendig sein kann.

Zum aktuellen Stand der Bearbeitung des EC7 und der Anwendbarkeit auf Felsböschungen im Allgemeinen wird ergänzend auf den Journal Geomechanics and Tunneling, 2023, Vol. 16, 5. verwiesen (z.B. Harrison et al. 2023 und Walter et al. 2023).

4. GENERELLE VORGEHENSWEISE

Die Beurteilung der Standsicherheit von Felsböschungen beruht auf der Erstellung eines Gebirgsmodells, den daraus resultierenden potenziellen Versagensmechanismen, dem Systemverhalten und dem dafür ausgewählten Beurteilungsverfahren.

In einem ersten Schritt werden die Eingangsdaten im Rahmen der Erkundung erhoben und dokumentiert. Dies beinhaltet alle für die Beurteilung der Standsicherheit relevanten Daten und bezieht sich unter anderem auf geologische Daten, hydrogeologische Daten, in situ Spannungen, strukturgeologische Daten und Daten aus Feld- und Laborversuchen.

Auf Grundlage der Eingangsdaten werden Gebirgsarten festgelegt. Dadurch ergeben sich Gebirgsvolumina mit gleichartigen Eigenschaften. Für jede Gebirgsart sind für die nachfolgende Standsicherheitsbeurteilung die relevanten Kennwerte in einer Bandbreite anzugeben. Diese beinhaltet sowohl direkt gemessene wie auch abgeleitete Kennwerte. In Kapitel 7.1.4 wird auf die Relevanz einer etwaigen Veränderlichkeit detailliert eingegangen.

In einem zweiten Schritt erfolgt eine Modellierung der Felsböschung. Dabei sind sowohl die geometrischen Verhältnisse als auch die geotechnischen Verhältnisse zu berücksichtigen. Dies beinhaltet beispielsweise die Böschungsorientierung in Relation zum Gefüge des Gebirges, die Böschungshöhen oder die geometrische Ausformung von Böschungssystemen ebenso wie die geotechnische Modellierung von möglichen Bruchmechanismen. Das Systemverhalten mit Einflüssen aus der Abtrags- oder Gewinnungstätigkeit ist zu berücksichtigen.

Auf dieser Grundlage können potenzielle Versagensmechanismen erkannt und den jeweiligen Böschungen oder Böschungsabschnitten zugeordnet werden. Daraus werden Homogenbereiche definiert.

In einem dritten Schritt werden auf Grundlage der erkannten Versagensmechanismen geeignete Beurteilungsverfahren ausgewählt. Diese Beurteilungsverfahren können empirische, analytische oder numerische Verfahren beinhalten, sind je nach projektspezifischen Anforderungen auszuwählen und müssen jedenfalls die potenziellen Versagensmechanismen abbilden können.

Für spezifische Anforderungen an die Beurteilungsverfahren wird auf die Kapitel 7.3 bis 7.6 bzw. den Anhang 1 verwiesen.

Auf Grundlage des ausgewählten Beurteilungsverfahrens ergibt sich ein Beurteilungsergebnis, das mit den vorab definierten Kriterien zu vergleichen ist. Ist das Kriterium eingehalten, ist der Nachweis der Standsicherheit erfüllt. Wird das Kriterium nicht eingehalten, müssen zusätzliche Maßnahmen wie organisatorische oder technische Maßnahmen zur Einhaltung getroffen werden. Es kann auch nötig sein, weitere Eingangsdaten zu erheben.

Die beschriebene generelle Vorgehensweise für die Standsicherheitsbeurteilung von Felsböschungen ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

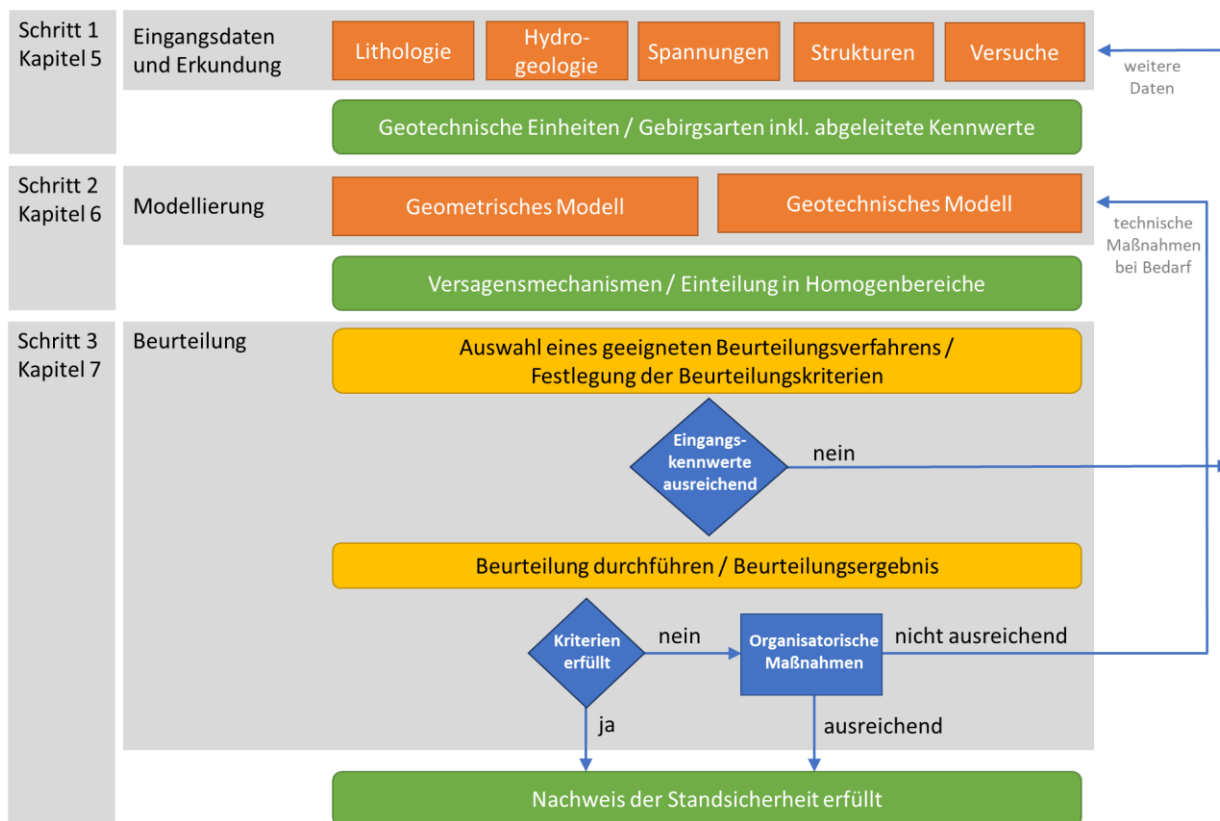


Abb. 1. Generelle Vorgehensweise für die Standsicherheitsbeurteilung von Felsböschungen

5. ERKUNDUNG

5.1. Grundsätzliches

Ziel der Erkundung ist es, für den betroffenen Bereich die geologischen, hydrogeologischen und geomechanischen Verhältnisse des Gebirges zu erfassen und in Berichten zu dokumentieren und zu beschreiben. Diese Berichte bilden die Grundlage für die weiteren Standsicherheitsbeurteilungen und die geotechnische Planung.

5.2. Umfang der Erkundung

Der Umfang der Untersuchungen ist durch Anforderungen für die jeweiligen Aufgabenstellungen vorgegeben (z.B. ÖNORM B 1997-2, ÖNORM G 1200-3). Zusätzlich können in Abstimmung mit zuständigen Behörden oder Auftraggebern projektspezifische Anforderungen definiert werden. Dabei ist von wesentlicher Bedeutung, ob es sich um eine Einzelbetrachtung zu einem Zeitpunkt handelt oder um eine laufende geotechnische Bearbeitung im Zuge einer langfristigen Herstellung von Böschungen in einem aus geotechnischer Sicht bekannten Umfeld.

Es sollte eine Grundlagenerhebung sowie eine ingenieurgeologische Detailkartierung durchgeführt werden. Je nach Zahl und Qualität der natürlichen bzw. bestehenden Aufschlussverhältnisse sind diese durch künstliche Aufschlüsse (z.B. Schürfe, Kernbohrungen) zu ergänzen. Zusätzlich können Untersuchungsmethoden wie Geophysik und Photogrammetrie angewendet werden.

Zur Ermittlung der geotechnisch relevanten Parameter sollen neben den bekannten Feldmethoden auch nach Erfordernis Laborversuche durchgeführt werden.

In Hinblick auf die Standsicherheit von Böschungen kommt den Eigenschaften und der Orientierung von Trennflächen eine besondere Bedeutung zu. Diese sollen in einem ausreichenden Ausmaß erfasst und beschrieben sein, um die Streuung ihrer Eigenschaften statistisch abbilden zu können.

Umfang und Art der Erkundung müssen so gewählt werden, dass die Summe der Ergebnisse fachlich ausreichend ist, um relevante Gebirgsbereiche geologisch-geomechanisch charakterisieren zu können. Sollten sich die Eigenschaften des betrachteten Festgesteinsbereiches bereichsweise ändern (z.B. Lithologie, Festigkeit, Trennflächenorientierung, Persistenz, Klufttraugigkeiten, ...), so sind geologisch-geomechanische Homogenbereiche/Gebirgsarten mit gleichartigen Eigenschaften zu unterscheiden und räumlich zu beschreiben.

6. VERSAGENSMECHANISMEN

6.1. Allgemeines

Im Rahmen dieser Empfehlung wird unter Versagen die gravitativ bedingte, hangabwärts gerichtete Verlagerung von Gebirge verstanden. Generell ist hierbei zwischen dem Versagensmechanismus (Ablöseprozess) und dem Auslauf- bzw. Sturzprozess zu unterscheiden.

Die korrekte Festlegung des maßgeblichen Versagensmechanismus ist die Grundlage für die Wahl eines passenden mechanischen Modells bzw. Beurteilungsverfahrens.

Bei den Versagens- bzw. Ablösemechanismen wird grob zwischen “Deformationen ohne Ablösung von Fels”, “Ablösemechanismen von einzelnen Kluftkörpern” und “Ablösemechanismen zusammenhängender Felsbereiche” unterschieden.

Bei der Festlegung des maßgeblichen Versagensmechanismus ist der betrachtete Maßstab von Bedeutung und zu berücksichtigen. So kann z.B. bei einer Tagbauböschung bei Betrachtung der Gesamthöhe (Gesamtstandsicherheit) der Mechanismus Rotationsgleiten (siehe Kapitel 7.4.2) und bei Betrachtung der Etage trennflächendominiertes Versagen (Gleiten, Keilgleiten, Kippen) maßgeblich sein.

