

Methodik zur Risikobeurteilung einer Großrutschung

Methodology for a Risk Assessment of a large Landslide

Univ. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt, Bauhaus-Universität Weimar
Dipl. Geol. Dr. Erhard Dittrich, Jena
Dr.-Ing. Hans-Peter Nottrodt, Geotechnik - Dr. Nottrodt - Weimar GmbH

ZUSAMMENFASSUNG: Die Gefahr von Großrutschungen wird aufbauend auf geologischen Erkundungen, geotechnischen Messungen und Modellrechnungen auf einer unsicheren Datenbasis beurteilt. Dies wird anhand eines konkreten Talzuschubs dargestellt. Das Gebirgsmodell wird durch DEM Rechnungen verifiziert. Da damit keine verlässlichen Verformungsprognosen möglich sind, wird das Modell bis hin zu einem Starrkörpermechanismus vereinfacht. In die Standsicherheitsberechnungen werden streuende Scherparameter eingeführt, so dass eine Versagenswahrscheinlichkeit für den betrachteten Bruchmechanismus ermittelt werden konnte. Auf dieser Entscheidungsgrundlage können das Risiko bewertet und Eingreif- sowie Maßnahmenwerte für das Monitoring festgesetzt werden.

ABSTRACT: The risk-assessment for large landslides is founded on field investigations, laboratory testing, geotechnical measurements, stability analysis and numerical modelling. The application of these tools is illustrated to assess a large rock slope stability. The geomechanical model is fitted by DEM-simulations, but one seldom knows enough about a rock mass to model it unambiguously. In the case study there was a need to simplify the model, step by step, down to a multiple-wedged mechanism, to get qualitative results. For this rock stability analysis random varying shear parameters are introduced, to get both, an average safety factor as well as a probability of failure. Using this results the risk can be assessed qualitatively and threshold values for monitoring can be defined.

Einleitung

Großrutschungen treten in den Hochgebirgen als Teil des natürlichen Bildungs- und Abtragsprozesses auf. In den Mittelgebirgen und in Hügellandschaften werden rezente Rutschmassen durch anthropogene Einwirkungen reaktiviert. Die aktuelle Sicherheitsphilosophie zeigt bei derartigen Naturgefahren ein Wandel von der unbedingten Gefahrenabwehr zur Risikokultur. Es geht um ein Abwägen der Schadenswahrscheinlichkeit mit den Folgen. Die Folgen von Rutschungen lassen sich anhand von Szenarien darstellen und monetär belegen. Ebenso lassen sich die Kosten für eventuelle Sicherungsmaßnahmen kalkulieren. Wie bei anderen Naturgefahren fehlt jedoch eine zuverlässige Prognose der Eintrittswahrscheinlichkeit. Trotz modernster Rechentechnik und Kenntnis der Zusammenhänge verbleibt bei komplexen Versagensmechanismen eine große Unschärfe bei der Be-

wertung der Gefahren. Der methodische Einsatz der heute verfügbaren Werkzeuge zur Bewertung solch einer Gefahr – geologische Kartierung, Erkundung, geotechnische Messung, Simulation und vereinfachte Modellrechnung wird anhand der Großrutschung „Talzuschub Hohenwarte“ vorgestellt.

Talzuschub Hohenwarte

Das Pumpspeicherwerk Hohenwarte II liegt im Thüringischen Schiefergebirge. Die Anlage wurde von 1956-1962 errichtet. Zwischen dem oberen Speicherbecken und dem Krafthaus im Saale-tal verläuft eine 672 m lange Triebwasserleitung (Rohrbahn).

Der *Talzuschub Hohenwarte* ist eine sehr komplexe Verformung des Saalehanges im Bereich der Rohrbahn. Das beteiligte Volumen wird auf über 15 Mio. m³ geschätzt. Bild 1 zeigt das an der Oberfläche erkennbare Ausmaß. Erste

Bewegungen wurden mit dem Aushub der Baugrube des Krafthauses erkannt, die Verformungen werden seit 1962 beobachtet [1].

In mehreren Bohrkampagnen wurden seit 1962 insgesamt 1.760 Bohrmeter niedergebracht. Das Gebirge wurde im Bereich der Rohrbahn mit Inklinometern, Extensometern, Schwimmloten und Wasserdruckgebern reichlich instrumentiert.

