



Stabilitätsuntersuchungen an einer geklüfteten Felsböschung mit LiDAR und der Finite Element Methode

Jie Song¹, Tomás M. Fernández Steeger¹, Hui Hu¹, Rafiq Azzam¹

¹ Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

In geklüfteten Gebirgsbereichen wird das mechanische Verhalten des Gebirges stark durch sein dominantes Trennflächensystem beeinflusst. In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Ermittlung der Trennflächenraumlage nach dem Fuzzy-Clustering-Kriterium mithilfe von LiDAR (Light Detection And Ranging) für die Untersuchung der Standsicherheit an geklüfteten Felsböschung vorgestellt. Es wird dann durch stereographische Projektion analysiert, wie die räumliche Beziehungen zwischen den daraus ermittelten Trennflächenraumlage und der Böschungfläche dargestellt werden können um das dominante Trennflächensystem voraussichtlich herauszufinden. Das dominante Trennflächensystem wird dann ins FE-Modell eingefügt um die potentielle Gleitfläche und den Sicherheitsfaktor einer Felsböschung mit der Scherfestigkeit-Reduktionstechnik zu ermitteln. Ausgehend von den Ergebnissen kann gezeigt werden, dass sich die potentielle Gleitfläche wegen der deutlich geringeren Scherfestigkeit parallel zum Trennflächengefüge ausgehend vom unteren Böschungsbereich entwickeln würde. Im Laufe der zunehmenden Deformation im unteren Bereich entsteht ein Zugversagen im oberen Böschungsbereich.

Schlüsselworte: Geklüftete Felsböschung; LiDAR; Fuzzy-Clustering-Methode; Stereographische Projektion; Scherfestigkeit-Reduktionstechnik

Abstract

Rock slope stability is subject to the dominant joint set. In the present work, the joint system of outcrop rock-mass is automatically recognized and categorized based on point cloud data captured by terrestrial laser scanner (TLS) and fuzzy clustering method (FCM). Geometric spatial information and spatial position of several major joint sets can then be acquired. To determine the dominant joint set which control rock slope stability, stereographic projection was applied to disclose the spatial position relationship between each joint set and slope surface. The potential slip surface and corresponding factor of safety can be calculated by using finite element method coupled with strength reduction technique. The analysis result demonstrates that the slip surface mainly goes along the direction of dominant joint and extends from bottom to top. Shear failure commonly takes place along the joint fissure at the lower part of rock slope, and due to the deformation at the lower part occurs a tensile fracture at the top part of rock slope additionally.

Keywords: Jointed rock slope; LiDAR; Fuzzy clustering method; Stereographic projection; Strength reduction technique

1 Einleitung

In geklüfteten Gebirgsbereichen wird das mechanische Verhalten des Gebirges stark durch das strukturelle Trennflächengefüge beeinflusst. Die Trennflächen sind dabei im Besonderen für die im Vergleich niedrigere Festigkeit und höhere Verformbarkeit des Gebirges an Felsböschungen verantwortlich. Entsprechend ist die Untersuchung des mechanischen Verhaltens von geklüfteten Felsböschungen eine wichtige und anspruchsvolle Fragestellung in der Ingenieurgeologie. Bei dieser Aufgabe sind die Informationen zu Trennflächen bzw. ihre Raumlage, sowie ihrer mechanischen Eigenschaften besonders wichtig für die Stabilitätsanalyse an geklüfteten Felsböschung. Die traditionelle Gefügemessung mit dem Geologenkompass kann nur auf exponierten, gut zugänglichen Felsoberflächen manuell durchgeführt werden. Wenn das Untersuchungsgebiet durch potentielle Hangrutschungen, Steinschlag oder Felssturz

gefährdet ist, ist es jedoch schwierig bzw. gefährlich die Messungen durchzuführen. Deswegen findet die berührungsfreien Gefügemessungen mit der LiDAR (Light Detection And Ranging)-Technik zunehmend Interesse. Mithilfe von LiDAR und Fuzzy-Clustering wurde die automatische Klassifizierung und statistische Erfassung der Trennflächensysteme einer geklüfteten Felsmasse realisiert (SLOB et al. 2005). Danach wurde diese Methode von LATO et al. (2009) durch eine Vergleichsanalyse zwischen den durch Fuzzy-Clustering ermittelten Ergebnissen und den durch Geologenkompass gemessenen Daten weiter optimiert.