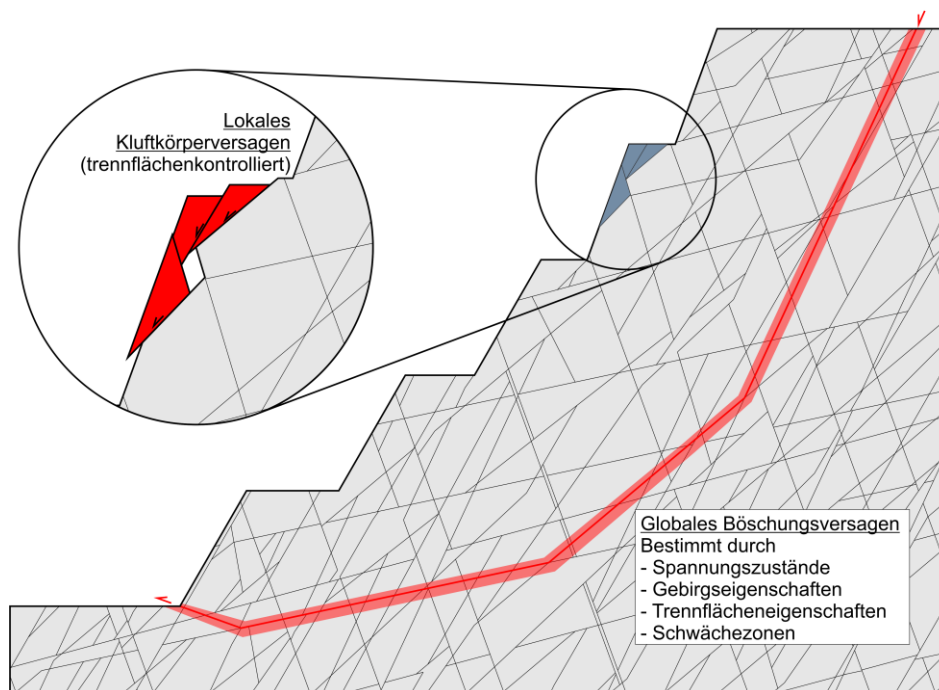


Abb. 2. Einfluss des betrachteten Maßstabs auf den maßgeblichen Versagensmechanismus

Der folgende Katalog möglicher Versagensmechanismen behandelt die bei Felsböschungen am häufigsten vorkommenden Mechanismen. Für eine umfangreichere Liste wird auf Hungr et al. 2014 verwiesen.

6.2. Große Verschiebungen ohne Ablösung von Fels

6.2.1. Hangkriechen

Unter Hangkriechen werden kontinuierlich abnehmende Verformungen mit zunehmender Tiefe (aufgrund der Abnahme der deviatorischen Spannungen mit der Tiefe) verstanden. Der Mechanismus wird auf das Kriechen von Gesteinsmassen (Lockergestein oder Festgestein) zurückgeführt und kann numerisch mittels der FEM und FDM unter Berücksichtigung eines viskoplastischen Verhaltens der Gesteinsmasse (siehe z.B. Konietzky et al. 2004) modelliert werden. Der Mechanismus führt zumeist zu grabenartigen Strukturen (Bergzerreißung) oberhalb der Hangkante und zu Verwölbungen am Hangfuß (Talzuschub).

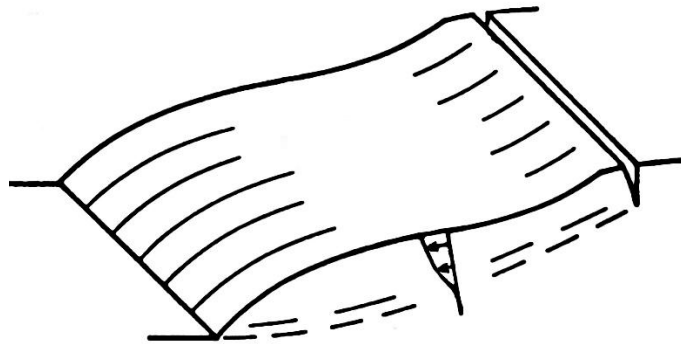


Abb. 3. Darstellung eines Hangkriechens (Poisel & Preh 2004)

6.2.2. Knickbandsackung

Es handelt sich um eine S-förmige Verformung von Gesteinslamellen, die steil oder nahezu parallel zur Böschung stehen (Kieffer 1998). Knickbandsacken entsteht durch Scherverschiebungen entlang der Trennflächen sowie durch viskoplastische Verformungen des Gesteins. Dieser Mechanismus kann mittels diskreter/hybrider Berechnungsansätze modelliert werden (z.B. DEM).

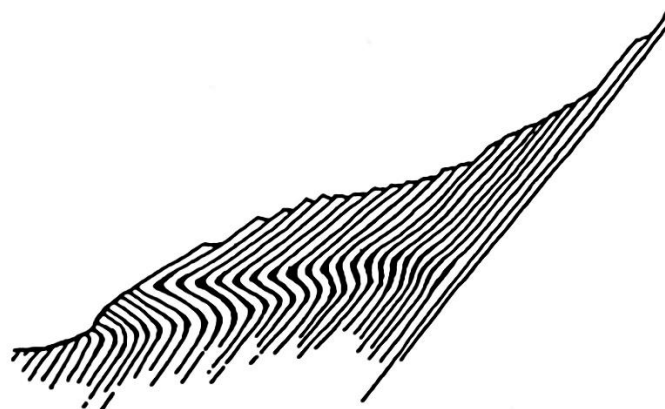


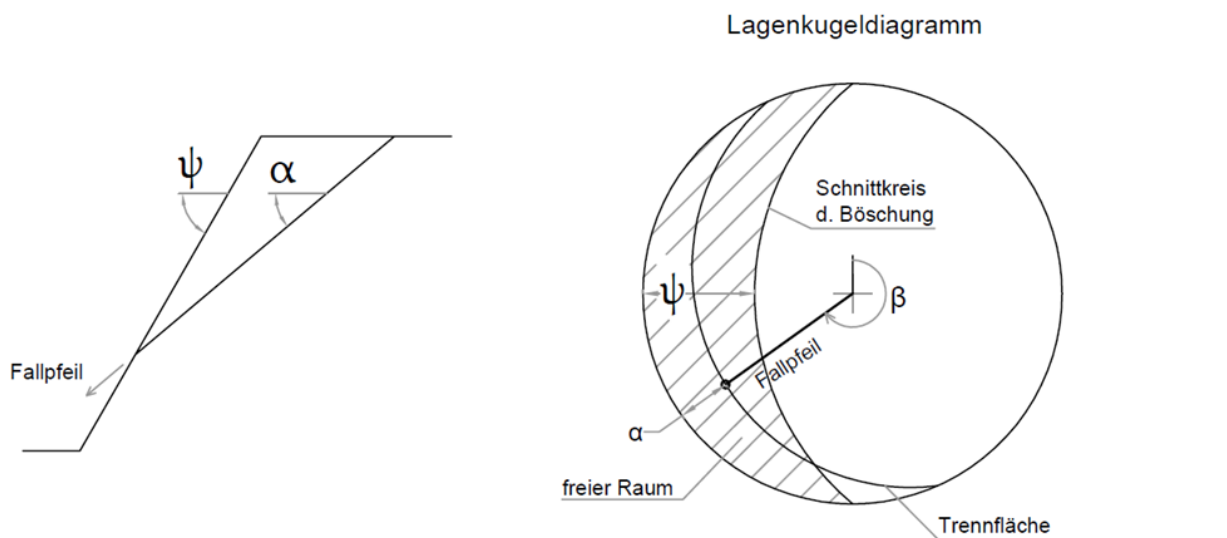
Abb. 4. Knickbandsackung (Kieffer 1998)

6.3. Ablösemechanismen von einzelnen Kluftkörpern

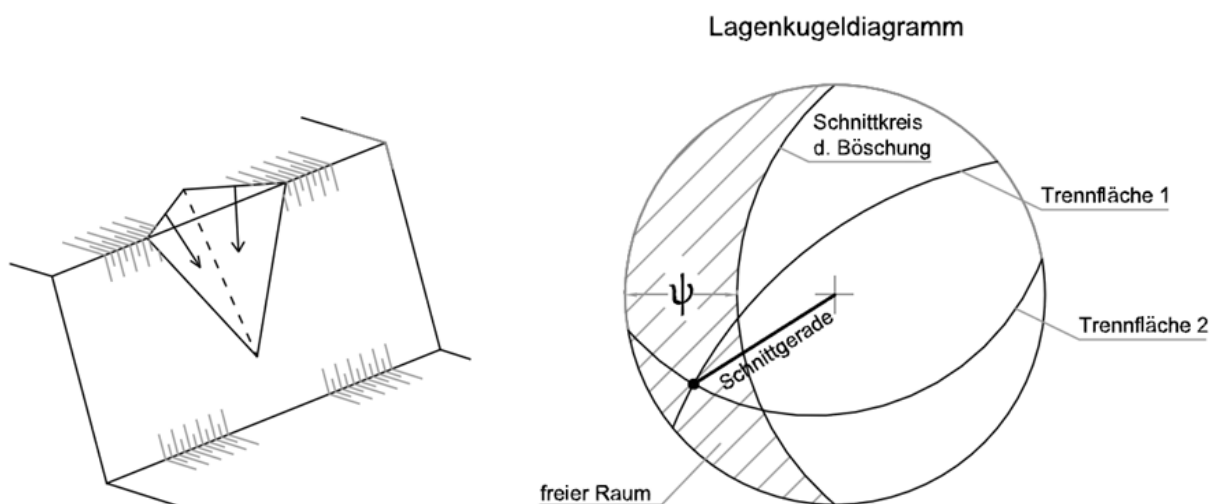
6.3.1. Gleiten von Klüftkörpern

Translatorisches Gleiten eines Blocks auf einer oder auf zwei Trennflächen (Hoek & Bray 1981).

Gleiten tritt auf, wenn die Scherkräfte den Scherwiderstand in der Trennfläche oder in den Trennflächen überschreiten. Auf einer Trennfläche kann ein Kluftkörper unter alleiniger Einwirkung der Schwerkraft nur dann abgleiten, wenn er kinematisch frei ist. Beim Gleiten auf zwei Trennflächen muss die kinematische Voraussetzung, dass das Verschneidungslinien ins Freie zeigt, erfüllt sein (siehe Abb. 5). Kinematisch freie Blöcke können z.B. mit Hilfe der Blocktheorie (Goodman & Shi 1985) räumlich identifiziert werden.



