

# Identifikation von konstitutiven und geometrischen Parametern für Böschungen unter besonderer Beachtung von Großhangrutschungen

Jörg Meier, Tom Schanz

Bauhaus-Universität Weimar

## ZUSAMMENFASSUNG :

*Im Rahmen der messtechnischen Überwachung von Böschungen aller Größenklassen fallen eine Vielzahl von Messwerten an der Böschungsoberfläche an. Diese erlauben jedoch i. d. R. keine direkten Rückschlüsse auf die Verhältnisse im Untergrund. Insbesondere für weiterführende Entscheidungen und auch numerische Simulationen sind solche Informationen unverzichtbar. Durch die Anwendung von Parameteridentifikations- und Optimierungsstrategien soll ein Ansatz vorgestellt werden, welcher das Potential bietet, auch derartige Aussagen zu treffen.*

*Ausgehend von einem kurzen Überblick über die verwendeten Optimierungsverfahren soll am Beispiel eines numerischen Experiments die Möglichkeit der Identifikation einer Schichtgrenze bzw. eines Verwitterungshorizontes in einer Böschung diskutiert werden. Weiterführend wird der Stand der Arbeiten für die Anwendung dieser Technik auf reale Böschungen vorgestellt.*

## ABSTRACT:

*In practice when monitoring slopes of different sizes a huge number of data is accumulated but it relates usually only to the surface measurements. Therefore in most of the case there is a lack of knowledge after direct measurements about the slope properties in depth. However in taking decisions or making predictions based on numerical simulations that have sense for the engineering or environmental applications, the possession of information about the slope properties in depth is indispensable. For gaining such knowledge inverse modeling and optimization procedures are well acknowledged. In the present article a critical overview of existing optimization procedures is presented and a numerical experiment is performed in order to evaluate the possibility to identify the sliding boundary, respectively the weathered zone in a given slope. Discussion on the actual stage of the work and the application of the method to real slope problem is also presented.*

## 1 Motivation

Aufgrund der zunehmenden Nutzung von Flächen in den Mittel- und Hochgebirgen gehören die Beurteilung, Planung und Überwachung von Böschungen bzw. Hängen verstärkt zu den Aufgaben der Geotechnik. Unter diesen breit gefächerten Themenkomplex fallen sowohl die künstlichen Böschung für Verkehrsprojekte und sonstige Nutzbauten als auch die vielerorts beobachtbaren Großhangrutschungen. Für diese Aufgabenstellungen werden in zunehmendem Maße numerische Modelle, wie z. B. der FEM oder FDM, genutzt. Gleichzeitig ergibt sich jedoch bei dem Einsatz dieser Werkzeuge der Bedarf an Werten für die verschiedenen Modellparameter, von rein konstitutiven Kennwerten bis hin zu geometrischen Angaben.

Zur Gewinnung dieser Daten stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Zum einen können diese durch Messungen aus Feld- und Laborversuchen gewonnen werden, was jedoch einen erheblichen finanziellen und zeitlichen Aufwand bedeutet. Zum zweiten kann auf ggf. vorhandene „Erfahrungswerte“ und Werte aus der Literatur zurückgegriffen werden, die jedoch oftmals als zu ungenau anzusehen sind. Als dritte Möglichkeit bietet sich die indirekte Ermittlung durch inverse Verfahren an. Diese Optimierungsverfahren versuchen, durch die iterative Anpassung von Modellparametern einer als „Vorwärtsrechnung“ bezeichneten Simulation eine möglichst gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit Messwerten zu erlangen. Der sich über Fachbereichsgrenzen immer weiter verbreitende Einsatz der inversen Methoden zur Bestimmung von Modellparametern spiegelt sich auch in der verfügbaren Fachliteratur wieder: es finden sich eine Vielzahl von Beiträgen beispielsweise für die Themenbereiche Strukturanalyse (z. B. MATOUŠ et al. 2000), Strömungsmechanik (z. B. JEONG 2003), Hydrogeologie (z. B. CARRERA et al. 2005), Maschinen- und Automobilbau (z. B. FLEISCHER & BROOS 2004, FLORES SANTIAGO & BAUSINGER 1998), Geotechnik (z. B. SCHANZ et al. 2006, CUI & SHENG 2006) und viele weitere.