Felsböschungen werden oft durch mehrere, in verschiedene Richtung streichende und unter verschiedenen Winkeln einfallende Trennflächen zerlegt. Deswegen ist der Aufbau eines Berechnungsmodells, das die tatsächlichen Strukturen der Felsböschung vollständig widerspiegelt, fast nicht möglich. Um diesem Problem zu begegnen kann das dominante Trennflächensystem, das die Stabilität der Felsbö-

schung kontrolliert, aus den prozessierten LiDAR-Daten extrahiert und stereographisch dargestellt werden. Dadurch kann dieses wenn auch nicht diskret doch als statistisch verteiltes Trennflächen- bzw. Festigkeitsgefüge in Modelle integriert werden.

In der numerische Modellierung ist die Scherfestigkeit-Reduktionstechnik für Stabilitätsanalysen von Boden- und Felsböschungen ein unverzichtbares Hilfsmittel geworden. So wurde z.B. die Standsicherheit an einer geklüfteten Felsböschung von ZHENG et al. (2003) mit der Scherfestigkeit-Reduktionstechnik untersucht. Dadurch konnten die potentielle Gleitfläche und der Sicherheitsfaktor bestimmt werden. Unter Berücksichtigung des Trennflächengefüges haben WU et al. (2006) die Stabilität einer geklüfteten Felsböschung mittels des in FLAC eingebauten ubiquitären Trennflächenmodells untersucht. Sie zeigten, dass das Trennflächensysteme nicht nur die Stabilität sondern auch den Versagensmechanismus maßgeblich beeinflusst.

In diesem Beitrag werden die wesentlichen technischen Schritte für Stabilitätsuntersuchungen an geklüfteten Felsböschungen mit der LiDAR-Technik, stereographischer Analyse und Finite-Element Simulation vorgestellt. Die Untersuchung findet in drei Phasen statt:

- Aufnahme des Trennflächengefüges der geklüfteten Felsböschung mithilfe von LiDAR;
- Bestimmung des dominanten Trennflächensystems mittels stereographischer Projektionsanalyse,
- Ermittlung der potentiellen Gleitfläche und des entsprechenden Sicherheitsfaktors durch Finite-Element Simulationen.

2 Untersuchungsgebiet

Die untersuchte Felsböschung ist die Nordwest-Wand eines ehemaligen Steinbruchs in Belgien nahe der deutschen Grenze. Der Steinbruch wird durch NW-SE und NE-SW verlaufende Störungen eingerahmt. In diesem Bereich sind Schichten der Bay-Bonnet Gruppe und der Jusleville Gruppe, die zum „Oberen Kohlenkalk“ gehören und sich dem Moliniacium zuordnen lassen, aufgeschlossen. Die Kalke sind mittel- bis dunkelgrau und mittel- bis grobkristallin. Die Mächtigkeit der Kalkbänke liegt zwischen 0,4m und wenigen Metern. Die Raumlage der Böschung beträgt $321^{\circ}/79^{\circ}$ und die Böschung wird durch ein flach einfallendes, mit kleinem Trennflächenabstand und zwei steil einfallende Trennflächensysteme zerlegt. Die Klüftigkeit beträgt 8-12. Die Trennflächen erscheinen relativ rau und ungefüllt. Das exponierte Gebirge erscheint meistens als angewittert und lokal mäßig verwittert.