Kinematische Voraussetzung des Mechanismus Gleiten



Kinematische Voraussetzung des Mechanismus Keilgleiten

Abb. 5. Ablösen von einzelnen Kluftkörpern und die Darstellung im Lagenkugeldiagramm (Preh 2020)



Abb. 6 *Blockgleiten entlang der Schichtung (Foto G. Koch)*



Abb. 7 *Keilgleiten kleinmaßstäblich durch zwei wiederkehrende Trennflächensysteme (Foto G. Koch)*



Abb. 8 *Keilgleiten großmaßstäblich, Bergsturz von Val Pola (Bormio) (Foto A. Preh)*

6.3.2. **Blockkippen**

Wird die Felsböschung durch

- eine steil in den Berg einfallende Trennflächenschar sowie durch
- eine etwa orthogonal stehende flach bis mittelsteil einfallende Trennflächenschar

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

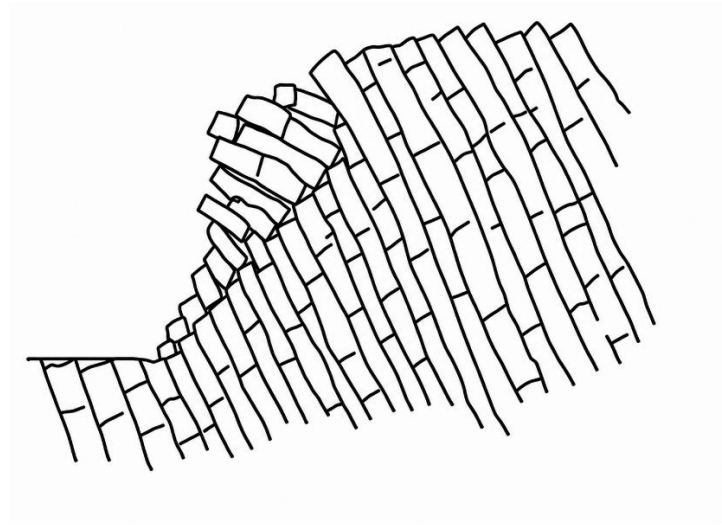


Abb. 9 *Blockkippen (Goodman & Bray 1976)*



Abb. 10 *Blockkippen (Foto S. Bauer)*

6.3.3. Biegekippen

Bei diesem Versagensmechanismus verbiegen sich steil in den Hang einfallende, platten- oder säulenförmige Kluftkörper infolge der Schwerkraft ähnlich Kragarmen. Dabei kann es zur Bildung von Biegezugrissen kommen, wodurch das Biegekippen in Blockkippen übergehen kann. Voraussetzung dafür sind

- ein geringer Scherwiderstand entlang der steil bergwärtsfallenden Trennflächenschar, sodass es zu Scherverschiebungen zwischen den plattenförmigen Kluftkörpern kommt und
- eine niedrige Gesteinsfestigkeit.

Dieser Mechanismus tritt bevorzugt in dünnbankigen bis dünnschiefrigen Gesteinen auf.

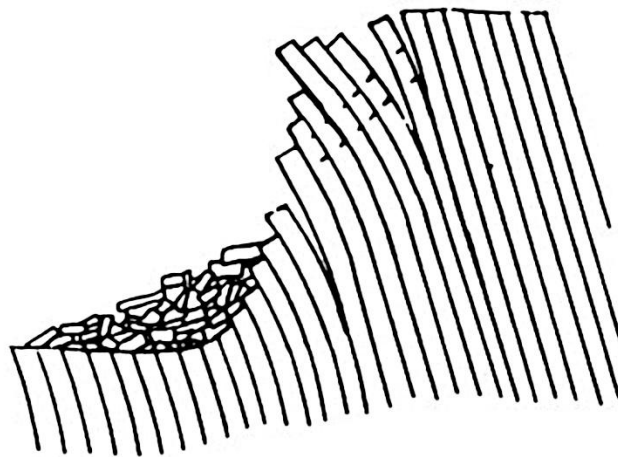


Abb. 11 Biegekippen (Goodman & Bray 1976)

6.3.4. Ausknicken

Unter Knickversagen wir das Ausknicken von säulen- oder plattenförmigen Kluftkörpern verstanden, deren Dicke im Vergleich zur Hanghöhe gering ist (z.B. bei dünnbankigen Gesteinen). Die rechnerische Untersuchung dieses Mechanismus ist mittels des Verfahrens von Cavers (Cavers 1981) möglich. Numerische Untersuchungen mittels der DEM (Preh 2004) haben gezeigt, dass die Knicklänge etwa ein Viertel der gesamten Hanglänge beträgt.



Abb. 12 Ausknicken kleinmaßstäblich (Foto T. Stoxreiter)

6.4. Ablösemechanismen zusammenhängender Felsbereiche

6.4.1. Gleiten mehrerer Teilkörper auf einer polygonalen Gleitfläche

Die Definition erfolgte nach Gussmann 1988. Das Gleiten mehrerer Blöcke auf einer polygonalen Gleitebene ist nur dann möglich, wenn antithetische Brüche (Mandl 1988) vorhanden sind oder sich bei Bewegungen des Hanges entwickeln.

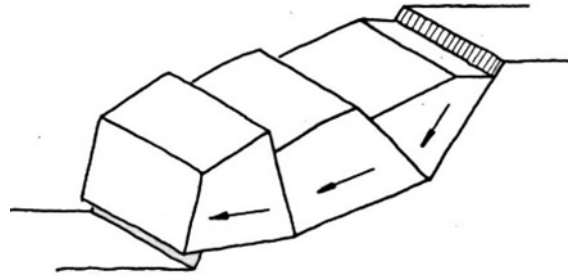


Abb. 13 Gleiten von mehreren Teilkörpern auf einer polygonalen Gleitebene (nach Poisel & Preh 2004)



Abb. 14 Felsgleitung von Vajont (Foto A. Preh)

6.4.2. Rotationsgleiten

Obwohl die Stabilität von Felsböschungen im Allgemeinen durch geologische Merkmale (meist einige wenige Trennflächen) bestimmt wird, können kreisförmige Versagensflächen wie im Boden in stark zerklüftetem Felsen auftreten, wenn die Blockabmessungen im Vergleich zur Böschungshöhe deutlich kleiner sind.



Abb. 15 Rotationsgleiten als globales Böschungsversagen (NBC News)



Abb. 16 Rotationsgleiten als globales Böschungsversagen - Hope Slide (Foto R. Poisel)

6.4.3. Rückwärtsrotation (Rock Slumping)

Dieser Versagensmechanismus verläuft ähnlich wie das Gleiten einer zu flach an die Wand angelehnten Leiter (Kieffer 1998). Dabei gleiten tafelige Kluftkörper auf horizontalen bis flach hangauswärts fallenden Klüften sowie auf steiler als die Böschung einfallenden Klüften.

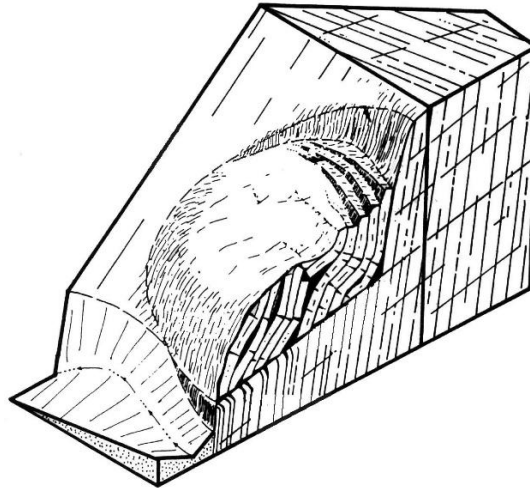


Abb. 17 Rückwärtsrotation (Kieffer 1998)



Abb. 18 Rückwärtsrotation, Pardee dam (Foto S. Kieffer)

6.4.4. Hart auf Weich

Zerlegung von kompetentem, relativ hartem Fels auf einem inkompetenten, wenig festen Sockel in turm- oder plattenförmige Teilkörper ("Hart auf Weich"). Durch den Mechanismus können Sekundärprozesse wie Gleiten oder Kippen von Kluftkörpern in den harten, kompetenten Platten und Rotationsgleiten oder Hangkriechen im Sockelmaterial ausgelöst werden.

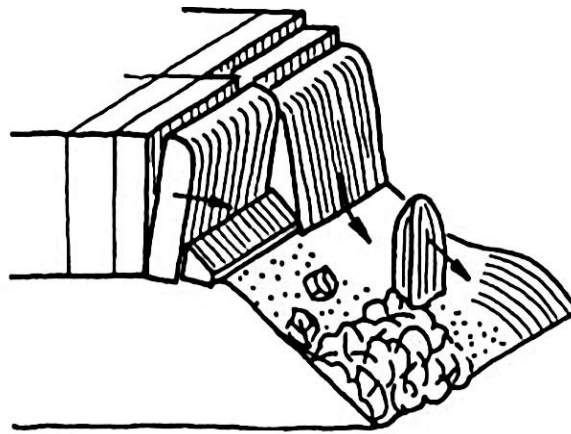


Abb. 19 Hart auf Weich (Poisel & Eppensteiner 1988)



Abb. 20 Hart auf Weich: Plassenkalk auf Haselgebirge, Westflanke Sandling (Foto G. Koch)

6.4.5. Kombinierte Versagensmechanismen - Rotation und Translation bzw. Mehrkörpermechanismus

Die genannten Versagensmechanismen können auch in Kombination auftreten.

6.4.6. Auslaufmechanismen

Die dem Ablösemechanismus folgenden Auslaufmechanismen bzw. Sturzprozesse wie Stein-schlag, Felssturz (Felslawine) und Bergsturz werden in dieser Empfehlung nicht behandelt. Es wird auf vertiefende Literatur verwiesen, z.B. Hungr et al. 2001, Hungr et al. 2014 und Preh 2020.

7. BEURTEILUNGSVERFAHREN

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die bekannten Verfahren zur Beurteilung der Standsicherheit von Felsböschungen mit deren Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen beschrieben. Dabei wird der derzeitige Entwicklungsstand in den Bereichen Ingenieurbauwerke, Rohstoffbetriebe und Naturgefahrenschutz so gut wie möglich dargestellt.

Die Auswahl eines geeigneten Beurteilungsverfahrens sollte systematisch und zielspezifisch erfolgen und ist im Wesentlichen abhängig von Rahmenbedingungen wie

- Art der Böschung (Einzelböschung, Böschungssystem, Talflanken),
- Zweck der Böschung,
- möglichen externen Lasteinwirkungen,
- Nutzungsdauer der Böschung,
- Qualität der Eingangsparameter,
- Bandbreite der Eingangsparameter und Auswirkung auf die Genauigkeit der Ergebnisse,
- Versagensmechanismus,
- räumliche Ausdehnung eines potenziellen Versagens (worst-case-scenario),
- potenzielles Schadensausmaß bei Versagen (worst-case-scenario),
- Erfordernis des Vorliegens einer zeitgerechten Beurteilung,

sowie der Berücksichtigung der Auswirkungen auf

- Allgemeinheit,
- Arbeitssicherheit oder
- Arbeitsabläufe.

Für spezifische Anforderungen an die Beurteilungsverfahren wird auf die Kapitel 7.3 bis 7.6 bzw. den Anhang 1 verwiesen.

Der Anhang 1 enthält einen Überblick von Beurteilungsverfahren, die nach dem aktuellen Entwicklungsstand in den Bereichen Ingenieurbauwerke, Rohstoffbetriebe und Naturgefahren angewandt werden können. Die Auflistung ist beispielhaft, nicht vollständig, nicht gereiht und stellt kein Kriterium für die Anwendung dar.

7.1. Allgemeines

7.1.1. Beurteilungsmaßstab

Die Beurteilung der Standsicherheit von Felsböschungen beruht auf einer Vielzahl an Parametern. Die Verfügbarkeit von Gebirgsparametern allgemein bzw. die auf Basis der Erkundung ermittelte Bandbreite von Gebirgsparametern stellt für die Auswahl des Beurteilungsverfahrens einen relevanten Faktor dar. Zur Ermittlung von Kennwerten für lokal abgegrenzte Bereiche ist für die Beurteilung von Felsböschungen die Variabilität der Gebirgsparameter von essenzieller Bedeutung. Dies gilt sowohl für den Vorgang der Beurteilung an sich als auch für die Verifikation und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Die Wahl des Beurteilungsverfahrens hängt auch von der Verfügbarkeit der Gebirgsparameter ab, um ein Ergebnis für die zeitgerechte Ausführung von Abtrags- oder Gewinnungstätigkeiten zu erhalten. Der Maßstab der Beurteilung kann von einer Einzelböschung über Böschungssysteme bis hin zu ganzen Talflanken reichen. Der Beurteilungsmaßstab hat einen wesentlichen Einfluss auf die für die Beurteilung notwendigen Parameter.

