



TUBAF

Die Ressourcenuniversität.
Seit 1765.



Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau

Institut für Geotechnik

Professor Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky

TU Bergakademie Freiberg · 09596 Freiberg

Schiefergruben Magog GmbH & Co. KG
Alter Bahnhof 9
57392 Schmallenberg

Bearbeiterin: Prof. Dr. habil. Heinz Konietzky
Gebäude/Raum: HHB/102
Telefon: 03731 39-2519
E-Mail: Heinz.Konietzky@ifgt.tu-freiberg.de

Datum: 22.10.2025

Standicherheit der Schieferhalden der Firma Magog

Gezeichnet:

Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky

22.10.2025

1. Aufgabenstellung

Die Firma Magog betreibt an der Erdoberfläche Halden, die aus Schieferrückständen bestehen. Die Standsicherheit solcher Halden ist zu bewerten. Grundlage bilden Risswerke bzgl. der Halden, spezielle in-situ Versuche, Literaturwerte und darauf aufbauende numerische Berechnungen.

2. Datenbasis

Die Risswerke sowie ein digitales Geländemodell (DGM), siehe Abb. 1 - 4, dienen als geometrische Grundlage für die Erstellung des Berechnungsmodells. Abb. 1 zeigt die gesamte Halde in der Draufsicht. Abb. 2 zeigt einen Teil daraus, der Grundlage für die Modellgeometrie des numerischen Modells darstellt. Aus dem DGM wurden – wie in Abb. 3 gezeigt - die Haldenkonturen für drei ausgewählte Haldenböschungen ermittelt. Sie sind nahezu identisch, was aufgrund der Aufhaldungstechnologie auch nicht verwundert. Es bildet sich ein recht einheitlicher Böschungswinkel von maximal 36° - 37° (zum Teil etwas flacher) aus. Aus konservativer Sicht wird im Berechnungsmodell aber ein Böschungswinkel von 37° unterstellt.

Untertage wurde Haldenmaterial versuchsweise aufgehaldet bis in zu einer Höhe von 4 m, um einen stabilen Böschungswinkel von frischem, d.h. noch unverfestigten Material, zu erhalten (siehe Bild 4 und 5). Die dort gemessenen stabilen Böschungswinkel lagen zwischen 38.5 und 55.3 Grad, d.h. im Mittel bei etwa 47 Grad.



Abb. 3: Ermittlung der Haldengeometrie aus DGM der Magog (Magog, 2025)



Abb. 4: Halde untertage (Magog, 2025)



Abb. 5. Halde untertage (Magog, 2025)

3. Numerische Berechnungen

Für die numerischen berechnungen wird das Programm FLAC3D (Vers. 9.0) benutzt. Das Modell hat eine Höhe von 30 m, eine horizontale Erstreckung am unteren Modellrand von 70 m und bildet einen Böschungswinkel von 37° ab. An den seitlichen Rändern, dem Boden und dem hinteren Modellrand sind die Normalverschiebungen fixiert. Es wird eine Gravitation von $9,81 \text{ m/s}^2$. An der Böschungskante wird zusätzlich eine Verkehrslast von 35.6 kPa auf eine Fläche von 8 m^2 aufgebracht, was einem Fahrzeug mit Gesamtgewicht von etwa 28.5 t entspricht und damit das schwerste im Betrieb eingesetzte Fahrzeug (z.B. Sandvik LH 410) abdeckend berücksichtigt.