## 2 Grundlagen der Optimierung

Im Allgemeinen wird der dem Fachgebiet der angewandten Mathematik entstammende Prozess der iterativen Suche nach den „günstigsten“ Werten der Parameter einer Vorwärtsrechnung („Lösungsvektor“) als Optimierung bezeichnet. Wie in Abb. 1 dargestellt, wird die Güte eines Parametersatzes i. d. R. mit Hilfe einer Zielfunktion bestimmt, welche in Abhängigkeit von den Referenzdaten und den Ergebnissen der aktuellen Vorwärtsrechnung eine reelle Zahl, den Zielfunktionswert (auch: „Gütwert“), errechnet. Einem Parametervektor kann somit eindeutig ein Zielfunktionswert zugeordnet werden.

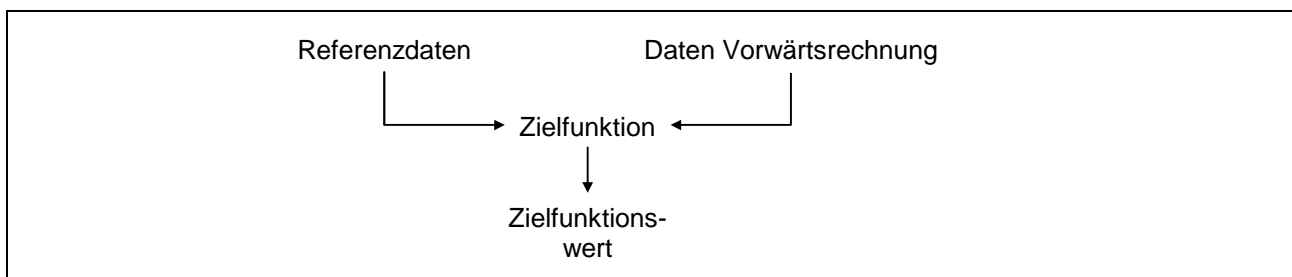


Abb. 1: Schema der Berechnung eines Zielfunktionswertes

Eng verbunden mit der Optimierung ist der Begriff der Sensitivitätsanalyse. Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wird ausgehend von einem vorzugebenden Parametervektor die Änderung des Funktionswertes in Relation zu den Modifikationen der Werte der Eingangsparameter gesetzt. Aufgeschlüsselt nach den Parametern kann so in der näheren Umgebung des vorgegebenen Parametervektors ein Subset von sensitiven Parametern ermittelt werden. So können mit diesem

Werkzeug Parametersätze vor einer Optimierung bestimmt und indifferente oder voneinander abhängige Parameter aus einer Parameterauswahl entfernt werden. Weiterhin nutzen verschiedene Optimierungsalgorithmen Techniken der Sensitivitätsanalyse (siehe SCHWARZ 2001).

Durch den für jeden der  $n$  Parameter der zu optimierenden Vorwärtsrechnung vorgegebenen Definitionsbereich wird ein  $n$ -dimensionaler Suchbereich  $\Omega$  aufgespannt. Die Suche nach dem Optimum kann somit als Extremwertsuche innerhalb dieses Gebietes umschrieben werden. Die Gesamtheit aller Zielfunktionswerte innerhalb des Suchbereichs wird als Zielfunktionstopologie bzw. Zielfunktionshyperfläche bezeichnet. Abb. 2 zeigt schematisch die Darstellung der Zielfunktionshyperfläche in Abhängigkeit zweier zu identifizierender Eingangsgrößen (Parameter  $x_1$ , Parameter  $x_2$ ).

