

Geotechnisch - Numerische Modellierung der Massenbewegung am „Faulen Schrofen“ bei Reutte/Tirol

Geotechnical - numerical modeling of mass movement on mountain “Fauler Schrofen” near Reutte/Tirol

J. Meier¹, A. Spickermann¹, D. Rütz¹, M. Moser², T. Schanz¹

Zusammenfassung

Die geotechnisch-numerische Modellierung von großflächigen und großräumigen Gebirgsbereichen zählt im zunehmenden Maße zu den notwendigen und gefragten Aufgaben der Geotechnik. Diese Entwicklung hin zur Anwendung aufwendiger numerischer Verfahren (in der Regel auf Grundlage der FE- oder FD-Methode) wird durch die hohe Komplexität der Gesteinsverbände und die Vielschichtigkeit der treibenden bzw. haltenden Faktoren begünstigt, die durch die klassischen analytischen Verfahren nicht oder nur unzureichend abgedeckt werden kann. Am Beispiel von Stabilitätsuntersuchungen der Bergzerreißungsvorgänge des „Faulen Schrofen“ nahe Reutte (Tirol) sollen die verwendeten numerischen Ansätze und die durchgeführten Analysen vorgestellt und diskutiert werden.

Keywords: Numerische Modellierung, Hangrutschung

Abstract

The numerical modelling of large scale mountain areas has an increasing importance among the necessary and in demand tasks in geotechnical engineering. This development to the numerical simulations is favoured by the high complexity of the rock formations and the complexity of the driving and/or holding factors, which cannot be taken into account by the classical procedures or can be considered but not sufficiently. In this paper an example is given on stability analysis of “Faulen Schrofen” close to Reutte (Tirol) and the results of the numerical simulation are discussed.

Keywords: numerical modeling, slope movements

1 Einleitung

Das Gebiet Hornbergl „Fauler Schrofen“ mit dem Murenbach befindet sich wie in Fig. 1 ersichtlich in den nördlichen Kalkalpen ca. 10 km südwestlich der Ortschaft Reutte (Tirol) in einer Bergkette, die den Reuttener Talkessel auf ca. 6 km Länge umrahmt. Der

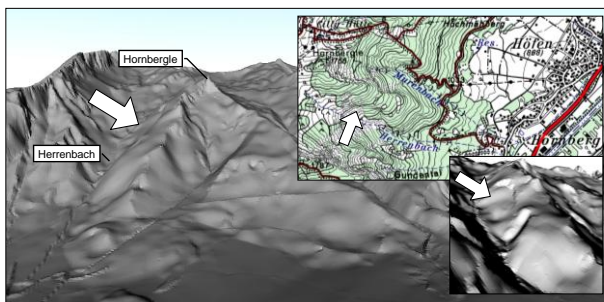


Fig. 1: Lage der Massenbewegung am „Faulen Schrofen“ bei Reutte/Tirol (3D-Oberflächenmodell mit topografischer Karte)

Fig. 1: location of mass movement at mountain “Fauler Schrofen” near Reutte/Tirol (3D-surface model including topographic map)

kalkalpine, tektonisch stark gegliederte und instabile geologische Aufbau verursacht im Zusammenhang mit dem schnee- und regenreichen Klima eine überdurchschnittliche Anzahl von Hochwasser- und Murenereignissen, Bergzerreißungsfelder und Steinschlägen mit Felsstürzen. Die als Folge dieser Katastrophen durchgeführten Schutzmaßnahmen kosteten bis heute ca. 11 Mio. Euro (ca. 150 Mio. Schilling). Am „Faulen Schrofen“ selbst belegen Spalten, Bewegungsbahnen, Muren (z. B. 1975, 1982 und 1983) und Felsstürze (z. B. 1976) deutliche Bergzerreißungsvorgänge.