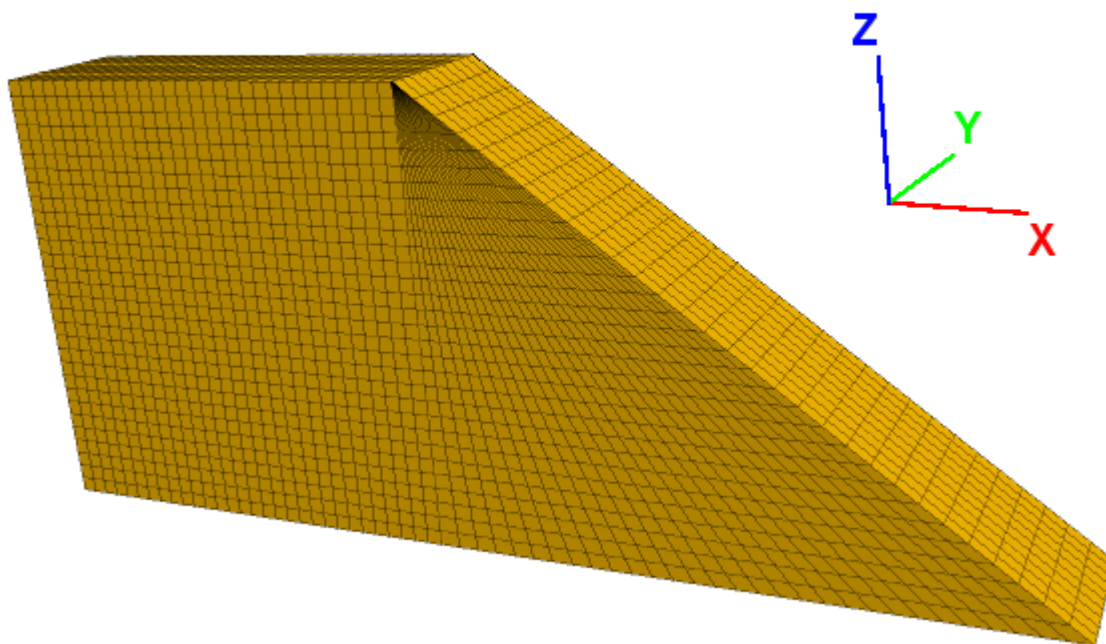


Abb. 4: Numerisches Berechnungsnetz

Für die Berechnungen wird das klassische Mohr-Coulomb-Materialgesetz verwendet. Die Materialparameter wurden einerseits aus Literaturdaten (Lazar et al., 2021; Dong et al., 2023; Rudra et al., 2024; Verma et al., 2017; Sujatono, 2023; Wichert, 2020), Anwendung

der Gebirgsklassifizierung (Roosbeh, 2025) sowie insbesondere aus den in-situ Versuchen bei Magog (siehe Kap. 2) abgeleitet und wie Tab. 1 gezeigt angesetzt.

Tab. 1: Modellparameter

Parameter	Wert	Anmerkung
Dichte [kg/m ³]	1800	geschätzt
E-Modul [GPa]	3	geschätzt, ohne signifikanten Einfluss
Querdehnzahl	0.35	geschätzt, ohne signifikanten Einfluss
Kohäsion [kPa]	0 / 1 / 10	3 Annahmen
Reibungswinkel [°]	47	Mittelwert aus in-situ Messungen
Dilatanzwinkel [°]	10	geschätzt, ohne großen Einfluss
Zugfestigkeit [MPa]	0	konservative Annahme

Während der Reibungswinkel in-situ nachgewiesen wurde, ist die Kohäsion nicht bestimmt worden. Daher wurden Rechnungen mit 4 Parameterkombinationen durchgeführt. Realistisch ist die Annahme eine Kohäsion von etwa 10 kPa (Literaturwerte reichen typischerweise von etwa 2 bis 500 kPa). Die Dichte wurde geschätzt, bewegt sich aber in einem engen Band mit kleinen lokalen Schwankungen aufgrund der Inhomogenität einer Halde.

Die numerischen Berechnungen enthalten 3 Phasen:

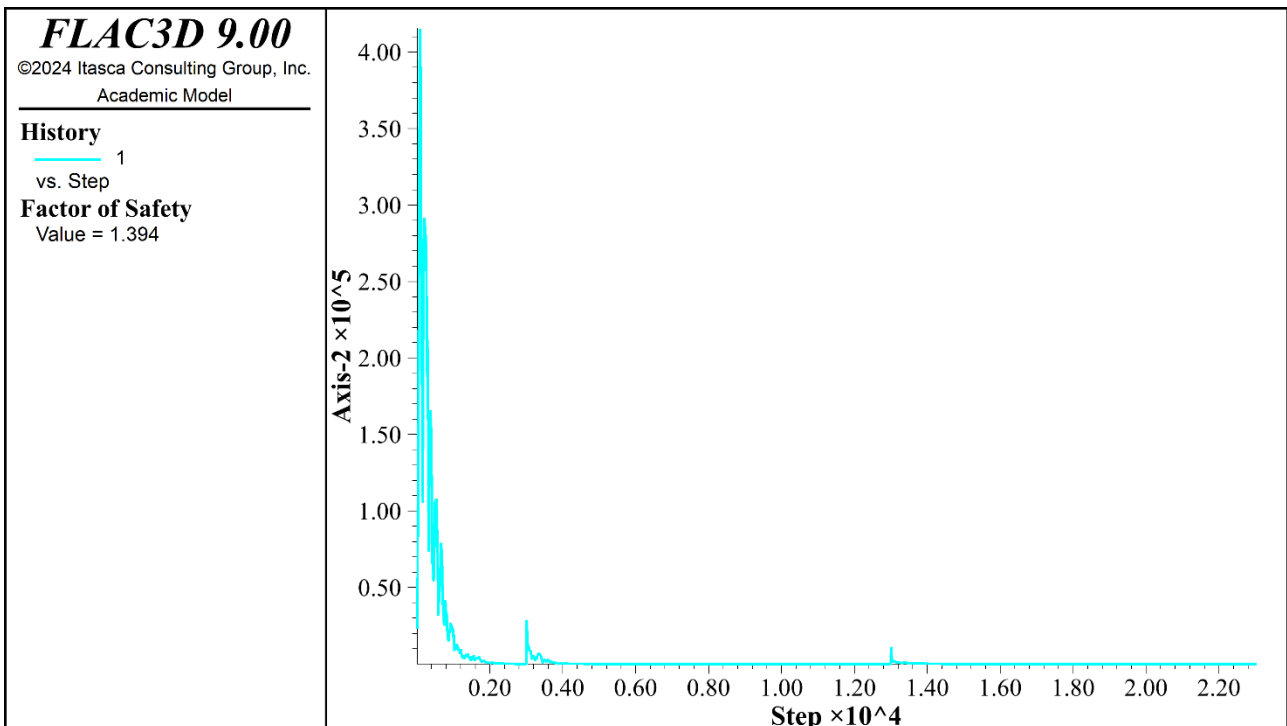
- (1) Herstellen des initialen Spannungszustandes durch Gravitationswirkung
- (2) Aufbringen der Verkehrslast am Böschungsrand (Fahrzeug)
- (3) Durchführen des $c-\phi-\sigma$ -Reduktionsverfahrens