7.1.2. Versagensmechanismus

Der Versagensmechanismus ist die Grundlage für die Wahl eines passenden Beurteilungsverfahrens. Das gewählte oder die gewählten Verfahren müssen in der Lage sein, die relevanten Versagensmechanismen abzubilden.

Bei Einzelböschungen wird in den meisten Fällen ein trennflächen-dominiertes Versagensmechanismus vorliegen. Im Falle von hohen Böschungssystemen und Talflanken ist großteils von mehreren, miteinander interagierenden Versagensmechanismen auszugehen. Lässt sich ein Versagensmechanismus nicht eindeutig definieren, so ist ein Verfahren oder die Kombination mehrerer Verfahren anzuwenden, welche alle geomechanisch plausiblen Versagensmechanismen erfassen können.

7.1.3. Schutzziele

Das mögliche Versagen von Felsböschungen stellt Gefährdungspotentiale für Menschen und Sachgüter dar. Die konkreten Gefährdungspotentiale werden im Zuge der Analyse von Gefahren festgelegt, um daraus die Risiken abzuleiten oder zu berechnen. Die Festlegung von etwaigen Maßnahmen hängt dann von den jeweiligen Schutzziele ab. Die nachfolgende Definition orientiert sich an BAFU 2016. Schutzziele repräsentieren ein angestrebtes Sicherheitsniveau, welches sich an gesellschaftspolitisch akzeptierten Restrisiken orientiert. Die Schutzziele sind daher projektspezifisch unter Beachtung der verschiedenen Randbedingungen festzulegen.

Eine Möglichkeit zur Umsetzung besteht in der in den Eurocodes festgelegten Vorgehensweise. Hierbei erfolgt eine Einstufung in Versagensfolgeklassen und geotechnische Kategorien. Die Versagensfolgeklassen beeinflussen Anforderungen an das Qualitätsmanagement und die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte. Die geotechnischen Kategorien bestimmen z. B. Anforderungen an die Erkundungstiefe, an Kontrollen („Validierung“) der Eingangsparameter und Plausibilisierung der Berechnungsansätze und Berechnungsergebnisse.

Stehen hingegen eine zeitnahe Evaluierung und Vorgabe von Maßnahmen, wie beispielsweise die Festlegung von Gefahrenbereichen, im Vordergrund, ist eine entsprechend flexible Herangehensweise zielführend. Dies ist im Speziellen während der Ausführung von Abtrags- oder Gewinnungstätigkeiten der Fall.

7.1.4. Bandbreite der Eingangsparameter

Bei allen Verfahren sind für die jeweiligen Gebirgsarten repräsentative Eingangsparameter zu ermitteln. Die Bandbreite oder Streuung der Eingangsparameter beeinflussen die Zuverlässigkeit des Ergebnisses in Bezug auf die Standsicherheit. Unter Umständen können geringe Änderungen der Eingangsparameter starke Auswirkungen auf die resultierende Standsicherheit haben. Bei geringem Detaillierungsgrad der Erkundung und/oder großer Bandbreite der Eingangsparameter ist auf die mögliche Variabilität des Ergebnisses hinzuweisen und durch Variation der Eingangsparameter mittels Sensitivitäts- oder Robustheitsanalyse die zu erwartende Unschärfe des Ergebnisses zu ermitteln und zu beschreiben. Ergeben sich in der weiteren Projektbearbeitung durch ergänzende Informationen Änderungen der Parameter, so ist dies zu dokumentieren und die jeweilige Beurteilung entsprechend anzupassen.

Bei der Anwendung von Berechnungsverfahren ist in vielen Fällen eine Rückrechnung der Eingangsparameter in Bezug auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit sinnvoll. Werden mittels Rückrechnung ermittelte Parameter auf größere Böschungsbereiche angewandt, so ist die damit entstehende Variabilität der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Beobachtungen von Versagensereignissen in der Nähe des Projektgebiets und bei vergleichbaren geotechnischen Verhältnissen sollen dazu verwendet werden, die Bandbreite der Eingangsparameter einzuschränken. Zum Beispiel können Trennflächenorientierungen oder Reibungswinkel so lange variiert werden, bis rechnerisch die Sicherheit 1,0 beträgt. Dabei sind der Maßstab der beobachteten Versagensereignisse, die im Projektgebiet möglichen Versagensmechanismen und externe Einwirkungen zu berücksichtigen.

7.2. Empirische Verfahren

Empirische Verfahren (Klassifizierungsschemata) sind darauf ausgelegt, die Standsicherheit mittels einer Reihe von gewichteten Faktoren zu bewerten, welche maßgeblichen Einfluss auf die Standsicherheit von Felsböschungen haben (z.B. Trennflächenorientierungen, Persistenz, Gesteinsfestigkeit, Klufttrauigkeit, Höhe und Neigung der Böschung).

Die nachfolgenden Beschreibungen einzelner empirischer Verfahren stellen eine beispielhafte und unvollständige Auswahl dar. Eine Auflistung von weiteren, dem aktuellen Entwicklungsstand entsprechenden, Verfahren ist in Anhang 1 dargestellt.

7.2.1. SSPC - Slope Stability Probability Classification chart

Kurzbeschreibung

Ermittlung einer Wahrscheinlichkeit der Standsicherheit für Böschungssysteme

Versagensmechanismen

Rotationsgleiten

Erforderliche Eingangsparameter

Gebirgsfestigkeit/RMS, Höhe der Böschung, Neigung der Böschung, Oberflächenkontur, Gesteinsfestigkeit, Verwitterungsanfälligkeit, Bergwasser, Orientierung von Trennflächen, Kluftkörpergröße und -form, Widerstand entlang der Trennflächen, Witterung, Sekundärbelastung, Herstellungsart der Böschung.

Berücksichtigung der Bandbreite der Eingangsparameter

Ja, Einteilung in Klassen

Berücksichtigung von externen Einwirkungen

Ja, mögliche Auswirkungen der Gewinnungs-/Abtragstätigkeit werden berücksichtigt

Ergebnis

Zuschnittsparameter einer Böschung (Generalneigung)

7.2.2. Böschungsbewertungssystem Tagebau B²ST

Kurzbeschreibung

Verfahren zur Evaluierung der geogenen Gefahrenbereiche gemäß gesetzlichen Vorgaben für den Bergbau von temporären Tagbauböschungen. Dokumentation der Evaluierung zum Nachweis des Arbeitnehmerschutzes. Ermittlung eines Gefahrenpotentials und darauf basierend Ableitung von Sicherheitsabständen an der Böschung

Versagensmechanismen

Keilgleiten, Blockgleiten, Blockkippen

Erforderliche Eingangsparameter

Verbandsfestigkeit, Höhe der Böschung, Neigung der Böschungsoberkante, Neigung der Böschung, Oberflächenkontur, Gesteinsfestigkeit, Verwitterungsanfälligkeit, Bergwasser, Orientierung von Trennflächen, Kluftkörpergröße und -form, Widerstand entlang der Trennflächen, Witterung, Sekundärbelastung, Herstellungsart der Böschung

Berücksichtigung der Bandbreite der Eingangsparameter

für jede Lithologie einzeln definiert, mögliche Unsicherheit in Berechnungsmethodik berücksichtigt

Berücksichtigung von externen Einwirkungen

Ja, mögliche Auswirkungen der Gewinnungstätigkeit werden berücksichtigt

Ergebnis

Standsicherheit und allgemeines Risikopotential einer Böschung, notwendiger Sicherheitsabstand nach Arbeitnehmerschutz aufgrund geogener Risiken

7.3. Kinematische Analysen

Kinematische Analysen sind Verfahren zur Bewertung des Versagenspotentials (Versagen kinematisch möglich: Ja/Nein) verschiedener trennflächendominierter Versagensmechanismen, wie Blockgleiten, Keilgleiten und Blockkippen auf Basis der stereographischen Projektion von Trennflächenorientierungen. Die kinematischen Analysen basieren auf dem Markland-Test, der in Hoek & Bray 1981 beschrieben ist.

Kinematische Verfahren berücksichtigen:

- Räumliche Orientierung der Trennflächen
- Persistenz

- Beschaffenheit der Trennflächen

Ergebnis (Klassifikation, konkreter Wert)

- Beurteilung des lokalen Versagens von wenigen Blöcken entlang von Trennflächen mit geringer bis mittlerer Persistenz (Kluftflächen)
- Beurteilung des regionalen Versagens von Kluftkörpern, welche durch hochpersistente Trennflächen (z.B. Bankungsflächen, Störungen) begrenzt werden.
- Mögliche Verifizierung/Voruntersuchung für empirische und numerische Verfahren.

7.3.1. Markland Test

Kurzbeschreibung

Prognose für das Ablösen von Kluftkörpern auf Basis von Gefügeanalyse in Bezug auf die Böschungsrichtung

Abbildbare Versagensmechanismen

Blockgleiten, Keilgleiten, Blockkippen

Erforderliche Eingangsparameter

Orientierung von Trennflächen, Reibungswinkel

Berücksichtigung der Bandbreite der Eingangsparameter

Ja, variierbar

Berücksichtigung von externen Einwirkungen

nein

Ergebnis

Potential des Ablösens von Kluftkörpern bezogen auf unterschiedliche Böschungsrichtungen

7.4. Grenzgleichgewichtsverfahren

Im Rahmen von Grenzgleichgewichtsverfahren werden die treibenden und die rückhaltenden Kräfte/Momente oder Spannungen in zu definierenden Gleitflächen unter Verwendung von geschlossenen oder iterativen Algorithmen gegenübergestellt, um eine Aussage betreffend die Standsicherheit der betrachteten Felsböschungen treffen zu können. Unabhängig von den einzelnen Berechnungsalgorithmen, können drei Gruppen von Versagensmechanismen mittels Grenzgleichgewichtsverfahren untersucht werden:

- Blockgleiten, Keilgleiten und Gleiten entlang einer polygonalen Trennfläche
- Rotationsversagen
- Kippen

Voraussetzung der Anwendung von Grenzgleichgewichtsverfahren ist die korrekte Identifizierung des maßgeblichen Versagensmechanismus und die damit einhergehende Auswahl eines geeigneten Beurteilungsverfahrens, inklusive der Randbedingungen. Sofern diese Voraussetzungen erfüllt werden, können durch Grenzgleichgewichtsverfahren aussagekräftige Beurteilungsergebnisse mit vergleichbar geringem Ressourceneinsatz erzielt werden.