Seit 1967 gab es in den 7 größeren und mehreren kleineren Wildbächen des Gebietes:

- 7 große Murereignisse mit schweren Schäden im Siedlungsgebiet
- 1976: Felssturz am „Faulen Schrofen“ (ca. 100 000 m³)
- mehrere kleine Felsstürze
- mehrere kleine Murenabgänge

¹ Dipl.-Ing. J. Meier (joerg.meier@bauing.uni-weimar.de), Dipl.-Ing. A. Spickermann (anke.spickermann@bauing.uni-weimar.de), Dr.-Ing. D. Rütz (detlef.ruetz@bauing.uni-weimar.de), Prof. Dr.-Ing. habil. T. Schanz (tom.schanz@bauing.uni-weimar.de)
Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystrasse 11c, 99421 Weimar

² Prof. M. Moser (moser@geol.uni-erlangen.de)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schloßgarten 5, 91054 Erlangen

2 Ingenieurgeologische Situation

Das Untersuchungsgebiet liegt im westlichen Teil der Nördlichen Kalkalpen in dem Stirnbereich der Lechtaldecke, die nach Norden auf die Allgäudecke überschoben ist. Der „Faule Schrofen“ selbst wird durch gebankte Kalke (Oberer Muschelkalk) der Lechtaldecke aufgebaut. In einer Teufe von ca. 200 m im oberen Bereich und ca. 100 m im unteren Bereich wird die durch die Reichenhaller Schichten gekennzeichnete Überschiebungsbahn über die Allgäuschichten angenommen. (Fig. 3)

Die Schichtenpakete des Oberen Muschelkalks sind durch eine deutliche und großflächige Ausbildung von hangparallelen Trennflächen gekennzeichnet. Diese und zwei weitere jeweils nahezu senkrecht zu den beiden anderen stehenden Kluftscharen weisen teilweise mergelige Kluftbeläge auf.

Im Bereich des Hanges können oberhalb der Abrisskante von 1976 mehrere Dekameter lange und teilweise über 1 m breite Spaltenzonen beobachtet werden. Breite Bewegungszonen am Kamm zeigen teilweise Öffnungsraten bis zu 85 mm/a (Fig. 2).

Bei dem bereits angesprochenen Felssturz vom Oktober 1976 ging im Oberlauf des Herrenbaches aus den orographisch linken Einhängen ca. 100 000 m³ Massen nieder. Diese Massen verfüllten das enge V-Tal und verschoben den Bachlauf mehrere Meter in Richtung des Gegenhanges. Ein Zusammenhang zu dem Erdbeben in Friaul am 6. Mai 1976, welches auch im Außerfern deutlich zu spüren war, kann nicht ausgeschlossen werden (ALBRECHT 1999).

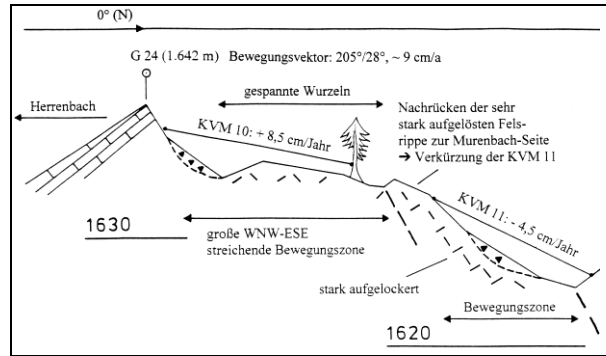


Fig. 2: Breite Bewegungszonen am Kamm mit Öffnungsraten bis zu 85 mm/a

Fig. 2: wide zones of movement near top with opening rates up to 85 mm/a

3 Mögliche Versagensmechanismen

Aus der in Abschnitt 2 geschilderten ingenieurgeologischen Situation lassen sich für den aktuellen Zustand zwei mögliche Versagensmechanismen ableiten:

a) Abgleiten von Gesteinspaketen auf den hangparallelen Schichtflächen

Dieser Versagensfall betrifft hauptsächlich die Gesteinsmassen oberhalb der 1976 bei dem Felssturz entstandenen Abrisskante in etwa 1 600 m Höhe über NN. Versagensbegünstigend wirken sich hier das hangparallele Einfallen der ebenen, großflächigen Trennflächen aus (Fig. 4). Eine weitere Voraussetzung für diesen Versagensfall ist eine entsprechende Herabsetzung des wirksamen Reibungswinkels auf den Trennflächen. Bei einer außergewöhnlichen Belastung des Hanges, wie z. B. erhöhter Wasserdruck in den Klüften nach einem starken Niederschlagsereignis oder der Schneeschmelze ist ein Versagen möglich.

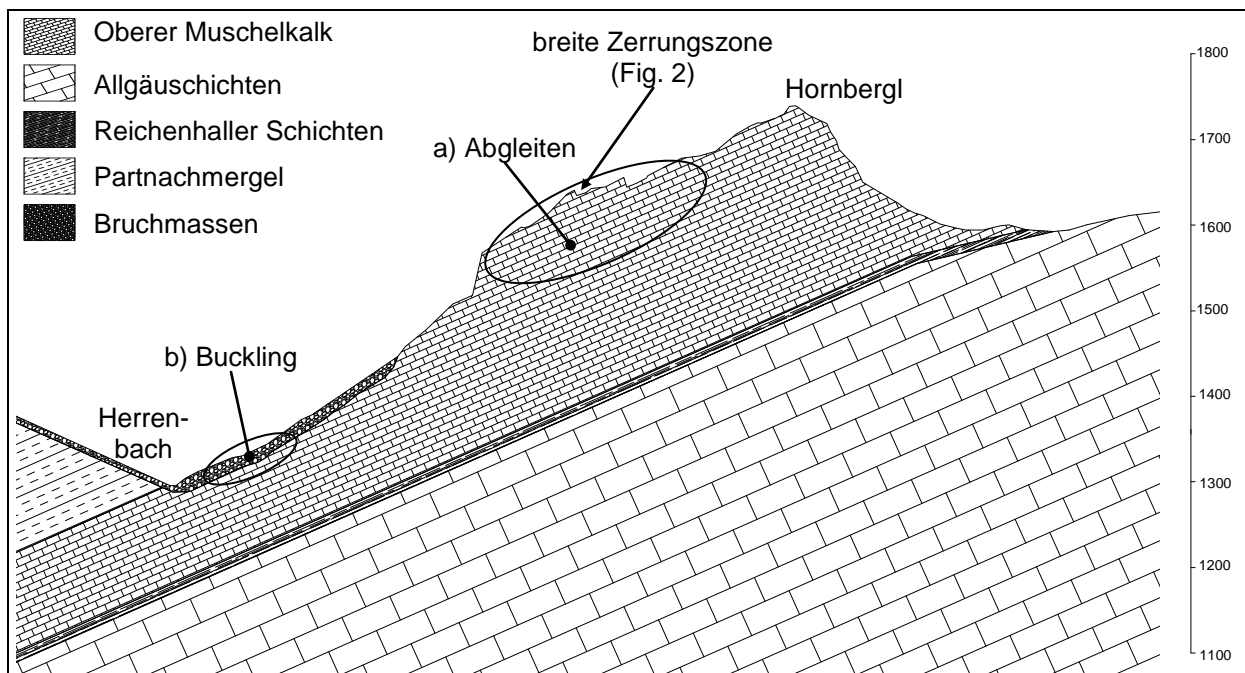


Fig. 3: Ingenieurgeologischer Schnitt im Bereich des Felssturzes von 1976
 Fig. 3: geological – geotechnical section trough area of rockfall of 1976



Fig. 4: Beispiel der ebenen großflächigen hangparallelen Trennflächen im Bereich des Felssturzes von 1976

Fig. 4: Typical example of slope-parallel joint set in area of the rock-fall in 1976

b) Ausknicken von Gesteinspaketen im Bereich des Felssturzes von 1976 („Buckling“)

Durch die nach dem Felssturz 1976 fehlende Auflast auf die hangparallelen Schichtpakete im unteren Bereich des Hanges in etwa 1 325 m bis 1 400 m Höhe über NN kann ein Ausknicken der Schichtpakete bei einer hohen hangparallelen Belastung („Buckling“) nicht ausgeschlossen werden. Gestützt wird diese Vermutung durch das Vorhandensein einer deutlichen Aufwölbung in einer Höhe von 1350 m über NN des Profils.