Aus mathematischer Sicht kann von einem lokalen Extremwert gesprochen werden, wenn für den Lösungsvektor  $x^*$  in der Umgebung  $U$  der Zielfunktion  $f: \Omega \rightarrow R$  Gleichung (1) bzw. (2) gilt. Entspricht der Suchbereich  $\Omega$  der Umgebung  $U$ , so handelt es sich bei  $x^*$  um einen globalen Extremwert. Gleiches gilt, falls der Suchbereich  $x^*$  enthält und vollständig in  $U$  liegt. (BOYD & VANDENBERGHE 2006, CONNOR 1976, PRESS et al. 1992)

$$f(x^*) \leq f(x), \forall x \in U \text{ für ein lokales Minimum von } f \text{ in } U \quad (1)$$

$$f(x^*) \geq f(x), \forall x \in U \text{ für ein lokales Maximum von } f \text{ in } U \quad (2)$$

Hierbei kann jedoch eine Untermenge  $X^*$  von  $U$  den gleichen Funktionswert  $f(x^*)$  aufweisen. Somit liegt für alle  $f(x) = f(x^*)$  keine eindeutige Lösung vor. Von einem eindeutigen Extremwert kann nur gesprochen werden, wenn der Funktionswert  $f(x^*)$  ausschließlich für den Lösungsvektor  $x^*$  zu finden ist.

Allgemein ist die Existenz eines Optimums oder einer optimalen Lösungsmenge dann gesichert, wenn  $\Omega$  endlich oder  $f(x)$  stetig und ein  $\Omega$  kompakter topologischer Raum ist (Analysis: Satz von HEINE-BOREL). Von einem endlichen  $\Omega$  kann beispielsweise dann ausgegangen werden, wenn alle zu bestimmenden Parameter ganzzahlig oder boolesch sind. Da für die meisten in der Praxis vorkommenden Optimierungsaufgaben weder die Endlichkeit von  $\Omega$  noch die Stetigkeit von  $f(x)$  vorauszusetzen ist, kann nicht von einer grundsätzlichen Existenz eines Optimums ausgegangen werden. In der Praxis kann jedoch oft von bereits gelösten Aufgabenstellungen auf aktuelle Probleme geschlossen werden und dieses Wissen durch numerische Experimente abgesichert werden.

Erschwerend für eine Optimierung kann eine Zielfunktion durch Rauigkeiten überlagert werden. Quellen für solche Störgrößen können beispielsweise numerischen Ungenauigkeiten der Vorwärtsrechnung, Rundungsfehler bei der Übergabe der Werte zwischen Simulation und Optimierungsalgorithmus als auch die Zielfunktion selbst sein. Suchalgorithmen wie auch Zielfunktionen, die ohne ein Rauschen hervorragende Ergebnisse liefern, können durch diesen Effekt vollständig unbrauchbar werden. Scheinbare lokale Extremwerte und fehlerhafte Sensitivitäten bzw. Gradienten sind häufige Folgeerscheinungen. (BUI et al. 2005, MILLER 1997, POLHEIM 1999)

Das grundlegende Ablaufschema der Optimierungsalgorithmen kann Abb. 3 entnommen werden. Nach der Vorgabe von Startparametern ruft der Optimierungsalgorithmus die Vorwärtsrechnung ein oder mehrere Male auf und extrahiert die relevanten Daten nachfolgend. Durch den Vergleich mit vorgegebenen Soll- bzw. Referenzwerten durch die Zielfunktion wird der zugehörige Zielfunktionswert errechnet. Auf der Basis dieses Gütewertes wird durch den Algorithmus ein neuer Satz von Berechnungsparametern festgelegt und ein weiterer Optimierungszyklus begonnen. Alternativ kann bei der Erfüllung eines Abbruchkriteriums die Schleife verlassen werden.