2.1 LiDAR-Technik und ihre Wendung

Das System des terrestrischen Laserscanning (TLS) der Firma Optech ILRIS 3D wurde in diesem Beitrag für die Datenakquisition verwendet. Für die flächenhaften geographischen und geologischen Untersuchungen und Fragestellungen in mesoskalischen Bereich bietet das System von Optech mit einer Messgenauigkeit von unter 10mm und einer Reichweite von 800m bei einer Reflexivität von 20% gute Voraussetzungen. Der Messbereich beträgt horizontal und vertikal jeweils mit 40° und die maximale Auflösung beträgt 3mm. Unter umfassender Berücksichtigung der Messauflösung und -zeit wurde der gesamte Aufschluss aus einer Scanposition durch einen einzelnen Scan und nach Priorität definiertem Scanfenster mit einer Auflösung von 16,3mm vollständig erfasst. Der in Abb. 1 dargestellte rechteckige Teil gilt als den Scanbereich.



Abb. 1: Geklüftete Felsböschung im Kohlenkalk (Belgien)

Fig. 1: Rock jointed slope in carboniferous limestone (Belgium)



2.2 Punktwolken-Datenverarbeitung

Die Resultate solcher Laserscans sind die LiDAR-Rohdaten, die oft als 3D-Punktwolke mit den scannereigenen Koordinaten (X, Y, Z) bezeichnet werden. Die Datenaufbereitung der Punktwolke erfolgt mit dem Softwarepaket *Polyworks*. Abb. 2 zeigt die Punktwolke des unteren Ausschnitts der Felsböschung. Während der Datenaufbereitung werden Fragmente und nicht relevante Objekte aus der Punktwolke eliminiert, sodass die Qualität für die weiterführenden Analysen gewährleistet ist. Die dadurch entstandenen Lücken werden danach durch mathematische Interpolationsmethode gefüllt. Mithilfe der Delaunay-Triangulation wurde dann ein TIN (Triangulated Irregular Network)-Modell aus der behandelten Punktwolke erstellt. Aus dem TIN-Modell lassen sich drei Profilschnitte (a-b-c) von links nach rechts für die Modellierung der Böschung jeweils mit 10m Abstand ableiten (s. Abb. 3).

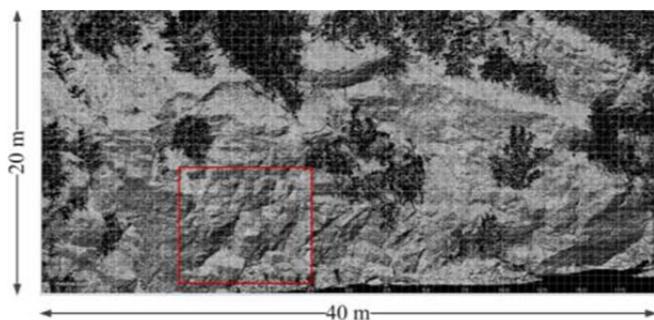


Abb. 2: Punktwolke des unteren Böschungsbereichs
Fig. 2: Point cloud data of the foot area of the slope

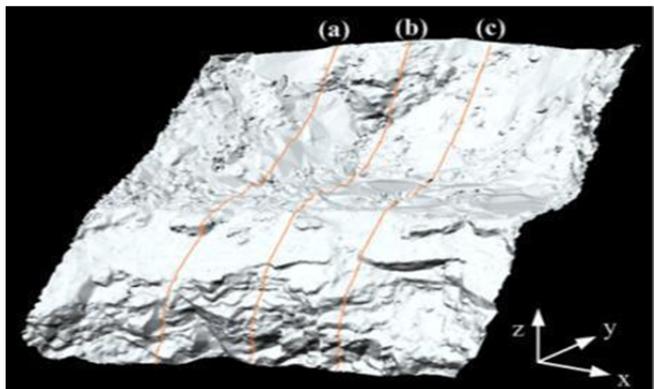


Abb. 3: Graphische Darstellung des Oberflächenmodells der Felsböschung (a, b, c: als ausgewählten Profilschnitte)

Fig. 3: The surface model of the rock slope (a, b, c: the three selected sections)