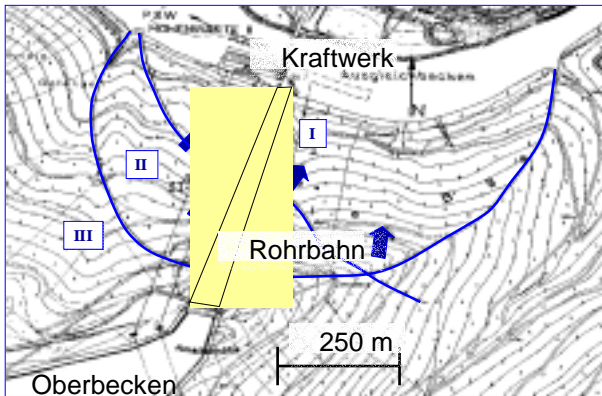


Bild 1: Lageskizze u. Schollen des Talzuschubes

Geologie und Gebirgsmodell

Auf Grundlage der Kartierung, Erkundung und der umfangreichen geotechnischen sowie hydrogeologischen Messungen wurde ein Gebirgsmodell entwickelt und sukzessive verfeinert. Eine vereinfachte Darstellung der Schollen und Homogenbereiche ist in Bild 2 als Längsschnitt entlang der Rohrbahn dargestellt.

Im oberen Teil des Hanges wurden flach liegende gebänderte Tonschiefer erkundet, die von etwa 80 m Grauwacke unterlagert werden. Dieser als Scholle II bezeichnete Körper grenzt bergseitig mit einem Abriss an das unbewegte Umfeld bzw. an die unbewegte Unterlage (Scholle III). Etwa in der Mitte der Rohrbahn wird dieser obere Gebirgskörper von einer Verwerfung begrenzt.

Unterhalb dieser Störung ist eine Muldenstellung entwickelt, in der wiederum Tonschiefer über Grauwacken liegen. Die Schichten fallen hier in den Hang ein. Die Verwerfung wurde mit der quartären Erosion des Saaletales vor mindestens 5000 Jahren aktiviert. Die Störzone ist mehrere Meter breit und stark mylonisiert

An dieser Trennschicht gleitet die untere Scholle I ab und fährt unten auf die liegenden Tonschiefer auf. Im Auflagerbereich der Scholle I wurde eine Auflockerungszone erkundet, die als Dichtklüftung bezeichnet wird. Die Zone verläuft etwa in Richtung der größten Schubspannung des abgleitenden und im Tal verkeilten Gebirgskörpers.

Die Absinkgeschwindigkeit betrug zu Beginn der Messungen ca. 5 mm/Jahr und ist in den letzten 15 Jahren in ein konstantes Kriechmaß von ca. 1 bis 1,5 mm/Jahr übergegangen. Am Hangfuß zeigen sich Hebungen sowie eine für die Maschinensätze relevante Schiefstellung des Krafthauses. Verschiebungsvektoren der Rohrauflager sind maßstäblich in Bild 2 dargestellt.

Die Scholle I macht den Messungen zufolge eine Art Rotationsbewegung. Die oberhalb der Verwerfung gelegene Scholle II reagiert auf das Absinken von Scholle I mit einem lateralen Tal-schub, der als hangparalleles Kriechen bis in eine Tiefe von 90 m reicht.

Das hydrogeologische Regime unterscheidet sich in Scholle II von dem in Scholle I. Im oberen Gebirgskörper findet Grundwasserneubildung statt, der Gebirgswasserstand reagiert heftig und kurzfristig auf Niederschläge. Die geringdurchlässige Verwerfung wirkt als Stauer, was zu einer seitlichen Ableitung des Grundwassers führt. In der unteren Scholle reagieren die Gebirgswasserstände träge auf saisonale Einflüsse. Hier wurden auch seitliche Zusickerungen nachgewiesen.