7.4.1. Keilgleiten, Blockgleiten

Kurzbeschreibung

Die Ermittlung der rechnerischen Standsicherheit erfolgt in Verbindung mit dem Versagen eines Blocks entlang einer Trennfläche ("Infinite slope") bzw. eines Keils entlang der Schnittlinie zweier Trennflächen. Es gelten dieselben geometrischen Voraussetzungen wie für kinematische Analysen. Als Ergänzung zu diesen, können bei diesem Beurteilungsverfahren sowohl die Kohäsion als auch externe Einwirkungen aus Wasserdruck und Stützmitteln in der Berechnung berücksichtigt werden.

Versagensmechanismen

Keilgleiten und Blockgleiten

Berücksichtigung der Bandbreite der Eingangsparameter

Ja, mehrere Gebirgsparameter und externe Lasten variierbar

Erforderliche Eingangsparameter

Trennflächenorientierungen, Reibungswinkel, Kohäsion, Bergwasser

Berücksichtigung von externen Einwirkungen

Möglich, z.B. Erdbeben, Bergwasser, Stützmittel

Ergebnis

Standsicherheit/Sicherheitsfaktor

7.4.2. Rotationsgleiten (mit Lamellenverfahren)

Kurzbeschreibung

Vor allem bei Böschungssystemen ist bei entsprechenden gebirgsmechanischen Randbedingungen das Versagen nicht an das Trennflächengefüge gebunden, sondern erfolgt entlang einer Fläche, welche den geringsten Scherwiderstand aufweist. Für die Berechnung mittels Lamellenverfahren muss die untersuchte Böschung als abschnittsweise homogener Gebirgskörper idealisierbar sein, wobei sowohl kreisförmige, nicht-kreisförmige als auch zusammengesetzte Gleitflächen berücksichtigt werden können. Durch Variation der Geometrie der Versagensfläche (Mittelpunktvariation bei kreisförmiger Versagensfläche) wird der minimale Sicherheitsfaktor ermittelt. Weiters besteht die Möglichkeit zur ebenen (2D) und zur räumlichen (3D) Berechnung der Standsicherheit. Für eine Idealisierung als zweidimensionales Problem muss die Annahme eines ebenen Verzerrungszustands mit gleichbleibenden Eigenschaften (Einschnitte von Infrastrukturwerken etc.) annähernd erfüllt sein. Es können verschiedene Materialmodelle sowie eine Vielzahl an externen Einwirkungen wie Bergwasserverhältnisse, Stützmittel und andere externe Lasten berücksichtigt werden.

Versagensmechanismen

Rotationsgleiten entlang kreisförmiger, nicht-kreisförmiger und polygonal zusammengesetzter Flächen

Erforderliche Eingangsparameter

Reibungswinkel, Kohäsion, Bergwasser, für verschiedene Homogenbereiche

Berücksichtigung der Bandbreite der Eingangsparameter

Zwingend notwendig, da zumeist die Gesamtstandsicherheit von Böschungssystemen beurteilt wird

Berücksichtigung von externen Einwirkungen

Möglich, z.B. Erdbeben, Bergwasser, Stützmittel

Ergebnis

Standsicherheit/Sicherheitsfaktor

7.4.3. Blockkippen

Kurzbeschreibung

Entgegen den anderen beiden hier angeführten Grenzgleichgewichtsverfahren erfolgt das Versagen grundsätzlich nicht durch Gleiten entlang einer vorab definierten Versagensfläche, sondern durch Rotation um eine fixe Achse, irrelevant ob Blockkippen oder Biegekippen vorliegt. Dem vorliegenden Beurteilungsverfahren ist jedoch inhärent, dass sowohl die Sicherheit hinsichtlich Kippen als auch Gleiten ermittelt wird, relevant für den Sicherheitsfaktor ist der geringere Wert. Dabei werden basierend auf den gewählten Zustandsparametern der Böschung, dem Trennflächengefüge sowie den geotechnischen Trennflächeneigenschaften zuerst die theoretische Anzahl an eigenständigen Blöcken und anschließend die Kräfte je Block ermittelt. Daraus wird das Momenten-Gleichgewicht jedes idealisierten Blocks gebildet. Im Anschluss wird die rechnerische Stabilität jedes einzelnen Blockes hinsichtlich Kippen und Gleiten ermittelt und auf Basis der Gesamtheit aller Blöcke bzw. deren Interaktion ein Sicherheitsfaktor für die gesamte Böschung ermittelt. Sowohl externe Einwirkung aus Stützmitteln als auch andere Lasten können berücksichtigt werden.

Versagensmechanismen

Blockkippen und Biegekippen, Blockgleiten

Erforderliche Eingangsparameter

Trennflächengefüge, Reibungswinkel, Kohäsion

Berücksichtigung der Bandbreite der Eingangsparameter

Ja, über Berechnung aller möglichen relevanten Trennflächenverschnitte

Berücksichtigung von externen Einwirkungen

Möglich, z.B. Erdbeben, Bergwasser, Stützmittel

Ergebnis

Standsicherheit/Sicherheitsfaktor

7.5. Numerische Verfahren

Eine detaillierte Diskussion der verschiedenen numerischen Verfahren ist nicht Ziel dieser Empfehlungen, ebenso wird für Informationen zur Durchführung numerischer Berechnungen auf einschlägige Literatur verwiesen. Hinsichtlich der Unterscheidung der numerischen Verfahren und in Zusammenhang mit der möglichst realitätsnahen Modellierung der relevanten Versagensme-

chanismen kommt der Art der mechanischen Beschreibung eine besondere Bedeutung zu. Im felsmechanischen Kontext kommt bei kontinuumsmechanischen Aufgabenstellungen in der Regel die Finite Elemente Methode (FEM) oder die Finite Differenzen Methode (FDM) zum Einsatz. Voraussetzung für die Anwendung ist, dass das Gebirge annähernd als Kontinuum modelliert werden kann. Wenn hingegen das diskontinuierliche Verhalten des Gebirges dominiert, kommt üblicherweise die Diskrete Elemente Methode (DEM) zum Einsatz. Dabei werden einzelne Blöcke/Partikel diskret modelliert. Sie sind über Rand- bzw. Kontaktbedingungen miteinander verknüpft. Dadurch können grundsätzlich alle trennflächenbasierten Versagensmechanismen realitätsnah abgebildet werden. Überlappende Anwendung finden die FEM/FDM und die DEM beispielsweise, wenn massiges Gebirge mit wenigen Einzelklüften oder Gebirge mit einer sehr dominanten Trennflächenschar modelliert werden sollen. Entsprechend stellt die Auswahl des am besten geeigneten Berechnungsverfahrens und der Materialmodelle für Fels und Diskontinuitäten, die Bestimmung der zugehörigen Kenngrößen sowie die Beachtung der Anwendungsgrenzen hohe Anforderungen an den Benutzer.

7.5.1. Diskrete Elemente Methode (DEM)

Kurzbeschreibung

Die Diskrete Elemente Methode wurde von Cundall 1971 für die Berechnung von felsmechanischen Problemstellungen entwickelt und bildet die numerische Grundlage für diverse Software-Lösungen. Sie ist der Gruppe der Diskreten Elemente Verfahren (Discrete Element Method – DEM) zuzuordnen, die im Allgemeinen folgendermaßen beschrieben werden können.

Das Modell (des Diskontinuums) besteht aus diskreten Elementen/Blöcken, die Blöcke an sich stellen ein Kontinuum dar (im Extremfall die Körner des Korngefüges). Die Diskontinuitäten werden als Randbedingungen zwischen den Blöcken behandelt, wobei große Verschiebungen und Rotationen berücksichtigt werden, sowie die Verschiebungen zwischen den Diskontinuitäten über diverse Materialgesetze berücksichtigt werden können.

Abbildbare Versagensmechanismen

Bei korrekter Erfassung der geotechnischen Parameter gibt es keine grundsätzliche Einschränkung, auch Kombinationen verschiedener Versagensmechanismen können modelliert werden

Erforderliche Eingangsparameter

Gesteinsfestigkeit, Orientierung von Trennflächen, Kluftkörpergröße und -form, Scherparameter der Trennflächen, Steifigkeit der Trennflächen

Berücksichtigung der Bandbreite der Eingangsparameter

Ja, auch eine elementweise Bandbreite der Eigenschaften kann berücksichtigt werden

Berücksichtigung von externen Einwirkungen

Ja, z.B. Erdbeben, Bergwasser, Stützmittel

Ergebnis

Standsicherheit/Sicherheitsfaktor inkl. der zugehörigen Verschiebungen

8. BEURTEILUNG WÄHREND DER AUSFÜHRUNG

8.1. Grundsätzlicher Ablauf

Die Standsicherheitsbeurteilung ist während der Herstellung der Böschung laufend zu verifizieren (siehe Ablaufschema Abb. 21).

In einem ersten Schritt sind die Gebirgsarten inklusive der relevanten Kennwerte unter Berücksichtigung der Streuung zu erheben und mit den Eingangsdaten der vorliegenden Standsicherheitsbeurteilung zu vergleichen. Bei wesentlichen Abweichungen ist die Standsicherheitsbeurteilung zu ergänzen oder anzupassen.

In einem zweiten Schritt sind die potenziellen Versagensmechanismen zu erheben und mit den der Standsicherheitsbeurteilung zu Grunde liegenden zu vergleichen. Bei wesentlichen Abweichungen ist die Standsicherheitsbeurteilung zu ergänzen oder anzupassen.

Bei Übereinstimmung der vor Ort erhobenen Daten mit jenen der Standsicherheitsbeurteilung ist diese anwendbar.

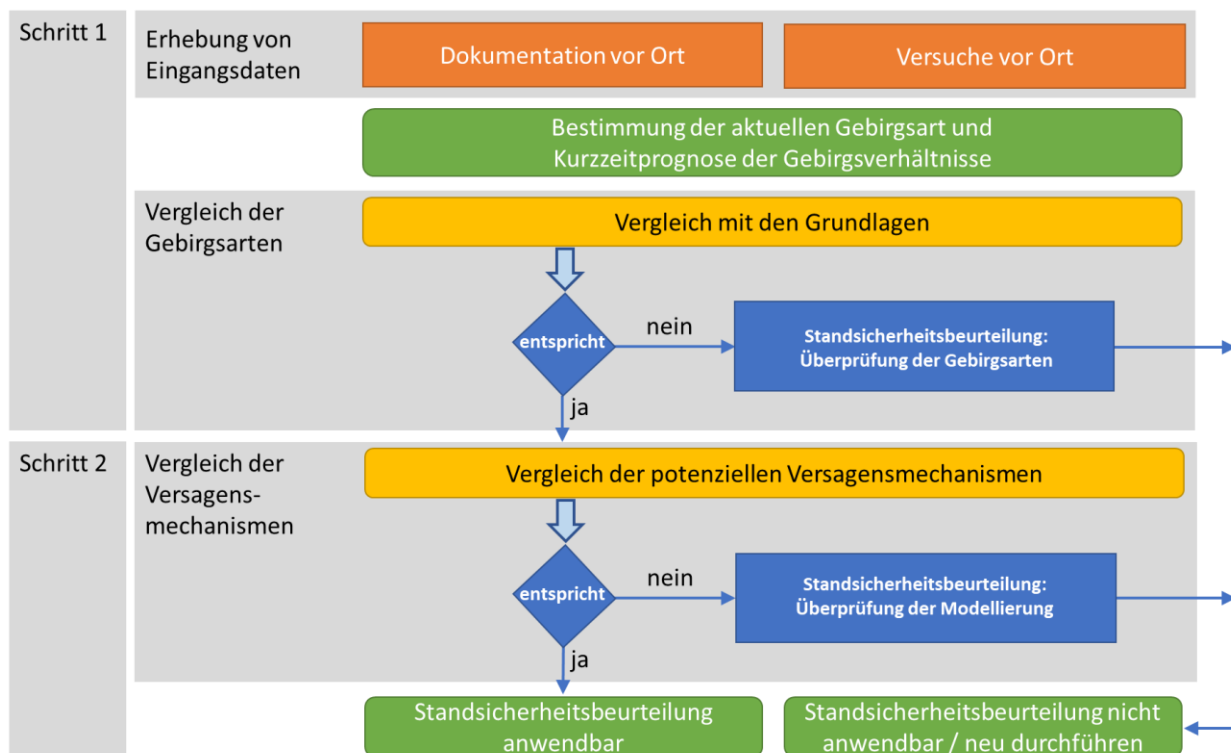


Abb. 21 Generelle Vorgehensweise für die Verifikation der Standsicherheitsbeurteilung von Felsböschungen während der Ausführung