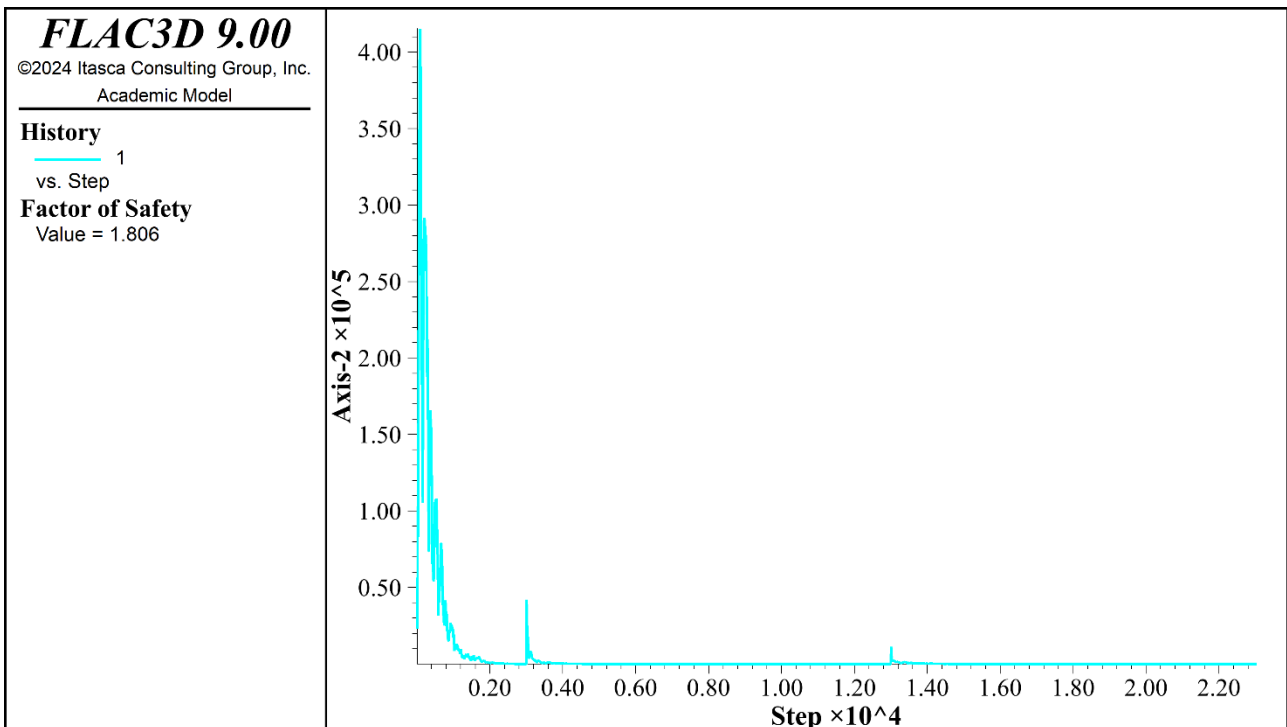
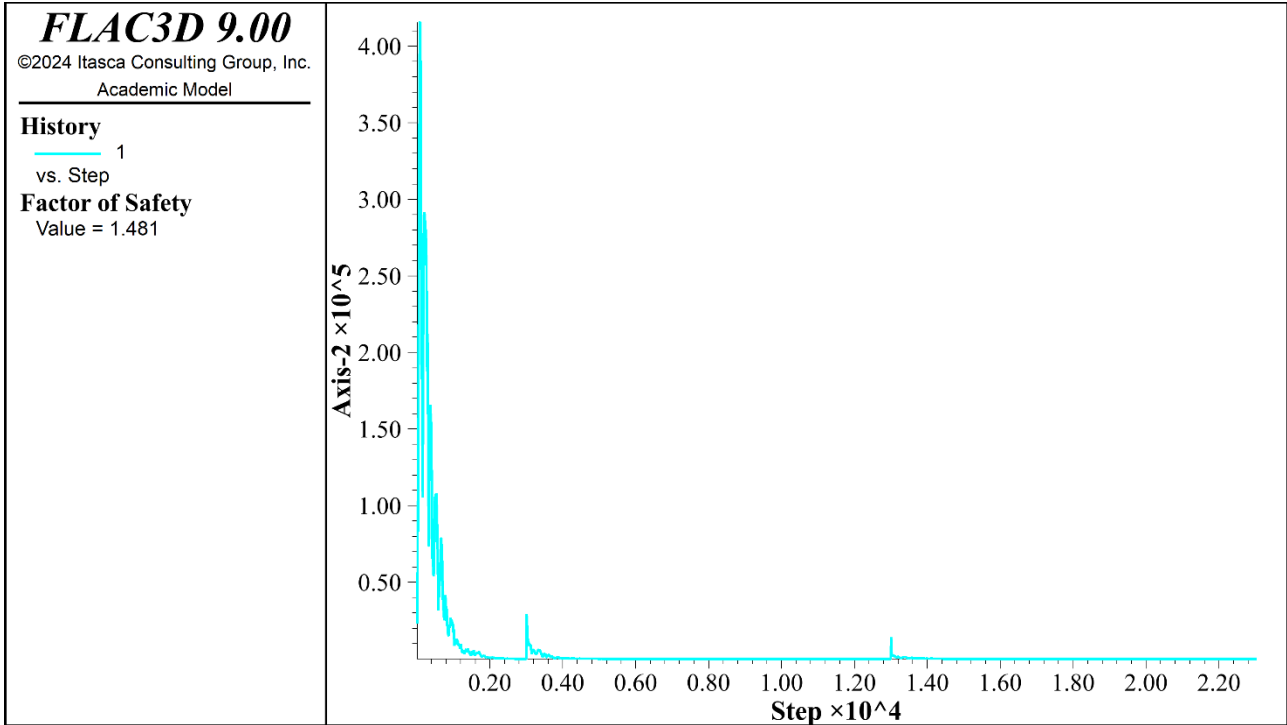
Die Standsicherheit wird mittels des $c-\phi-\sigma$ -Reduktionsverfahrens nachgewiesen. Dieses Verfahrens ist ein inzwischen in der Geotechnik und dem Bauingenieurwesen etabliertes Verfahren (EUROCODE-konform), um die Standsicherheit zu bewerten. Der ursprünglich aus der Bodenmechanik stammende Ansatz musste um die Zugfestigkeit erweitert werden,