Trotz widerspruchsfreiem Gebirgsmodell und

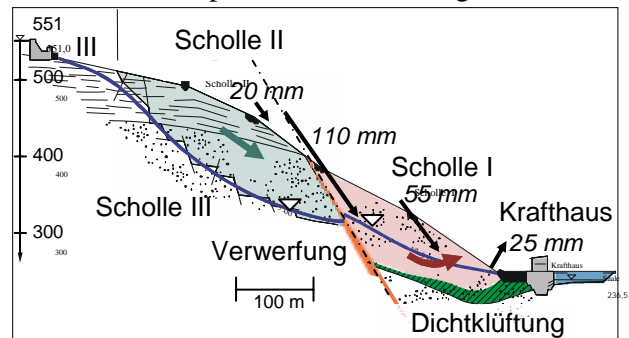


Bild 2: Gebirgsmodell und Verschiebungen

der umfangreichen Messungen waren belastbare Aussagen zur Standsicherheit des Hanges und zur Prognose der Verformungen für das Krafthaus nicht möglich. Die Gefahren sollten mit Hilfe von Berechnungsmodellen bewertet werden.

Distinkt-Element-Modellierung

Die aus den Beobachtungen abgeleitete Kinematik wurde durch numerische Modellierung mit dem Programm UDEC (Universal Distinct Element Program) verifiziert. Die Schichten und ein vereinfachtes Trennflächengefüge wurden für eine Region von ca. 500x900 m diskretisiert. Das durchtrennte Gebirge wird dabei als ein System von elasto-plastischen Kontinuumselementen (Blöcke) betrachtet. In den Trennflächen gelten Mohr-Coulomb'sche Grenzbedingungen. Die Blöcke sind deformierbar, als Freiheitsgrade sind

Translation, Rotation und Aufgleiten möglich. Die Gebirgswasserverhältnisse werden an den Rändern vorgegeben und intern als Spaltströmung simuliert. Als Ergebnis erhält man Wasserdruckkräfte, Verschiebungen, Verformungsgeschwindigkeiten, Scherbeanspruchungen sowie Zonen des plastischen Grenzzustandes.

Ziel der Modellierung war es, die Kinematik und den Einfluss des Gebirgswassers auf die Verformungsgeschwindigkeit qualitativ zu erfassen. Weitergehende Aussagen, insbesondere die Berechnung der Standsicherheit oder die Prognose von Verformungen, können bei einem derartigen Grad der Modellierung nicht erwartet werden.

Diese für andere Bereiche des Ingenieurwesens hochentwickelten DEM-Programme erlauben zwar eine sehr detaillierte Modellierung, mit der Verfeinerung des Modells geht aber in der Felsmechanik immer eine Entfremdung von der Realität einher, da es an verlässlichen Daten fehlt. Eine höhere Auflösung des Modells ist daher für felsmechanische Fragen nicht zielführend [4]. Vielmehr empfiehlt sich als Methodik der umgekehrte Weg: statt einer Verfeinerung des numerischen Modells bei geringer Datensicherheit sollen generelle Aussagen mit einem groben Modell auf einer verlässlichen Datenbasis gewonnen werden. Die numerische Modellierung dient somit bei baupraktischen felsmechanischen Fragen in erster Linie zum besseren Verständnis der Situation, zur Verifikation von Hypothesen und zu quantitativen Parameterstudien. Das bessere Verständnis kann dazu legitimieren, das Modell schrittweise soweit zu vereinfachen, bis eine quantitative Aussage möglich ist.

Im hier behandelten Fall konnte auf ein erstes UDEC-Modell zurückgegriffen werden [2], das im Zuge der ergänzenden Erkundungen präzisiert wurde [3]. Der Einfluss des Gebirgswasserspiegels auf die Verformungsgeschwindigkeiten und auf die Konvergenz der Verformungen konnte qualitativ aufgezeigt werden. Eine Validierung des Modells mit den Messergebnissen, wie auch die Ableitung von Grenzzuständen ist jedoch nicht möglich.

Als wesentliches Ergebnis im Sinne der hier behandelten Methodik zur Risikobeurteilung des Talzschubes sind die durch den Aushub der Baugrube des Krafthauses verursachten inkrementellen Scherverformungen anzusehen. Mit der DEM-Modellierung konnte gezeigt werden, dass in der oberen Scholle II selbst bei ungünstigen Parametern lediglich laterale elastische Verformungen auftreten. Die Kinematik in Scholle I weist dagegen unter Berücksichtigung der geolo-

gischen Vorschädigung bevorzugte Scherzonen auf, in denen bei Variation der Scherparameter und Wasserstände zumindest lokal Grenzzustände erreicht werden. Die Richtungen dieser bevorzugten Scherzonen sind in Bild 3 markiert.