8.2. Umgang mit zusätzlichen Informationen während der Ausführung

Da die Gebirgsverhältnisse vor Beginn der Abtrags- oder Gewinnungstätigkeit nicht vollständig bekannt sein können, ist während der Ausführung eine allfällige Fortschreibung der relevanten Parameter aus der Prognose und eine Verfeinerung des zu Grunde liegenden Modells erforderlich. Dabei ist vor allem die Validierung der Streuung der Gebirgskennwerte von besonderer Bedeutung. Für die Ermittlung dieser Bandbreite kann auch die fortlaufende Dokumentation von

Versagensereignissen sowohl im unkontrollierten Ausmaß als auch durch kontrolliertes Ablösen von Kluftkörpern (z.B. im Zuge des Sicherns von Böschungen) eine wesentliche Aussage liefern.

Vor allem bei der Standsicherheitsbeurteilung großer Gebirgsvolumina, im Speziellen in Kombination mit langfristiger Abtrags-/Gewinnungstätigkeit, ist bei der Bestimmung der Gebirgsparameter zu Beginn eine Prognoseunsicherheit zu berücksichtigen. In weiterer Folge gilt es folgende Punkte periodisch, nach projektspezifischer Notwendigkeit, auf deren Gültigkeit zu prüfen:

- Gebirgsarten bzw. gegebenenfalls neue Gebirgsarten
- Kennwerte der Gebirgsarten
- Überprüfung maßgeblicher Versagensmechanismen
- Auswirkung der Abtragstätigkeit auf das Gebirge und die daraus resultierenden Versagensmechanismen
- Definition mögliches übergeordnetes Gesamt-Versagen (siehe 6.4.2)

Speziell bei Abtrags- oder Gewinnungstätigkeiten von größerem Gebirgsvolumen kann eine planmäßige, aber auch unvorhergesehene Änderung der Richtung der Abtragstätigkeit erfolgen. Dies muss die Fortschreibung bzw. Ergänzung einer Standsicherheitsbeurteilung zur Folge haben.

8.3. Temporärer Abtrag

Für das unmittelbar abzutragende Gebirge ist eine Kurzzeitprognose zu erstellen, die als Entscheidungsgrundlage zum Erreichen der Schutzziele dient. Dies bezieht sich vorrangig auf die Sicherstellung des Arbeitnehmerschutzes.

Für die Häufigkeit der Evaluierung sind folgende Punkte maßgebend:

- Umfang der Abtrags- oder Gewinnungstätigkeit,
- Wechselhaftigkeit der Gebirgsverhältnisse,
- Projektspezifische Vorgaben.

8.4. Anwendung der Beobachtungsmethode

Speziell bei komplexen geotechnischen Verhältnissen oder der Beurteilung großer Gebirgsvolumina können rechnerische Nachweise der Standsicherheit an ihre Grenzen stoßen bzw. sind mit dementsprechend größerer Unsicherheit des Ergebnisses verbunden. Gemäß EC7 ist für diese Fälle auch die Beurteilung der Standsicherheit mittels Beobachtungsmethode zulässig. Dies beinhaltet auch die Berücksichtigung von empirischen Verfahren, die für die projektspezifischen Gegebenheiten entwickelt oder zweckmäßig anwendbar sind.

9. DOKUMENTATION DER STANDSICHERHEITSBEURTEILUNGEN

Unabhängig vom Beurteilungsverfahren sind in der Darstellung des Ergebnisses der Standsicherheitsbeurteilung folgende Punkte detailliert zu beschreiben:

- Art und wesentliche Details des gewählten Verfahrens
- Grafische Darstellung des Berechnungsmodells und der geometrischen Daten (Richtungen von Trennflächen etc.), der Ausgangssituation vor Herstellung der Böschung bzw. des neuen Abtrags und der Größe des geplanten Abtragsbereichs
- Eingangsparameter unter besonderer Berücksichtigung der Bandbreite
- Zeitdauer für das Bestehen einer Böschung und damit verbunden Anforderung an den Betrachtungszeitraum der Beurteilung
- Verifikation der Eingangsparameter und Ergebnisse im Zuge der Abtrags- oder Gewinnungstätigkeit
- Vergleichbarkeit des Ergebnisses bei Verwendung mehrerer Beurteilungsverfahren
- Falls eine unabhängige Überprüfung erforderlich ist, müssen die Eingangsdaten so beschrieben werden, dass eine solche Überprüfung ohne Rückfragen möglich ist
- Im Falle von unterschiedlichen Personen/Institutionen in den Phasen Planung, Ausführung und langfristige Beurteilung sind bei Übergabe von Unterlagen sämtliche Rohdaten und die daraus resultierende Aussage aller Beteiligten zu Verfügung zu stellen

Dokumentation der Berechnung:

Unabhängig von der Wahl des Verfahrens müssen die Eingangsparameter, die Annahmen, die Berechnungsschritte und das Ergebnis für allfällige Überprüfungen nachvollziehbar dokumentiert werden. In der Felsmechanik ist die Beurteilung der Aussagekraft der Standsicherheitsuntersuchung mittels Vergleiches mehrerer Verfahren in vielen Fällen sinnvoll.

10. BEISPIELE

10.1. Beispiel 1: Tagebau mit geringer Abbaumenge

Kurzbeschreibung

In einem Steinbruch in alpiner Lage werden <100.000 to Dolomit pro Jahr für die Erzeugung von Zuschlagsstoffen gewonnen. Der Betrieb besteht seit mehr als 50 Jahren und es sind bis dato keine Versagensereignisse von Böschungen aufgetreten. Das in Abbau befindliche Böschungssystem beträgt ca. 50 m, der genehmigte Endzustand sieht eine Gesamt-Wandhöhe > 100 m vor.

Die Vorgaben zur Standsicherheitsbeurteilung wurden im Laufe der Jahre durch die zuständige Behörde (mit beigezogenen Geologischen Sachverständigen) in mehreren Bescheiden beschrieben und auch weiter konkretisiert. Dem Betrieb wurde vorgeschrieben, eine geologische Bauaufsicht namhaft zu machen, die jährlich einen Bericht über die Erfüllung der Bescheidaufgaben zu übermitteln hat. Dies wird im beschriebenen Fall als Vorgehen gemäß Beobachtungsmethode angesehen.

Anforderungen an die Standsicherheitsbeurteilung

Auf Basis der für diese Lithologie lokal und generell in Österreich umfangreichen Erfahrungen in Bezug auf die gebirgsmechanischen Kennwerte wurden die Tagbauzuschnittsparameter im Vorfeld der Einreichung abgestimmt. Die Ermittlung der Gesamtstandsicherheit für die jeweilige Dauer der Genehmigung wurde mittels empirischer und kinematischer Verfahren durchgeführt.

Beurteilung während der Ausführung

Durch die geologische Bauaufsicht erfolgt jeweils vor Abbaubeginn im Frühjahr gemeinsam mit der fachkundigen Leitung gemäß TAV eine Befahrung des Betriebes zur Evaluierung der geogenen Gefahrenbereiche hinsichtlich des Arbeitnehmerschutzes. Weiter erfolgt je nach Abbaufortschritt die laufende Dokumentation des Trennflächengefüges sowie der gebirgsmechanisch relevanten Parameter (im Wesentlichen lokale Verkarstung) und Fortschreibung der langfristigen Standsicherheitsbeurteilung.

10.2. Beispiel 2: Tagebau mit großer Abbaumenge

Kurzbeschreibung

In einem Steinbruch werden >1 Mio. Tonnen Kalkstein im Jahr gewonnen. Der Betrieb besteht seit mehr als 30 Jahren, die genehmigte Abbaumenge beträgt >20 Mio. Tonnen. Die große Abbaumenge, unterschiedliche Abbaurichtungen, die große Wandhöhe im Endzustand und die stark variierenden möglichen Versagensmechanismen stellen einen hohen Anspruch an die geotechnische Betreuung (interdisziplinär und langfristig). Seitens der Behörde wurden konkrete Vorgaben an die Standsicherheitsbeurteilung der temporären Böschungen als auch des Endzustands gestellt.

Gemäß MinroG ist Rohstoff in einer Lagerstätte möglichst Ressourcen-effizient zu gewinnen. Dies bedeutet im Festgesteinstagebau ein möglichst hohe Generalneigung. Aufgrund der großen Anzahl der Gewinnungsbetriebe liegen umfangreiche Kenntnisse über die möglichen Tagbauzuschnitte für die unterschiedlichsten Lithologien in Österreich vor. Lokale Einflüsse (z.B. Bergwasser, Verwitterungsanfälligkeit, ...) werden im Zuge der Erkundung, vielmehr jedoch über die laufende geologisch/geotechnische Betreuung erfasst, evaluiert und in die Fortschreibung des Gebirgsmodells eingearbeitet.

Anforderungen an die Standsicherheitsbeurteilung - Beurteilung der Gesamtstandsicherheit

Aufgrund der großen Abbaukubatur und der Prognose der Standsicherheit für ein sehr großes noch abzutragendes Gebirgsvolumen ist eine Standsicherheitsbeurteilung generell mit einer höheren Unsicherheit verbunden. Die Wahl des Beurteilungsverfahrens ist daher nicht auf ein Verfahren beschränkt. In der Vergangenheit als auch zukünftig werden daher sowohl empirische als auch numerische Verfahren angewandt und die Ergebnisse gegenübergestellt und plausibilisiert, um die Unsicherheit der Ergebnisse (Sicherheitsfaktor) der Standsicherheitsbeurteilungen einzugrenzen.

Beurteilung während der Ausführung - Beurteilung der temporären Böschungen

Als Versagensmechanismen in den Böschungen können Keil- und Blockgleiten sowie Blockfallen auftreten. Markant ist die stark wechselnde Auswirkung von Trennflächen in Relation zur Abbauführung auf die Ausmaße der geogenen Gefahrenbereiche. Um dennoch nicht das maximale Ausmaß des Gefahrenbereichs über den gesamten Abbaubereich festlegen zu müssen, ist die Anwendung eines empirischen Verfahrens mit Vorliegen eines sofortigen Ergebnisses notwendig. Im konkreten Fall wurde das Beurteilungssystem B²ST für die lokalen Gegebenheiten kalibriert, um damit die laufende Evaluierung der beräumten Böschungen durchzuführen.