3 Automatische Klassifizierung des Trennflächengefüges

Unter Berücksichtigung der Datenverarbeitungseffizienz wurde nur der in Abb. 2 dargestellte rechteckige Ausschnitt der Punktwolke zur automatischen Klassifizierung der Trennflächensysteme der Felsböschung verwendet. Die verschiedenen Schritte bei der Untersuchung gliedern sich wie folgt:

- Rekonstruktion des Oberflächenmodells aufgrund der Punktwolke mit der Delaunay-Triangulation;

- Klassifizierung der Trennflächensysteme mithilfe der Fuzzy-K-Means-Clusteranalyse (HAMMAH & CURRAN 1998);
- Ermittlung des K-Werts nach dem Klassifizierungsvorgang in Bezug auf die Fischer-Verteilung (FISCHER 1953);
- Durchführung des Neu-Clusterings nach dem Entfernen der irrelevanten Randobjekte jedes Clusters zur Optimierung des Clustereffekts.

Ausgehend von den statistischen Ergebnissen ist ersichtlich, dass drei Haupttrennflächensysteme aus der Punktwolke ermittelt werden können. Ein flach nach NW einfallendes System (K1, grün), weist die Raumlage 326/34 auf. Des Weiteren tritt ein steil nach ESE einfallendes System (K2, orange) mit der Raumlage 116/61 und ein steil nach SSE einfallendes System (K3, blau) mit der mittleren Raumlage 170/71 auf. Die Fischer-K-Werte von K1, K2 und K3 betragen jeweils 96, 56 und 26. Das System K3 ist weniger stark ausgeprägt, die Trennflächenausbisse sind insgesamt kleiner und die Raumlagen dieser Trennflächen weist eine deutlich höhere Streuung als K1 und K2 auf. Deswegen ist der K-Wert von K3 relativ klein im Vergleich zu K1 und K2.

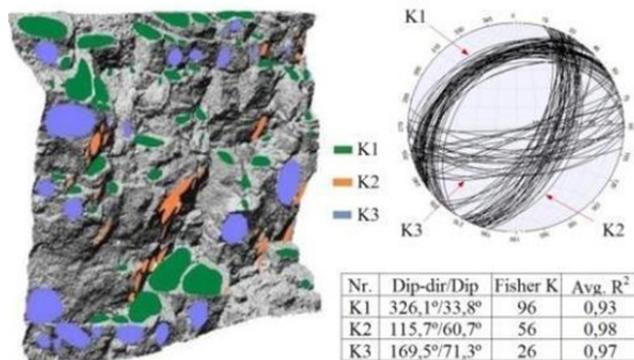


Abb. 4: Die Orientierung und stereographische Projektion des Trennflächengefüges

Fig. 4: The occurrence and stereographic projection of the rock joint sets

4 Wirksamkeit von Trennflächensystemen

Mithilfe der stereographischen Projektionsanalyse können die möglichen Versagensmechanismen der Felsböschung unter Einfluss von Trennflächensystemen abgeschätzt werden und somit das voraussichtlich dominante kinematische Trennflächensystem bestimmt werden. Aus Abb. 5 ist ersichtlich, dass die Projektionen der Trennflächensysteme K2, K3 als Großkreise gegenläufig zu dem des Großkreises der Böschung einfallen. Bis zu einem gewissen Grad sind die Kluftsysteme K2 und K3 eher als stabilisierend einzuschätzen, zumindest hinsichtlich Ihrer Einfallrichtung. Durch die Raumlage der Böschung im Bezug zu dem Trennflächensystem K1 ist ein potentielles ebenes Gleiten entlang von K1 möglich, da ihre Trennfläche ungefähr dieselbe Einfallrichtung wie die Böschung aufweist und flacher als diese einfällt. Die obige Analyse zeigt, dass das Trennflächensystem K1 eine dominierende Rolle auf die Böschungsstabilität spielt. K1 gilt somit als das dominante

Trennflächensystem der Böschung. Im Folgenden wurde die Böschungstabilität durch Finite-Element Simulation untersucht, um die Einflüsse des dominanten Trennflächensystems K1 auf die Versagensform und Lage der Gleitfuge sowie den Sicherheitsfaktor der Böschung zu beschreiben.