4 Numerische Modellierung

Die numerische Modellierung auf der Basis des ingenieurgeologischen Modells des aktuellen Zustandes des Hanges wurde nach folgenden Verfahrensweisen durchgeführt:

1. „Verschmierte“ Modellierung

Der Gebirgsverband wird mit den Trennflächen bei diesem Verfahren durch ein mechanisch adäquates Ersatzmaterial als Kontinuum repräsentiert. Im Rahmen dieses Beitrags wurde dazu ein 2D-Modell im Programmsystem ABAQUS/Standard gewählt.

2. Diskrete Modellierung von einzelnen Gesteinsverbänden und deren Trennflächen

In ABAQUS/Explicit wurde der Hang als Lamellenmodell nachgebildet.

4.1 2D-Modell in ABAQUS/Standard

In dem verwendeten Modell (Fig. 5) wurde auf die Modellierung der Allgäuschichten verzichtet und durch einen vertikal fixierten Rand ersetzt, da diese in Anbetracht der angenommenen hohen Festigkeiten in diesem Bereich und nach den Erkenntnissen aus der Geologie keine signifikanten Verformungen resultierend aus der Hanginstabilität erfahren.

Im linken und rechten Bereich des Modells wurden die Modellgrenzen so gewählt, dass inkorrekte Zwangsspannungen und -verschiebungen zufolge Randeinfluss vermieden wurden.

Die Bruchmassen, die Reichenhaller Schichten und die Partnachmergel, wurden unter den Rahmenbedingungen des Modells als ideal elastisch modelliert. Für die Modellierung des Oberen Muschelkalks wurde das in ABAQUS/Standard implementierte Materialmodell „Jointed Material“ gewählt (siehe ABAQUS User Manual und Zienkiewicz 1977).

Mit Hilfe des Jointed Material Modells kann das anisotrope Verhalten des Muschelkalks berücksichtigt werden. Das Jointed Material Modell stellt ein einfaches Kontinuumsmodell dar, das bis zu drei Kluftscharen mit unterschiedlichen Richtungen enthalten kann. Eine Kluftschär wird aus einer Mehrzahl von Klüften mit einer bestimmten Orientierung gebildet, deren Abstände zueinander im Vergleich zu den Modellabmessungen sehr gering sind. Somit wird der Felsverband als verschmiertes Modell berechnet.

Durch das Jointed Material Modell wird ein elastisch-plastisches Materialverhalten beschrieben. Der geklüftete Felsverband besteht aus dem intakten Fels, der Matrix, und aus den Trennflächen. Das Materialverhalten der Matrix wird als isotrop elastisch angenommen. Das Bruchkriterium f_a in der Trennfläche entspricht dem Mohr-Coulomb Kriterium (Gleichung 1).

$$(1) \quad f_a = \tau_a - p_a \cdot \tan \beta_a - d_a = 0$$

mit: τ_a Schubspannung in der Trennfläche a

p_a Druckspannung in der Trennfläche a

β_a Reibungswinkel in der Trennfläche a

d_a Kohäsion in der Trennfläche a

Für den Muschelkalk wurden nach den Unterlagen der ingenieurgeologischen Aufnahmen zwei Kluftscharen angenommen: die überwiegend hangparallele „Kluftschär 1“ und die dazu senkrecht stehende „Kluftschär 2“. In Tab. 1 wurden die Materialparameter der Kluftscharen für das Materialmodell „Jointed Material“ zusammengefasst. Für die hangparallele Schar 1 wurden etwas ungünstigere Werte angenommen, da diese als großflächig und „eben“ charakterisiert werden kann, wogegen Schar 2 eher als „rau“ und „absätzig“ zu beschreiben ist. Die eigentliche Gesteinsmatrix konnte als isotrop angenommen werden, da der Muschelkalk im Untersuchungsgebiet keine signifikanten Vorzugsrichtungen besitzt bzw. kein signifikantes Trennflächengefüge aufweist.