um in der Felsmechanik angewendet zu werden. Nähere Erläuterungen und Anwendungen sind u.a. zu finden in Konietzky, 2022; Chakraborti, Konietzky & Walter 2012; Chakraborti, Konietzky & Otparlik 2012; Schmidt & Konietzky 2012 und Walter & Konietzky 2008. Der Reduktionsfaktor S entspricht im Übergang von Stabilität zu Instabilität dem Sicherheitswert (Stand sicherheitsfaktor):

$$S = RED = \frac{\tan\phi}{\tan\phi_{red}} = \frac{c}{c_{red}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{t,red}}$$

Die Iterationen zur Ermittlung des FOS auf Basis des c-φ-σt-Reduktionsverfahrens werden mit einem Iterationsintervall (Genauigkeit) von größer 0.1 durchgeführt.





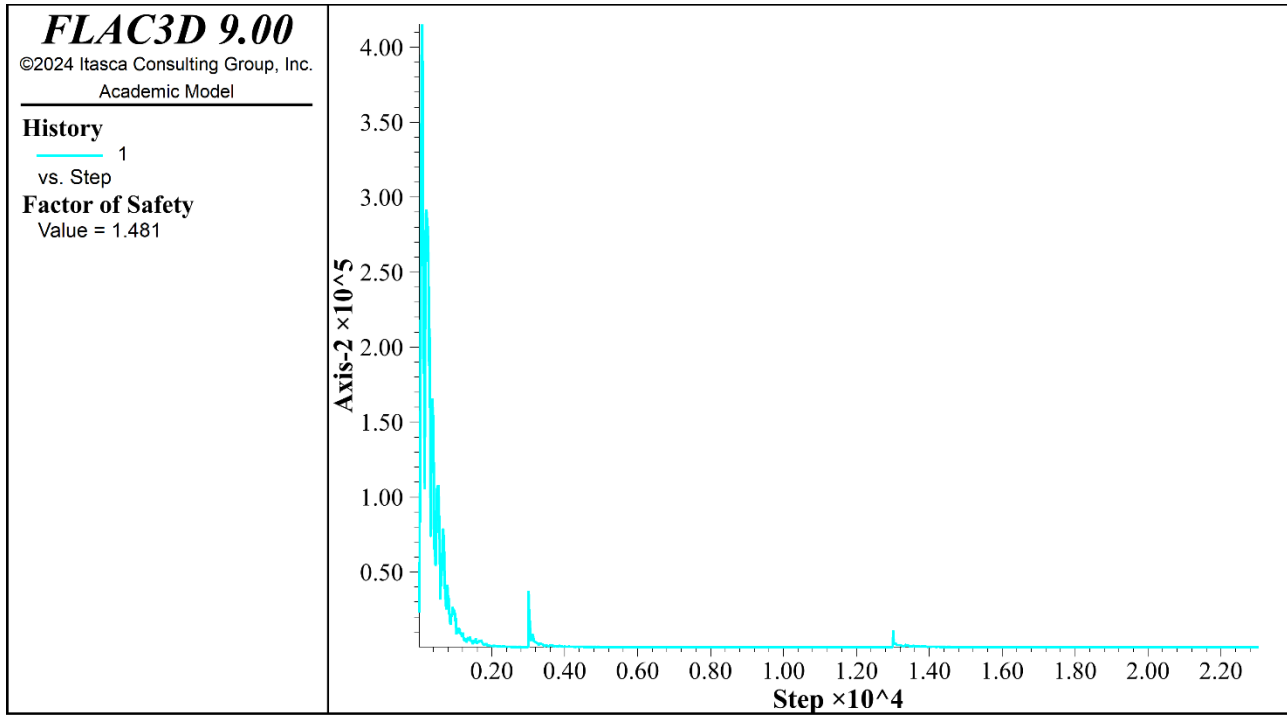


Abb. 5: Ungleichgewichtskraft [N] und FOS-Wert (Factor-of-Safety) für die 4 Rechenfälle (siehe Tab. 2) versus Rechenschritte (Steps), von oben nach unten: $C=0$ und $\varphi=47^\circ$; $C=1$ kPa und $\varphi=47^\circ$; $C=10$ kPa und $\varphi=47^\circ$; $C=10$ kPa und $\varphi=40^\circ$