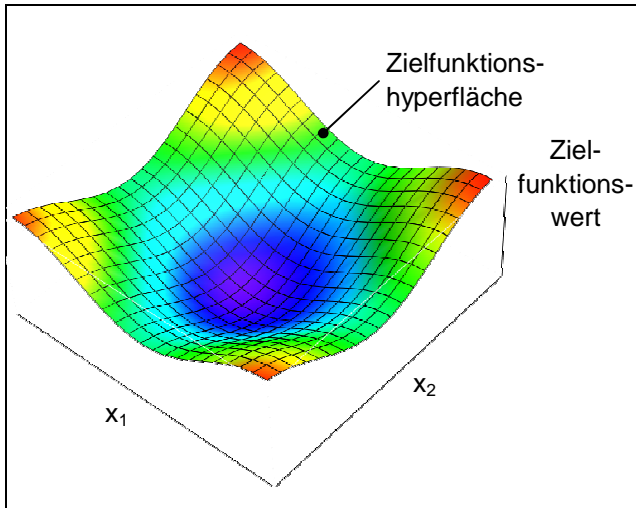


Abb. 2: Schema der Darstellung einer Zielfunktionstopologie für eine zwei-dimensionale Aufgabenstellung

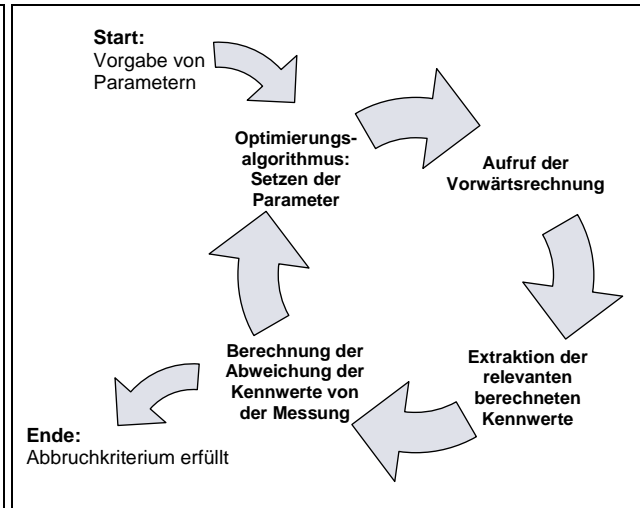


Abb. 3: grundlegendes Ablaufschema der Optimierung

Die verschiedenen aus der angewandten Mathematik bekannten Optimierungsalgorithmen lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- *Einfache Verfahren:* Zu den einfachen Methoden zählen Verfahren, die zur Findung des gesuchten Extremwertes die bisher bestimmten Lösungen der Abweichungsfunktion nicht einbeziehen. Beispiele sind die Rasterverfahren, das Monte-Carlo-Verfahren und das Latin-Hypercube-Verfahren (MCKAY et al. 1979, KOLLIG & KELLER 2002). Bei diesen Verfahren wird für eine vorher bestimmte Anzahl von Parameterkombinationen die Abweichung bestimmt und die „beste“ Kombination als Ergebnis geliefert. Diese Methoden eignen sich nur bei einer geringen Anzahl von Parametern.
- *Gradientenbasierende Verfahren:* Bei den Gradientenmethoden wird versucht, für die aktuelle Parameterkombination den Änderungsvektor zu finden, der zu einer möglichst „guten“, d. h. geringen Abweichung in der näheren Umgebung führt. Diese Methoden zeichnen sich besonders bei einer großen Anzahl von Parametern (in der Nähe der globalen Lösung) durch eine geringere Anzahl von Aufrufen aus, zudem nahezu jeder Aufruf zu einer „Verbesserung“ der aktuellen Position führt. Nachteile zeigen diese Verfahren bei „rauen“ Zielfunktionen, da sie ggf. in lokalen Senken „hängen bleiben“ können.
- *Populationsbasierende Verfahren:* Populationsbasierende Verfahren nehmen Anleihen in der Natur. Diese Algorithmen nutzen eine definierte Anzahl von unabhängigen Parametersätzen („Individuen“ bzw. „Partikel“) innerhalb eines Optimierungszyklus, die i. d. R. einmal pro Zyklus Informationen gemäß einem vorgegebenen Regelsatz austauschen dürfen. Beispiele für diese Verfahrensklasse sind evolutionäre Algorithmen, genetische Verfahren und Partikel-Schwarm-Methoden. Vorteile dieser Verfahrensklasse sind gewöhnlich gute Parallelisierbarkeit und hohe Robustheit gegenüber Rauigkeiten und fehlgeschlagenen Vorwärtsrechnungen.