Da es sich um einen Betrieb mit Nutzungsdauer >50 Jahre handelt, kann weder über das Ende der Abbautätigkeit noch über eine mögliche Nachnutzung eine Aussage getroffen werden. Der Betrieb wird seit Beginn extern geologisch betreut. Im Zuge der laufenden Genehmigungsverfahren sind die geologisch-geotechnischen Verhältnisse gemäß den gültigen Regelwerken zu beschreiben und den Einreichunterlagen beizulegen. Darin enthalten sind die mittelfristig zu erwartenden geogenen Gefahrenbereiche und die Auswirkungen auf die Abbautätigkeit mit den vorhandenen Abbau-Geräten.

Durch den Betrieb wurde eine Beurteilung der Gesamtstandsicherheit über mehrere Methoden (empirisch und numerisch) durchgeführt, um bei möglichst steiler Generalneigung die Vorgabe der ressourcenschonenden Nutzung zu erfüllen.

10.3. Beispiel 3: Einschnitt in Fels

Kurzbeschreibung

Für ein öffentliches Verkehrsprojekt ist aufgrund der topographischen Verhältnisse ein Einschnitt in Fels parallel zu einem Infrastrukturbauwerk mit einer Länge von ca. 100 m und einer Höhe von bis zu 10 m nötig. Die Felsböschung des Einschnitts ist für eine Nutzung von mehreren Jahrzehnten ausgelegt.

Die Planung erfolgt durch einen vom Bauherrn beauftragten Fachplaner. Im Rahmen der Planung wird eine geologisch-geotechnische Erkundung durchgeführt.

Der Bau erfolgt nach behördlicher Baugenehmigung durch eine extern beauftragte Baufirma. Die Standsicherheit der temporären Abbauböschungen obliegt der ausführenden Baufirma und wurde durch den Auftraggeber nicht geplant. Bei der Bauausführung wird das Gebirge laufend geologisch-geotechnisch dokumentiert. Die Stützmittel werden auf Grundlage der angetroffenen Baugrundverhältnisse und der Planung vor Ort festgelegt.

Anforderungen an die Standsicherheitsbeurteilung - Beurteilung der Gesamtstandsicherheit

Die Erkundung erfolgt durch geologische Geländearbeit (Kartierung), Schurfe, Kernbohrungen und Laborversuche. Der Baugrund wird in Gebirgsarten unterteilt und insbesondere das Trennflächengefüge baugeologisch und geomechanisch beschrieben.

Die Standsicherheitsbeurteilung der Endböschung erfolgt auf Grundlage der Vorgaben des EC7. Für die Endböschung wurden die möglichen Versagensmechanismen, in diesem Fall Blockgleiten, planares Gleiten und Kippen untersucht, wobei das Blockgleiten als dominierender Versagensmechanismus identifiziert wird. Mit der Software UnWedge und SWedge werden probabilistische Analysen auf Grundlage wahrscheinlichkeitsverteilter Eingangskennwerte (Trennflächenorientierung, Reibungswinkel, Persistenz) durchgeführt. Eine Monte-Carlo-Simulation liefert eine Verteilung der Sicherheitsfaktoren für die jeweiligen Kluftkörpergeometrien.

Auf dieser Grundlage wurden für unterschiedliche Böschungsabschnitte entsprechende Maßnahmen geplant, die neben den Standsicherheitsanforderungen auch betriebliche und umweltrelevante Aspekte berücksichtigen. Das Planungsergebnis ist eine Zuordnung von nötigen Maßnahmen für verschiedene Abschnitte der Felsböschung in Abhängigkeit von den Gebirgsarten, den Versagensmechanismen und den darauf aufbauenden Standsicherheitsuntersuchungen.

Beurteilung während der Ausführung - Beurteilung der Endböschung

Der Felsabtrag erfolgt durch Sprengungen. Die Endböschung wird mit gebirgsschonenden Abschersprengungen (Pre-Splitting) hergestellt. Während des Abtrags der Böschung (temporärer Abtrag und Endböschung) erfolgt eine kontinuierliche Dokumentation der geologisch-geotechnischen Verhältnisse durch einen Geologen vor Ort. Auf Grundlage der tatsächlich angetroffenen Gebirgsarten wird durch einen Geotechniker vor Ort die Festlegung der bautechnischen Maßnahmen auf Grundlage der Planungsvorgaben festgelegt. Im Fall von Abweichungen, die in der Planung nicht vorgesehen sind, erfolgt umgehend eine Weiterführung der Planung unter Federführung durch den Geotechniker vor Ort.

Die Verifikation der Standsicherheit erfolgt durch eine kontinuierliche messtechnische Überwachung entsprechend vorab festgelegter Vorgaben.

Für detaillierte Informationen zu diesem Beispiel siehe Purucker et al. 2024.

10.4. Beispiel 4: Talflanke

Kurzbeschreibung

Aufgrund eines Felssturzes mit einem Abbruchvolumen von ca. 120.000 m³ ist die Standsicherheit einer alpinen ca. 500 m hohen Talflanke zu beurteilen und das Volumen weiterer potenzieller Abbrüche zu bestimmen.

Die Talflanke wird von den Bündner Schiefern der Matreier Zone aufgebaut. Lithologisch besteht die Bündner Schiefer Abfolge hauptsächlich aus Phylliten, Graphitphylliten und Kalkglimmerschiefer, untergeordnet auch aus Quarziten und Marmoren (Töchterle, 2011). Das anstehende Gebirge ist stark verfaltet, geklüftet und oberflächlich verwittert.

Der Versagensmechanismus des Abbruchereignisses war Keilversagen, wobei der Felskeil eine Höhe von 150 m aufweist.

Anforderungen an die Standsicherheitsbeurteilung - Beurteilung der Gesamtstandsicherheit

Die ingenieurgeologische Geländeaufnahme zur Ermittlung der Gebirgsarten und des Trennflächengefüges erfolgte sowohl durch Begehungen als auch durch UAV-Befliegungen (Drohne) der unzugänglichen Wandflächen. Ziel der UAV-Befliegungen bzw. des daraus abgeleiteten digitalen Höhenmodells war die Auswertung der an der Oberfläche ausstreichenden Trennflächen. Basierend auf diesen Ausstrichlinien wurden die zugehörigen Flächen geostatistisch modelliert. Darüber hinaus standen Labordaten zu Gesteinskennwerten der Bündner Schiefer seitens der Brenner Basistunnelgesellschaft zur Verfügung.

Zur Berücksichtigung des beobachteten trennflächendominierten Versagens erfolgte eine statistische Beschreibung des Trennflächensystems durch ein Discrete Fracture Network (DFN). Die Beurteilung der Standsicherheit wurde sowohl mittels einer kontinuumsmechanischen numerischen Analyse unter Anwendung des Hoek-Brown Kriteriums als auch durch eine diskontinuumsmechanische Analyse mithilfe der Diskreten Elemente Methode (DEM) und des ermittelten DFNs durchgeführt. Die Ermittlung der erforderlichen Modellparameter erfolgte auf Basis der Labordaten und der ingenieurgeologischen Geländeaufnahme mittels Rückrechnung des Abbruchereignisses (Keilversagen). Die Berechnung des Ausnutzungsgrades mithilfe der rückgerechneten Parameter erfolgte entsprechend der Vorgaben des EC7. Sowohl die diskontinuumsmechanische als auch die kontinuumsmechanische Analyse zeigen, dass sich Teile der Talflanke nahe dem Grenzgleichgewicht befinden ($\eta \approx 1$).

Laufende Beurteilung der Standsicherheit

Die Talflanke wird mithilfe eines Monitoringsystems überwacht. Auf Basis der numerischen Analysen wurden für ausgewählte Messpunkte Szenarien abgeleitet, bei denen weitere Untersuchungen und eventuell Evakuierungen durchgeführt werden müssen.

Für detaillierte Informationen zu diesem Beispiel siehe Illeditsch et al. 2022.

11. LITERATURVERZEICHNIS

1. Alejano L.R., Stockhausen H.W., Alonso E., Bastante F.G., Ramírez Oyanguren P. (2008). ROFRAQ: A statistics-based empirical method for assessing accident risk from rockfalls in quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45 (8): 1252-1272. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.003>
2. BAFU. (2016). Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608
3. Barton N., Bar N. (2015). Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. In: Schubert W, Kluckner A (eds) *Future development of rock mechanics; Proceedings of the ISRM regional symposium, Eurock 2015 and 64th geomechanics colloquium, Salzburg, 7–10 October 2015*, pp 157–162.
4. Bieniawski Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification: A complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York: John Wiley and Sons.
5. Cavers D.S. (1981). Simple methods to analyze buckling of rock slopes. *Rock Mechanics* 14, 87–104
6. Cundall P.A. (1971). A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. *Proceedings of the Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Society for Rock Mechanics (ISRM), France, II-8*.
7. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2014). Empfehlungen des Arbeitskreises "Numerik in der Geotechnik" – EANG
8. Falanésca M., Borio L., Picchio A., Peila D. (2010). QuaRRi: a new methodology for rockfall risk analysis and management in quarry exploitation. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, vol. 26(4), 149–161.
9. Goodman R.E., Bray J.W. (1976). Toppling of rock slopes. *Proc. Conf. Rock Engineering for foundations and slopes, Vol. 2*, pp. 201-234
10. Goodman R. E., Shi G. H. (1985). *Block theory and its applications to rock engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
11. Gußmann P. (1988). KEM (Kinematical Element Method) in geomechanics. *Proc. 6th Congr. Numerical Methods in Geomechanics. Innsbruck, 1988*, pp. 823–828
12. Hack R. (1997). *Slope stability probability classification, SSPC, 2nd edn. ITC, Enschede, The Netherlands*, 258 pp.
13. Harrison J. P., Burbaum U., Lamas L., Spross J., Stille H. (2023). Felsbauplanung mit dem geotechnischen Werkzeugkasten von morgen: Perspektiven der Entwicklung der dritten Generation des Eurocodes 2035. *Geomechanik und Tunnelbau*, 16., 5., 560-572.
14. Heiss C., Sammer G. (2024). Kurzfristige Standsicherheitsbeurteilung beim täglichen Betrieb von Tagbauböschungen. *Geomechanics and Tunneling*. 17., 5., 389-394.
15. Hoek E., Bray J. (1981) *Rock Slope Engineering*. 3rd edn, Inst. Mining and Metallurgy, London, UK
16. Hungr O, Evans S.G., Bovis M., Hutchinson J.N. (2001). Review of the classification of landslides of the flow type. *Environ Eng Geosci* VII: 221–238.
17. Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11:167-194 doi:10.1007/s10346-013-0436-y