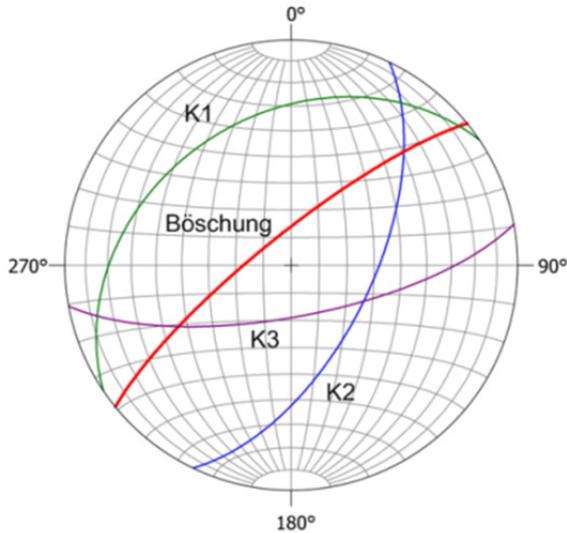


Abb. 5: Stereographische Projektion der Raumlage von Böschung und Haupttrennflächensystemen

Fig. 5: Stereographic projection of occurrences of the slope and the major joint sets

5 Numerische Modellierung

5.1 Modellbildung

Das in ABAQUS eingebaute ubiquitäre Trennflächenmodell wurde in diesem Beitrag zur Beschreibung des Einflusses von K1 auf die Böschungstabilität verwendet. Das ubiquitäre Trennflächenmodell besteht aus der Gesteinsmatrix und dem Trennflächensystem K1, deren physikalisch-mechanische Parametern in Tab. 1 aufgelistet sind. Die Trennflächen des Systems K1 verteilen sich mit einem durchschnittlichen Einfallswinkel $33,8^\circ$ parallel zueinander über die gesamte Böschung. In Abb. 6 wird das in Bezug auf Profilschnitt (a) aufgebaute Modell graphisch dargestellt. Die Ränder 1 und 2 sind freie Grenzen. Die Ränder 3 und 5 sind horizontal begrenzt. Am unteren Rand 4 ist die Verschiebung vertikal und horizontal eingeschränkt. Die Felsböschung unterliegt dem Eigengewicht, der statischen Belastung aus einer Auflast und dem statischen Wasserdruck am Rand 3. Das Modell wird durch 2493 viereckige Elementen mit 7674 Knoten in Form von CPE8R (quadratische, reduziert integrierte Elemente) frei diskretisiert.

Tab. 1: Physikalische-mechanische Parametern des Modells

Tab. 1: Physical and mechanical parameters of model

Angewitterter Kalkstein					Trennfläche		
c	φ	ρ	E	ν	c	φ	θ
[MPa]	[°]	[kg/m ³]	[MPa]	[-]	[KPa]	[°]	[°]
15	60	2690	70000	0,26	38	31	23

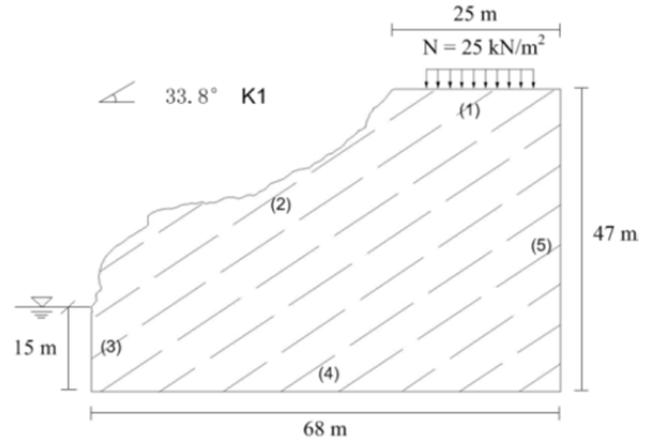


Abb. 6: Modell der Felsböschung unter dem Einfluss des dominantem Trennflächensystems K1 (Profilschnitt a)