Tab. 1: Materialparameter des Oberen Muschelkalks
Tab. 1: material parameter for „Oberer Muschelkalk“

Parameter		Wert
<i>Kluftschär 1 (hangparallel)</i>		
Reibungswinkel φ	[°]	44
Dilatanzwinkel ψ	[°]	27
Kohäsion C	[kN/m ²]	200
<i>Kluftschär 2 (senkrecht zur Hangneigung)</i>		
Reibungswinkel φ	[°]	51
Dilatanzwinkel ψ	[°]	28
Kohäsion C	[kN/m ²]	300

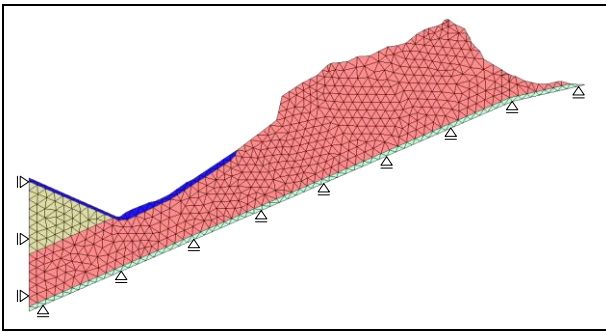


Fig. 5: verwendetes 2D-Modell für ABAQUS/Standard
 Fig. 5: used 2D-model for ABAQUS/Standard

Im Rahmen eines einleitenden „geostatischen“ Berechnungsschritts (d.h. hydrostatischer Primärspannungszustand, $K_0 = 1 - \sin\phi$) bei einer vollständigen Fixierung des Modells vorgegeben und diese Fixierungen in 17 weiteren Schritten schrittweise gelöst.

Fig. 6 zeigt die Ergebnisse der 2D-Berechnung mit dem „Jointed Material“-Materialmodell für den Oberen Muschelkalk. Die größten Verformungen (Fig. 6b) sind demnach im Bereich der stehen gebliebenen Massen nahe der Abrisskante vom Oktober 1967 zu erwarten. Verschiebungen sind allerdings nahezu im gesamten Schichtenpaket des Oberen Muschelkalks nachweisbar. Diese Aussage deckt sich sehr gut mit den Ergebnissen der geodätischen Messkampagne, die ebenfalls Bewegungen im gesamten Hang nachweist und deren Maximum oberhalb der Abrisskante dokumentiert. Diese Aussagen sprechen für den in Abschnitt 3a beschrie-

benen Versagensmechanismus des Abgleitens von Gesteinspaketen auf hang-parallelen Schichtflächen. Fig. 6c gibt darüber hinaus einen Anhaltspunkt für die in der Natur zu beobachtenden Spaltenzonen. Die ABAQUS - Simulation weist tiefgreifende plastische Bereiche auf, die auf ein Aufreißen der Klüfte unter Einbeziehung beider Klüftscharen deutet (Staffelbruch). Hinweise auf den in Abschnitt 3b beschriebenen Versagensfalls des Ausklickens können in dem ABAQUS/Standard - Modell nicht eindeutig nachgewiesen werden.