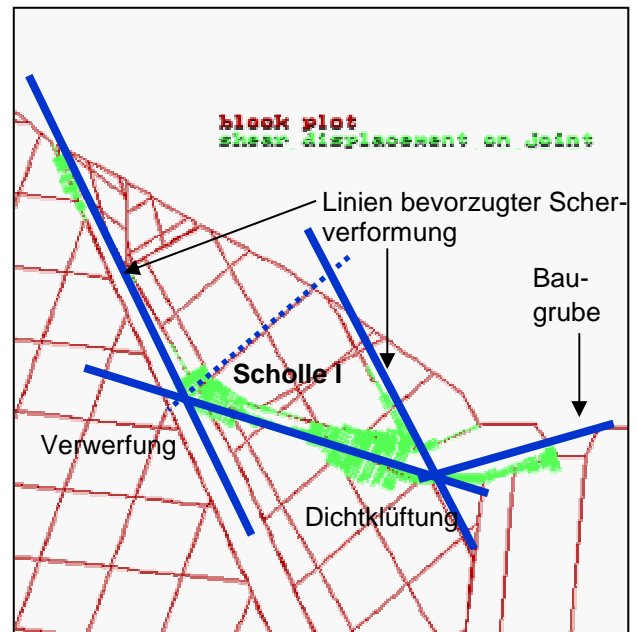


Bild 3: Inkrementelle Scherverformungen, ermittelt mit der DEM -UDEC-Modellierung

Untersuchung mit zusammengesetzten Bruchkörpern

Die Ergebnisse der DEM-Modellierung erlauben eine weitere Vereinfachung des Modells. Die untere Scholle I kann vereinfacht als ein Mechanismus zusammengesetzter Bruchkörper betrachtet werden. Einflussgrößen sind neben der Geometrie die Dichte des Gebirges, die Scherparameter in den Gleitflächen, der Gebirgswasserstand und die daraus resultierenden Strömungskräfte. Bild 4 zeigt eine solche Modellierung. Mit einem derart vereinfachten Modell ist es möglich, obere

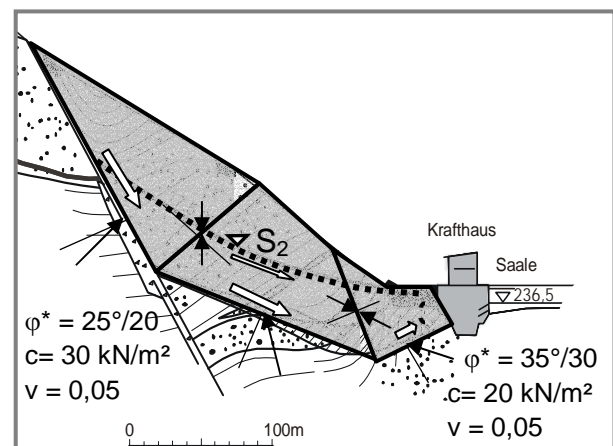


Bild 4: Starrkörpermodell, Scholle I

Schranken der Standsicherheit zu ermitteln. Die Standsicherheiten wurden mit dem Programm KEM [5] berechnet. Die geologisch vorgegebenen Randgleitflächen wurden festgehalten, die inneren Gleitflächen wurden optimiert. Wegen der Tiefenlage der Gleitfläche hat die Größe der Kohäsion nur einen untergeordneten Einfluss auf die Standsicherheit. Für die Störung und die übrigen Gleitflächen wurden unterschiedliche Reibungswinkel angesetzt (s. Bild 4). Für diesen sicherheitsrelevanten Parameter lag nur eine unsichere Datenbasis vor. Die Werte wurden daher als Mittelwert empirisch geschätzt und mit einem relativ großen Variationskoeffizienten Gauß-normalverteilt in den Berechnungen berücksichtigt. Für alle Gleitfugen wurden mit der Monte-Carlo-Methode Parametersätze der Reibungswinkel erzeugt. Für einen jeweils konstanten Gebirgswasserspiegel wurden dann mit jedem Parametersatz Realisationen der Standsicherheit unter der Variation der inneren Gleitflächen errechnet, wobei die Reibungswinkel und die innere Geometrie der Bruchkörper die Basisvariablen darstellen. Auf diese Weise kann für jeden beliebigen Gebirgswasserspiegel der Mittelwert und die Verteilung des Standsicherheitskoeffizienten errechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Grenzzustand erreicht wird, wird als Versagenswahrscheinlichkeit des betrachteten Bruchmechanismus bezeichnet: $p_f = P(\eta < 1)$. Sie wurde unter Annahme einer Log-Normalverteilung der Sicherheitsfaktoren errechnet.