Fig. 6: Rock slope model with influence of the dominant joint sets K1 (profile a)

5.2 Scherfestigkeit-Reduktionstechnik

Im ubiquitären Trennflächenmodell wurde nicht nur die Festigkeit der Gesteinsmatrix sondern auch der Trennfläche abgemindert. Die Festigkeitsparameter Kohäsion c , innerer Reibungswinkel φ und Dilatanzwinkel θ wurden mit einem Reduktionsfaktor F nach Gleichung (1) bis zum Erreichen des kritischen Versagenszustands schrittweise reduziert, sodass sich mehrere neue Reihen von c' , φ' und θ' ergeben, die als neue Materialparameter in der nächsten Berechnung eingesetzt werden. Elastizitätsmodul E und Poissonzahl ν wurden jedoch während der Scherfestigkeitsreduktion nicht reduziert.

$$c' = \frac{c}{F}$$

$$(\varphi + \theta)' = \arctan\left(\frac{1}{F} \tan(\varphi + \theta)\right) \quad (1)$$

Bei der Berechnung wurde das elasto-plastische Stoffmodell nach Mohr-Coulomb verwendet. Zusätzlich sollten zwei Kriterien für die Bestimmung des kritischen Versagenszustands eingehalten werden (HU et al. 2011):

- Die plastische Vergleichsdehnungszone (PEEQ-Manifestation in ABAQUS) verläuft durch die gesamte Böschung;
- Das Modell iteriert die Simulationen solange, bis das Konvergenzproblem auftritt und gleichzeitig ist das Zuwachsinkrement des Reduktionsfaktors kleiner gleich dem spezifisch definierten Wert ζ , hier 0,01.

5.3 Einfluss von Trennflächen auf die Böschungstabilität

Durch die Zunahme des Reduktionsfaktors bei der Simulation kann die schrittweise Entwicklungen der plastischen Vergleichsdehnung des Profilschnitts (a), beispielhaft aus Abb. 7 entnommen werden. Die plastische Vergleichsdehnung bringt de facto die Dehnungslokalisierung des Modells zum Ausdruck, bis sich ein beobachtbares Deformationsband entwickelt. Deswegen kann die plastische Vergleichs-