4.2 Lamellenmodell in ABAQUS/Explicit

In dem in Fig. 7 abgebildeten 3D-Lamellenmodell für ABAQUS/Explicit werden die geomechanisch wirksamen Klüftkörper als eigenständige Blöcke modelliert. Untereinander interagieren diese mittels einer von ABAQUS/Explicit zur Verfügung gestellten Kontakt – Definition. Die Abmaße der geomechanisch wirksamen Klüftkörper wurden in Anlehnung an die ingenieur-geologischen Feldaufnahmen mit 40 x 20 m angesetzt. Im Bereich des vermuteten Ausknickens der Schichtpakete wurde die Größe der Blöcke nochmals halbiert. Die Randdefinitionen wurden analog dem 2D-Modell in Abschnitt 4.1 gewählt und durch die Fixierung in der Lamellenebene ergänzt (in Richtung der 3. Raumachse in Fig. 7). Das Materialverhalten der einzelnen Blöcke wurde unter den gegebenen Rahmenbedingungen vereinfachend als ideal elastisch angenommen. Die Parameter der Klüfte entsprechen denen aus Tab. 1.

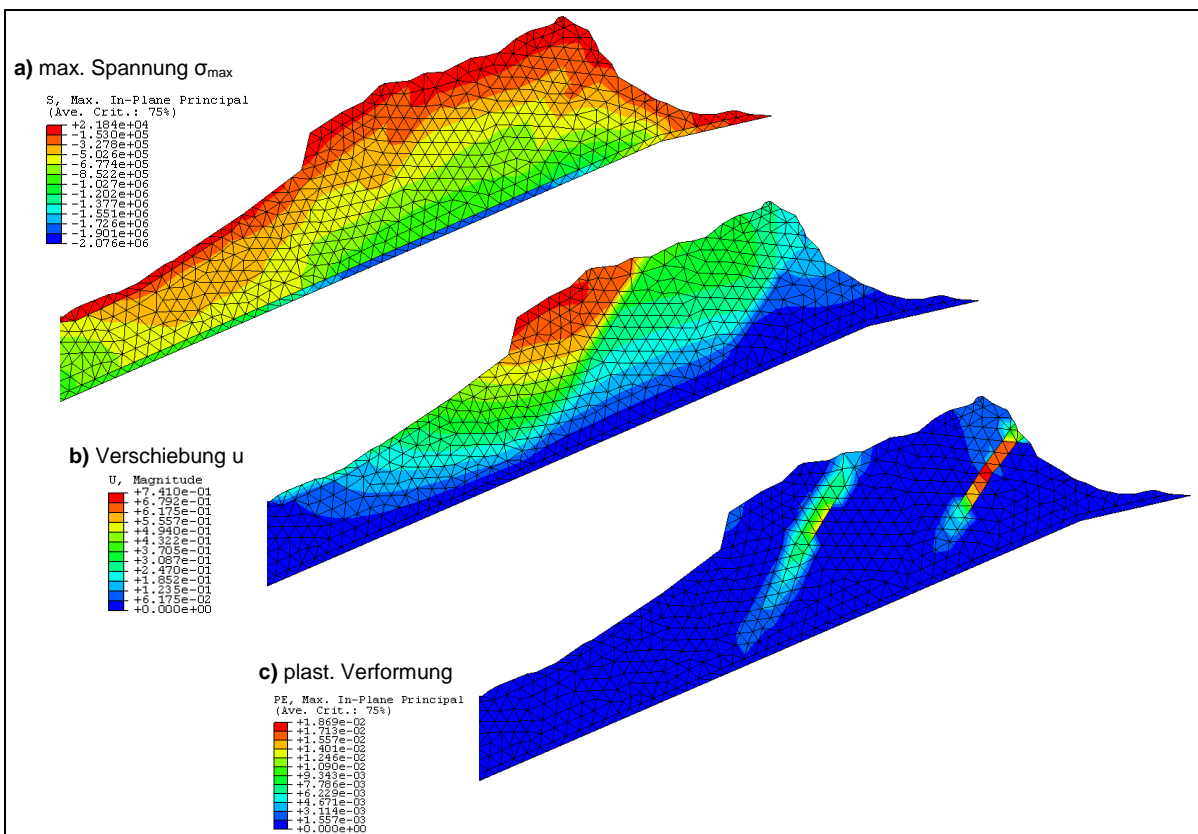


Fig. 6: Ergebnisse der Berechnungen in ABAQUS/Standard
 Fig. 6: results of calculation with ABAQUS/Standard