18. Illeditsch M., Preh A., Sausgruber T. (2022). Challenges Assessing Rock Slope Stability Using the Strength Reduction Method with the Hoek–Brown Criterion on the Example of Vals (Tyrol/Austria). *Geosciences* 2022, 12(7), 255
19. Kieffer D.S. (1998). Rock slumping: A compound failure mode of jointed hard rock slopes. PhD Dissertation, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., University of California, Berkeley
20. Konietzky H. (2000). Numerische Simulation in der Geotechnik mittels expliziter Verfahren. Gelsenkirchen
21. Konietzky H., Lorenz K., Witter W. (2004). Simulation of landslide movements based on a multidisciplinary approach, *Felsbau*, 2, 23-32
22. Konietzky H. ebook No. 19: Factor-of-safety calculations und ebook No. 60: rock slope stability". www.geotechnics.webador.de
23. Mandl G. (1988). *Mechanics of tectonic faulting*. Elsevier, Amsterdam
24. Markland J.T. (1982). A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type failure is expected, Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 19. London: Imperial College Press.
25. Pande G., Beer G., Williams J. (1990). *Numerical Methods in Rock Mechanics*. Wiley.
26. Potts D., Axelsson K., Grande L., Schweiger H., Long M. (Eds.). (2002). *Guidelines for the use of advanced numerical analysis*. (1 ed.) Thomas Telford.
27. Poisel R., Eppensteiner W. (1988). Gang und Gehwerk einer Massenbewegung. Teil 1: Geomechanik des Systems "Hart auf Weich". *Felsbau* 6, 189–194
28. Poisel R., Preh A. (2004). Rock slope initial failure mechanisms and their mechanical models. *Felsbau* 22:40-45
29. Preh A. (2020). Falls originating from rock slopes – runout evaluation using numerical models. *Geomechanics and Tunnelling* 13: 59–73. doi: 10.1002/geot.201900075
30. Preh A. (2022). *Angewandte Felsmechanik. Skriptum zur Vorlesung, Ausgabe 2022*, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, TU Wien
31. Purucker M., Kaltenböck A., Pilgerstorfer T., Schnabl R. (2024). Probabilistische Analyse zur Standsicherheitsbeurteilung von hohen Felsböschungen am Projekt S10 Mühlviertler Schnellstraße – Abschnitt Freistadt Nord. *Geomechanics and Tunnelling* 17(2024)/5, 402-411,
32. Romana M., Tomás R., Serón J.B. (2015). Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. *ISRM Congress 2015 Proceedings - International Symposium on Rock Mechanics, Quebec, Canada, May 10 to 13 2015*. ISBN: 978-1-926872-25-4, 10 pp.
33. U.S. Army Corps of Engineers. (2003). *Slope Stability, Engineering and Design*, Engineer Manual.
34. Walter H., Labiouse V., Lamas L., Nuijten G., Spross J., Stille H. (2023). Felsbauplanung mit dem geotechnischen Werkzeugkasten von morgen: Eurocode 7 – Allgemeine Regeln (EN 1997-1:2024). *Geomechanik und Tunnelbau*. 16.,5., 491-509.
35. Wyllie D.C., Mah C. (2004). *Rock Slope Engineering: Fourth Edition (4th ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315274980>
36. Zangerl C. et al. (2008). Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. – *Geo.Alp*, 5: 1-51.

37. Zhao G. (2022). An overview of recent developments in numerical methods in the modelling of rock dynamic problems. Rock Dynamics: Progress and Prospect, Volume 1 (pp.56-66)
38. ÖNORM EN 1990 (2013). Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung. Austrian Standards Institute. Wien.
39. ÖNORM EN 1990-1. (Schlussentwurf 2022) Eurocode - Grundlagen der Planung von Tragwerken und von geotechnischen Bauwerken. Teil 1: Neue Bauwerke. Austrian Standards Institute. Wien.
40. ÖNORM EN 1990-2 (Schlussentwurf 2022) Eurocode - Grundlagen der Planung von Tragwerken und von geotechnischen Bauwerken. Teil 2: Bestandsbauwerke. Austrian Standards Institute. Wien.
41. ÖNORM EN 1997-1 (2014) Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln.- Austrian Standards Institute. Wien.
42. ÖNORM EN 1997-1 (Schlussentwurf 2024) Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln Austrian Standards Institute. Wien.
43. ÖNORM B 1997-1-1 (2021) Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen. Austrian Standards Institute. Wien.
44. ÖNORM B 1997-1-5 (2017) Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1-5: Gesamtstandsicherheit von Böschungen, Hängen und Geländesprüngen, Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen. Austrian Standards Institute. Wien.
45. ÖNORM EN 1997-2 (2010) Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds. Austrian Standards Institute. Wien.
46. ÖNORM EN 1997-2 (Schlussentwurf 2024) Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds. Austrian Standards Institute. Wien.
47. ÖNORM EN 1997-3 (Schlussentwurf 2024) Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 3: Geotechnische Bauwerke. Austrian Standards Institute. Wien.
48. ÖNORM EN ISO 14689 (2019) Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels. Austrian Standards Institute. Wien.
49. ÖNORM G 1200-3 (2020) Feste mineralische Rohstoffe Teil 3: Anforderungen an eine geologisch-lagerstättenkundliche Beschreibung. Austrian Standards Institute. Wien.
50. ÖGG (2023) Richtlinie Geotechnische Planung von Untertagebauten Zyklischer und Kontinuierlicher Vortrieb

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.	Generelle Vorgehensweise für die Standsicherheitsbeurteilung von Felsböschungen	6
Abb. 2.	Einfluss des betrachteten Maßstabs auf den maßgeblichen Versagensmechanismus	8
Abb. 3.	Darstellung eines Hangkriechens (Poisel & Preh 2004).....	9
Abb. 4.	Knickbandsackung (Kieffer 1998).....	9
Abb. 5.	Ablösen von einzelnen Kluftkörpern und die Darstellung im Lagenkugeldiagramm (Preh 2020)	10
Abb. 6	Blockgleiten entlang der Schichtung (Foto G. Koch)	11
Abb. 7	Keilgleiten kleinmaßstäblich durch zwei wiederkehrende Trennflächensysteme (Foto G. Koch)	11
Abb. 8	Keilgleiten großmaßstäblich, Bergsturz von Val Pola (Bormio) (Foto A. Preh)	12
Abb. 9	Blockkippen (Goodman & Bray 1976)	13
Abb. 10	Blockkippen (Foto S. Bauer)	13
Abb. 11	Biegekippen (Goodman & Bray 1976).....	14
Abb. 12	Ausknicken kleinmaßstäblich (Foto T. Stoxreiter)	15
Abb. 13	Gleiten von mehreren Teilkörpern auf einer polygonalen Gleitebene (nach Poisel & Preh 2004)	16
Abb. 14	Felsgleitung von Vajont (Foto A. Preh).....	16
Abb. 15	Rotationsgleiten als globales Böschungsversagen (NBC News).....	17
Abb. 16	Rotationsgleiten als globales Böschungsversagen - Hope Slide (Foto R. Poisel)	17
Abb. 17	Rückwärtsrotation (Kieffer 1998).....	18
Abb. 18	Rückwärtsrotation, Pardee dam (Foto S. Kieffer).....	18
Abb. 19	Hart auf Weich (Poisel & Eppensteiner 1988).....	19
Abb. 20	Hart auf Weich: Plassenkalk auf Haselgebirge, Westflanke Sandling (Foto G. Koch).....	19
Abb. 21	Generelle Vorgehensweise für die Verifikation der Standsicherheitsbeurteilung von Felsböschungen während der Ausführung.....	28

ANHANG 1: ÜBERSICHT DER BEURTEILUNGSVERFAHREN

Kategorien Verfahren	Beurteilungsverfahren	maßgebender Versagensmechanismen	Beurteilungsmaßstab	Ergebnis	Ableitung Maßnahmen (Organisatorisch / Stützmittel)	Projektphasen	Referenz
Empirische Methoden	US Army Corps Design Charts	Keilgleiten, Rotationsgleiten	Böschungssystem	Zuschnittsparameter einer Böschung	nein / nein	Planung und Herstellung, Bewältigung von Naturgefahren	US Army Corps of Engineers 2003
	ROFRAQ	Blockkippen	Einzelböschung und Böschungssystem	Wahrscheinlichkeit für Blockfallen, Größe des Risikobereichs	nein / nein	Herstellung	Alejano 2008
	QuaRRi	Blockkippen	Einzelböschung	Wahrscheinlichkeit für Blockfallen, Größe des Risikobereichs	nein / nein	Herstellung	Falanesca 2010
	Slope Stability Rating SSR	Rotationsgleiten	Böschungssystem	Generalneigung	nein / nein	Planung und Herstellung	Bieniawski 1989
	Slope stability probability classification SSPC	Rotationsgleiten	Böschungssystem	Generalneigung	nein / nein	Planung und Herstellung	Hack 1997
	Q-Slope	Keilgleiten, Blockgleiten, Blockkippen, Rotationsgleiten	Böschungssystem	Zuschnittsparameter einer Böschung	nein / nein	Planung und Herstellung	Barton 2015
	SMR	Keilgleiten, Blockgleiten, Blockkippen	Böschungssystem	Zuschnittsparameter einer Böschung	nein / ja	Planung und Herstellung, Bewältigung von Naturgefahren	Romana 1985
	B ² ST	Keilgleiten, Blockgleiten, Blockkippen	Einzelböschung	Standsicherheit, allg. Risikopotential, Größe des Risikobereichs für Arbeitnehmerschutz	ja / nein	Herstellung	Heiss & Sammer 2024
Kinematische Analysen	Markland Test	Keilgleiten, Blockgleiten, Blockkippen	Einzelböschung und Böschungssystem	Standsicherheit/Sicherheitsfaktor	nein / nein	Planung	Markland 1972
Grenzgleichgewichtsverfahren	Keilgleiten, Blockgleiten	Keilgleiten, Blockgleiten	Einzelböschung und Böschungssystem	Standsicherheit/Sicherheitsfaktor	nein / ja	Planung und Herstellung, Bewältigung von Naturgefahren	
	Goodman & Bray	Blockkippen	Einzelböschung und Böschungssystem	Standsicherheit/Sicherheitsfaktor	nein / ja	Planung und Herstellung, Bewältigung von Naturgefahren	Goodman & Bray 1976
	Lamellenverfahren	Rotationsgleiten, Gleiten entlang einer polygonalen Gleitfläche	Einzelböschung und Böschungssystem	Standsicherheit/Sicherheitsfaktor	nein / ja	Planung und Herstellung, Bewältigung von Naturgefahren	BAFU 2016 Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. 2014 Potts 2002
Numerische Verfahren	Diskrete Elemente Methode	Keilgleiten, Blockgleiten, Blockkippen, Rückwärtsrotation, Knickbandsackung, Biegekippen	Einzelböschung und Böschungssystem	Standsicherheit/Sicherheitsfaktor	nein / ja	Planung und Herstellung, Bewältigung von Naturgefahren	Zhao 2022
	Finite Elemente Methode	Rotationsgleiten, Hangkriechen	Einzelböschung und Böschungssystem	Standsicherheit/Sicherheitsfaktor	nein / ja	Planung und Herstellung, Bewältigung von Naturgefahren	

AUSTRIAN
SOCIETY FOR
GEOMECHANICS

ÖSTERREICHISCHE
GESELLSCHAFT FÜR
GEOMECHANIK

Innsbrucker Bundesstraße 67
5020 Salzburg, Austria

Tel.: +43 662 875519
H.: www.OEGG.at
E.: Salzburg@OEGG.at