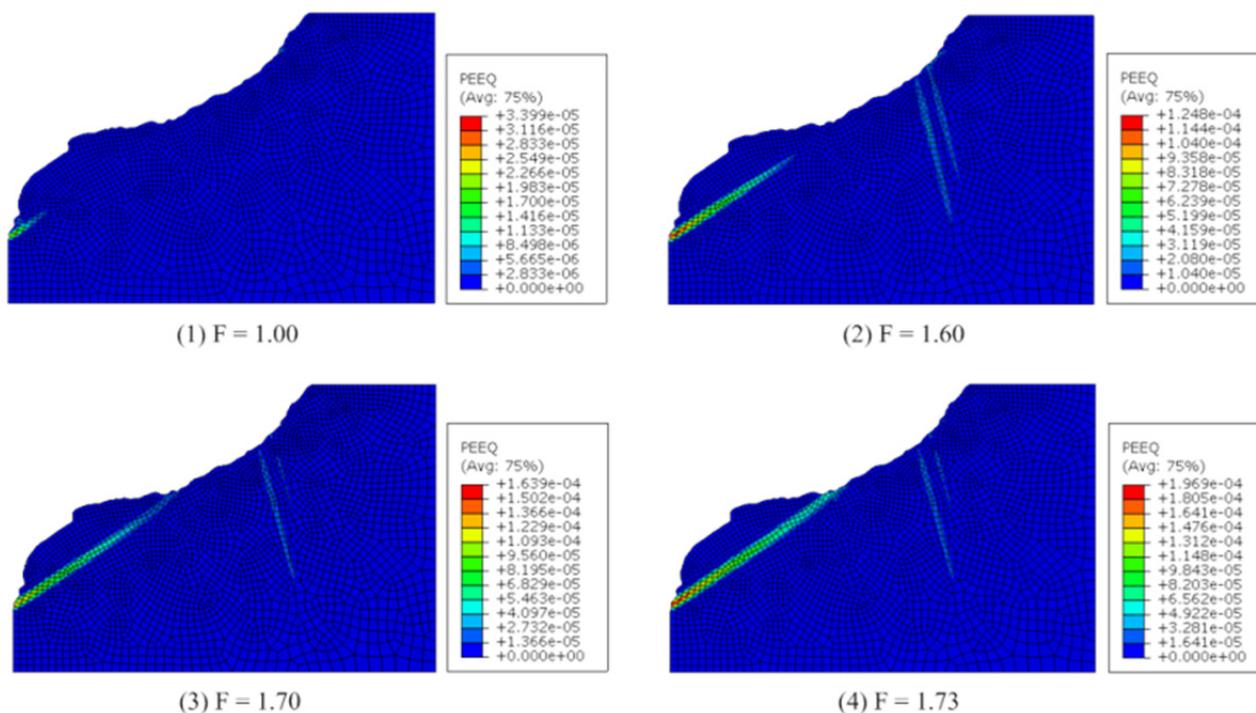


Abb. 7: Entwicklung der plastischen Vergleichsdehnung im Laufe der Zunahme des Reduktionsfaktors

Fig. 7: Extension of the equivalent plastic strain zone with increase of reduction coefficient

dehnungszone auch mit der Lage und Form der potentiellen Gleitfläche gleichgesetzt werden. Das Versagen tritt wegen der niedrigeren Festigkeit der Trennflächen in erster Linie im unteren Böschungsbereich auf. Mit der zunehmenden Scherfestigkeitsreduktion der Gesteinsmatrix und der Trennflächen kommt es zu größeren Spannungsumlagerungen und die Deformation propagiert über die gesamte Böschung. Weiterhin führen die großen Deformationen im unteren Böschungsbereich zu einem Zugversagen im oberen Böschungsbereich (s. Abb. 7).

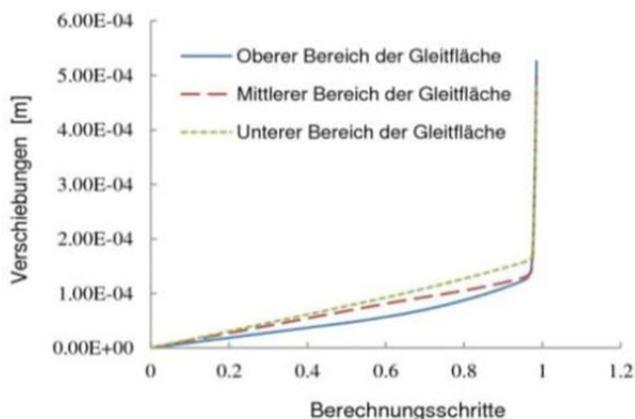


Abb. 8: Die Kurve der Verschiebungen der potentiellen Gleitfläche vs. Berechnungsschritte

Fig. 8: The curve of the displacement of the potential slip surface vs. calculation step

Beim Reduktionsfaktor 1,73 verläuft die plastische Vergleichsdehnungszone durch die gesamte Böschung und gleichzeitig weist die Verschiebung der Gleitfläche ein rasantes Wachstum im Grenzbereich auf (s. Abb. 8), d.h., dass der kritischen Versagenszustand der Böschung erreicht bei der entsprechenden Reduktion erreicht würde. Aus den Simulationen ist ersichtlich, dass im kritischen Versagenszustand nur eine Gleitfläche auf tritt, deren Neigung im Einklang mit dem Einfallswinkel des Trennflächensystems K1 steht. Das weist darauf hin, dass die Raumlage und die mechanischen Eigenschaften der Trennflächen die potentielle Lage und Form der Gleitfläche maßgeblich beeinflussen.