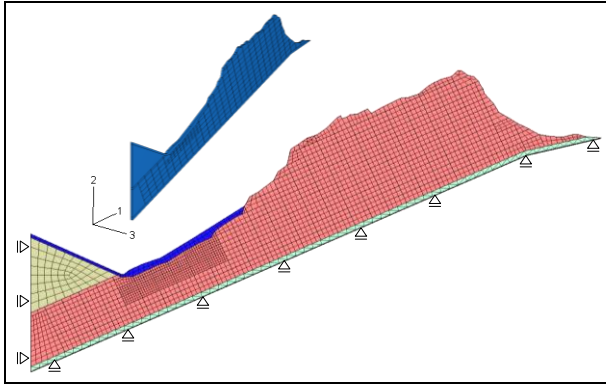


Fig. 7: Verwendetes Lamellenmodell für ABAQUS/Explicit

Fig. 7: used lamella-model for ABAQUS/Explicit

Die in Fig. 8 visualisierten Berechnungsergebnisse der diskreten Modellierung zeigen im oberen Bereich des Hanges ein teilweise deutliches Aufreißen der Trennflächen und relatives Verschieben der geomechanisch wirksamen Klüftkörper gegeneinander. Die Verschiebungen besitzen wie auch bei der ABAQUS/Standard-Berechnung ein Maximum oberhalb der Abrisskante von 1976. Darüber hinaus werden jedoch von dem Lamellenmodell für den Gipfel des Hornbergels große Verschiebungen angezeigt (Fig. 8b). Im unteren Bereich des Hanges in einer Höhe zwischen 1 300 und 1 325 m zeigt sich, wie in Fig. 8c ersichtlich, ein aufwölben der Schichtpakete, was auf den im Abschnitt 3b beschriebenen Versagensfall des „Bucklings“ hindeutet.

4.3 Vergleich der Verfahren

Sowohl die verschmierte als auch die diskrete Modellierung der Massenbewegung am „Faulen Schrofen“ geben deutlich die Bildung der auch in der Natur beobachteten aktiven Spaltenzonen wieder. Die Modelle stimmen ebenfalls in dem Punkt überein, dass die maximalen Verschiebungsbeträge oberhalb der Abrisskante von 1976 ausgewiesen werden. Das in einer Höhe von 1350 m über NN vermutete Ausknicken der Schichtpakete wurde nur durch die diskrete Modellierung mit ABAQUS/Explicit bestätigt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Modellierung des aktuellen Zustandes des vorgestellten Hanges wurde zum einen in ABAQUS/Standard als auch in ABAQUS/Explicit durchgeführt und eine gute Übereinstimmung mit dem in der Natur vorgefundenen Zustand erreicht. Als nächster Schritt soll eine inverse Bestimmung der konstitutiven Parameter unter verstärkter Zuhilfenahme der Daten der geodätischen Messkampagnen mit verschiedenen Optimierungsalgorithmen versucht werden. Des Weiteren sollen den in der Natur immer vorhandenen Imperfektionen und der ungleichmäßigen Verteilung der verschiedenen Materialparameter verstärkt Rechnung getragen werden.