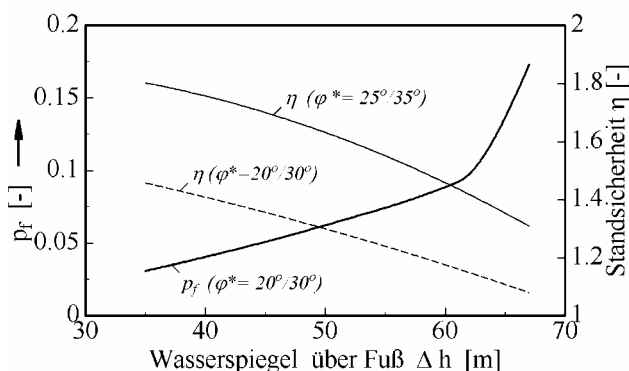


Bild 5: Parameterstudie zur Standsicherheit

Diese Prozedur wurde für unterschiedliche Gebirgswasserstände ausgeführt, so dass ein Zusammenhang zwischen Gebirgswasserstand, zentralem Sicherheitsfaktor und Versagenswahrscheinlichkeit dargestellt werden konnte (Bild 5).

Bei dieser Vorgehensweise stellen die jeweils errechneten Sicherheitsfaktoren echte obere Schranken für die betrachteten Mittelwerte dar. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Bruchmechanismus wird dennoch weit überschätzt, da die

Realisationen der Scherparameter jeweils auf die gesamte Länge einer Gleitflächen angesetzt werden. Bei einem wirklichkeitsnahen stochastischen Baugrundmodell wären kleinere Abschnitte, etwa in der Größe einer Autokorrelationslänge des jeweiligen Parameters zu betrachten, mit der Folge, dass in den langen Gleitfugen bereits eine Mittelwertbildung stattfindet.

Mit der Methodik wurde der Zusammenhang zwischen Gebirgswasserspiegel und Grenzzuständen veranschaulicht. Die dargestellten Ergebnisse dienen als Entscheidungsgrundlage zur Festlegung von Grenzwerten des Gebirgswasserstandes und zur Planung von Maßnahmen.

Schlußbemerkung

Bei der Risikobewertung von Großrutschungen sind unterschiedliche zufällige und unsichere Einflüsse zu beachten. Die Aufgabe besteht im Erkennen und Beschreiben möglicher Grenzzustände und in der Verknüpfung mit Eintrittswahrscheinlichkeiten. Bei komplexen felsmechanischen Prozessen war man früher alleine auf Messungen angewiesen, heute kommen zunehmend numerischen Modellierungen zur Anwendung. Wegen der unsicheren Datenbasis kann dabei ein zuviel an Detaillierung das Problem ersticken. Die Methodik muss daher immer in Richtung einer schrittweisen Vereinfachung bis hin zu überschaubaren Grenzzuständen gehen, wobei stets die Qualität aller Daten beginnend bei der Erkundung bis hin zu der Festlegung der Parameter zu berücksichtigen ist.

Quellennachweis

1. Dittrich, E. u. Lütke, J. F.: Ein Talzusub im Thüringischen Schiefergebirge. Hall. Jb. f. Geowiss. Bd 7, 1982, S. 67-72
2. Stahlmann, J. u. Trischler, J.: Planen und Bauen im gestörten Fels - Drei Fallbeispiele. Felsbau 15 (1997), Nr. 6, S. 496-499
3. Römer, M.: Untersuchung der Standsicherheit eines Talzusbubes mit der Methode distinkter Elemente. Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2000
4. Starfield, A. M. u. Cundall, P. A.: Towards a Methodology for Rock Mechanics Modelling. Int. J. Rock Mech. Min. Sci.&Geomech. Abstr. Vol. 25, No.3, pp 99-106, 1988
5. Gußmann, P.: Die Methode der Kinematischen Elemente und adaptive Optimierung, Bauingenieur Band 67, S. 409-417, 1992