5.4 Sicherheitsfaktor der Felsböschung

Ausgehend von den Berechnungsergebnissen sehen die Lage und die Form der potentiellen Gleitflächen aller drei Profilschnitte identisch aus, was bis zu einem gewissen Ausmaß den möglichen 3D Versagensmechanismus der Felsböschung reflektieren kann. Die Profilschnitte (a), (b) und (c) haben jeweils einen Sicherheitsfaktor von 1,73; 1,57 und 1,53. Unter gleichen Initial- und Randbedingungen hat Profilschnitt (a) jedoch einen höheren Sicherheitsfaktor. Eine mögliche Ursache ist die unterschiedliche Geometrie der Profilschnitte. Die Geländeoberkante des Profilschnitts (a) sieht im Vergleich zu (b) und (c) nicht so steil aus. Dadurch hat Profilschnitt (a) einen kleineren potentiellen Gleitkörper bzw. Last, was sich auf die Normalspannung auf die Trennfläche des Profilschnitts (a) auswirkt. Hierdurch hat er aufgrund der Trennflächenrauigkeit einen höheren Sicherheitsbeiwert.

6 Schlussfolgerungen

In Bezug auf LiDAR-Technik, stereographische Projektion und Finite-Element Simulation wurde ein sinnvoller und reproduzierbarer technischer Arbeitsablauf für die Untersuchung der Standsicherheit an geklüfteten Felsböschung vorgestellt.

- Anhand der Punktwolke aus Laserscans wird die Raumlage der Trennflächen durch Fuzzy-Clustering-Analyse automatisch klassifiziert und statistisch erfasst. Diese Methode weist eine niedrigere Messungszeit, -aufwand und -risiko als die traditionelle Messung mit dem Geologenkompass auf;
- Mithilfe von stereographischer Projektion werden die räumlichen Beziehungen zwischen Böschung und mehrerer Trennflächensystemen untersucht. Dadurch konnte das kinematisch relevante dominante Trennflächensystem identifiziert werden. Dadurch wird eine gerichtete Modellierung unter Berücksichtigung der für den Versagensmechanismus relevanten Trennflächensysteme möglich.
- Durch die Finite-Element Simulation wird die potentielle Gleitfläche und der Sicherheitsfaktor der geklüfteten Felsböschung bestimmt. Ausgehend von den Simulationsergebnissen wird deutlich, dass das dominante Trennflächensystem K1 nicht nur die Stabilität sondern auch den Versagensmechanismus maßgeblich beeinflusst.

Literatur

- FISHER R. (1953): Dispersion on a sphere. – Proceedings of the Royal Society of London, 1953.
- GRIFFITHS, D.V., LANE, P.A. (1999): Slope stability analysis by finite elements. – *Geotechnique*, **49**: 387-403.
- HAMMAH, R.E., CURRAN, J.H. (1998): Fuzzy cluster algorithm for the automatic identification of joints sets. – *Int J Rock Mech Min Sci*, **35**: 889-905.
- HU, H., FERNANDEZ-STEEGER, T.M., DONG, M., AZZAM, R. (2011): LiDAR-based 3D FEM geological simulation and landslide stability analysis. – Proceedings of the 19th International Conference on Geoinformatics, Shanghai (China), June 2011.
- LATO, M., DIEDERICHS, M.S., HUTCHINSON, D.J., HARRAP, R. (2009): Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. – *Int J Rock Mech Min Sci*, **46**: 194-199.
- SLOB, S., HACK, R., VAN, K.B., TURNER, K., KEMENY, J. (2005): A method for automated discontinuity analysis of rock slopes with 3D laser scanning. – Proceedings of the 84th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., January 2005.
- WU, S.C., JIN, A.B., GAO, Y.T. (2006): Slope stability analysis by strength reduction method based on ubiquitous-joint model. – *Rock and Soil Mechanics*, **27**: 537-542.
- ZHENG, Y.R., ZHAO, S.Y., DENG, W.D. (2003): Numerical simulation on failure mechanism of rock slope by strength reduction FEM. – *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **22**: 1 943-1 952.