4. Ergebnis und Diskussion

Tabelle 2 zeigt die Berechnungsergebnisse gemäß Parameter aus Tab. 1 nach Durchführung des $c-\phi-\sigma$ -Reduktionsverfahrens für die 3 gewählten Kohäsionswerte (siehe auch Abb. 5). Eine Ungleichgewichtskraft nahe Null zeigt Stabilität bzw. Standsicherheit an. Die gegen Null gehende Ungleichgewichtskraft am Ende der Berechnungen (siehe Abb. 5) belegt jeweils die Standsicherheit für den angegebenen FOS-Wert. **Als realistisch wird ein Kohäsionswert von 10 kPa und ein Reibungswinkel von 47° erachtet.** Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Halde sukzessiv aufgeschüttet wird, und sich sowohl durch Eigengewicht als auch durch Befahrung mittels schwerer Fahrzeuge verdichtet hat,

was zu einer zusätzlichen Ausbildung von Kohäsion führt. Mit einer maximalen Verkehrslast direkt am Böschungsrand wird die kritischste Situation bewertet.

Tab. 2: Berechnungsergebnisse

Berechnungsfall	Kohäsion c	Reibungswinkel φ	FOS
1	0	47	1.4
2	1 kPa	47	1.5
3	10 kPa	47	1.8
4	10 kPa	40	1.5

Alle Rechenfälle weisen eine ausreichende Standsicherheit für die Halde nach. Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass unter konservativen Annahmen und maximaler Verkehrslast ein FOS von ca 1.8 vorliegt und die Halde damit als langfristig standsicher angesehen werden kann.

5. Literatur

Chakraborti, D.; Konietzky, H.; Walter, K. (2012): A Comparative Study of Different Approaches for Factor of Safety Calculations by Shear Strength Reduction Technique for Non-linear Hoek-Brown Failure Criterion, *Geotech Geol Eng*, 30: 925-934

Chakraborti, S.; Konietzky, H.; Otparlik, K. (2012): Global and local approach of numerical shear strength reduction techniques for materials characterised by Hoek-Brown criterion: a comparative study, *Proc. EUROCK2012*, 124: 1-13

Konietzky, H. (2022): Factor-of-safety calculations in geomechanics, ebook, Lehrstuhl Felsmechanik, TU BAF

Magog (2025): mündliche, schriftliche und digitale Mitteilungen

Dong, J. et al. (2023): safety assessment of slope on in-service dump under severe dry-wet cycles at high-altitude, *Scientific Reports*, 13: 16992

Lazar, M. et al. (2021): long-term stability of the final slopes of the mining waste dumps from Oltenia, *MATEC Web of Conferences*, 342: 03005

Roosbeh, G.M. (2025): ORMAS V2.0,
<http://www.roosbehgm.com/codes/ormas/ormas.html>

Rudra, E. et al. (2024): Numerical analysis of dump slope stability using material properties obtained by parallel gradient method, *Mining Technology*, 133(1):31-41

Schmidt, F.; Konietzky, H. (2012): Geomechanical Problems at the Copper mines Jezkazgan (Kazakhstan), *Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg* zum 41. Geomechanik-Kolloquium, TU Bergakademie Freiberg, 27-40

Sujatono, S. (2023): the determination of mine waste dump material properties through back analysis, *Journal of King Saud university – Engineering sciences*, 35: 83-91

Verma, A. et al. (2017): Stability analysis of a mine waste dump over an existing dump, *Journal of Mines, metals & Fuels*, 2: 41-48

Walter, K.; Konietzky, H. (2008): Room pillar dimensioning for gypsum and anhydrite mines in Germany, *Proc. of the International Conference on Advances in Mining and Tunneling 2008*, Hanoi and Vietnam, 349-362

Wichert, J. (2020): *Slate als dimension stone*, Springer, 449 S.