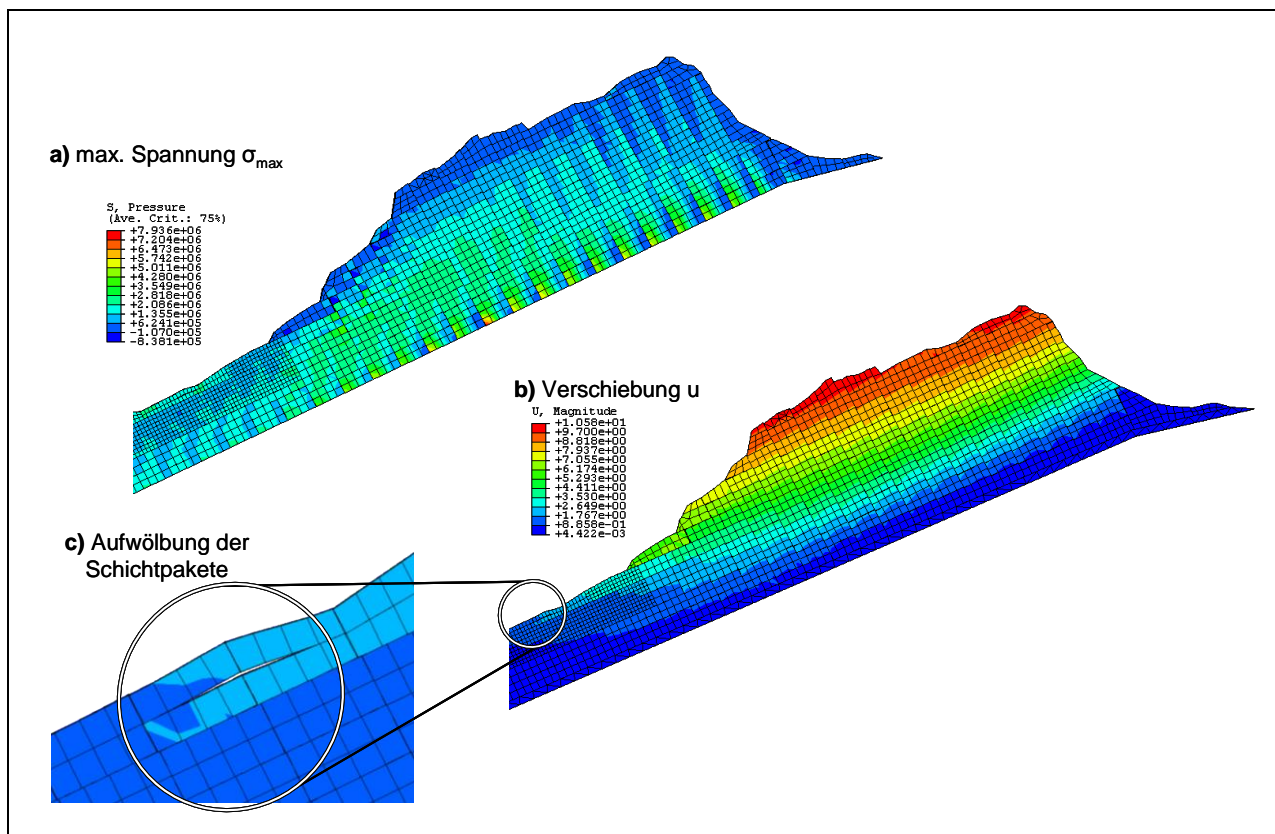


Fig. 8: Ergebnisse der Berechnungen in ABAQUS/Explicit
Fig. 8: results of calculation with ABAQUS/Explicit

Danksagung

Die hier vorgestellte Arbeit wurde im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes „Geomechanische Modellierung tiefgreifender Hangbewegungen“ ausgeführt. Die Autoren möchten sich für die Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Förderprogramms SCHA 675/7-1 bedanken.

Literatur

ALBRECHT, T. (1999): Die Geologisch-Geotechnischen Verhältnisse im Einzugsgebiet des Herrenbaches – Reutte / Tirol. Diplomarbeit, Institut für Geologie und Mineralogie Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Erlangen-Nürnberg.

ZIENKIEWICZ, O. C.; PANDE, G. N. (1977): Time Dependent Multilaminate Model of Rocks—A Numerical Study of Deformation and Failure of Rock Masses. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 1, pp. 219 – 247