### 3 Inverse Bestimmung der Lage einer Trennfläche in einer Böschung

Als erste Aufgabenstellung wurde, im Sinn eines numerischen Experiments, die Fußentlastung eines Hanges gewählt. In Abb. 4 sind die geometrischen Parameter des Modells und die Lage von zwei



## Zielfunktion

Zur Bewertung der durch eine Vorwärtsrechnung erreichten Lösung in Bezug auf die Referenzdaten („Messungen“ der Inklinometer) wurde in Anlehnung an die Methode der kleinsten Quadrate die in Gleichung (3) dargestellte Zielfunktion verwendet. Diese vergleicht die während eines definierten Zeitintervalls (Berechnungsschrittes) an  $q$  vorgegebenen Punkten auftretenden Verschiebungen  $u_{p,x,calc}$  der Vorwärtsrechnung mit den Referenzwerten  $u_{p,meas}$  für den Parametervektor  $x$ .

$$F(x) := \sqrt{\frac{1}{q} \sum_{p=1}^q (u_{p,x,calc} - u_{p,meas})^2} \quad (3)$$

Auf die Verwendung einer komplexeren Zielfunktion (Berücksichtigung von Wichtungsfunktionen, siehe MALECOT et. al. 2004) wurde verzichtet.

Im Rahmen dieses Beispiels wurden folgende Punktmengen für die Bestimmung der Abweichung untersucht:

- Alle Knotenpunkte entlang beider Inklinometer
- Knotenpunkte jeweils am Kopf der beiden Inklinometer

## Inverse Parameterbestimmung: Materialmodell Mohr-Coulomb

Die Parameter der einzelnen Modellbereiche für das Materialmodell Mohr-Coulomb können Tab. 1 entnommen werden. Abb. 6 zeigt die aus der Fußentlastung resultierenden Verschiebungen der Referenzsimulation („Messdaten“).

Tab. 1: Materialparameter der Referenzsimulation (Materialmodell: Mohr-Coulomb)

Parameter	Einheit	Wert	Suchbereich
<b>Hang (Mohr-Coulomb)</b>			
Dichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2200	
E-Modul an der GOK $E_{GOK}$	[N/m <sup>2</sup> ]	1,00E+08	
E-Modul an der Schichtgrenze $E_{Schichtgrenze}$	[N/m <sup>2</sup> ]	7,00E+08	5,00E+08 ... 1,00E+09
Querdehnungszahl $\nu$	[-]	0,3	
innerer Reibungswinkel $\varphi$	[°]	30,0	25 ... 35
Kohäsion $c$	[N/m <sup>2</sup> ]	1,00E+04	
Teufenlage der Schicht $t$	[m]	12,50	7,5 ... 17,5
<b>Fußschüttung (Elastisch)</b>			
Dichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2200	
E-Modul $E$	[N/m <sup>2</sup> ]	7,00E+09	
Querdehnungszahl $\nu$	[-]	0,3	

Das E-Modul des Hangs an der Schichtgrenze, die Teufenlage der Trennfläche und der innere Reibungswinkel des Hangs wurden als Parameter für eine Identifizierung bzw. Optimierung ausgewählt. Die Zahlenwerte dieser Parameter sollten auf der Basis einer Referenzsimulation zurückgewonnen werden (Tab. 1). Abb. 7 zeigt eine Visualisierung der Zielfunktionstopologie auf der Basis eines 8 x 8 x 8 - Rasters für einen inneren Reibungswinkel  $\varphi$  von 28°. Die Zielfunktion auf der Basis der Kopfpunkte der Inklinometer (Abb. 7b) weist einerseits einen weitaus größeren Wertebereich [5,8686E-02...3,2861E-08] als auch eine höhere Rauigkeit gegenüber der Zielfunktion auf der Basis aller Messwerte (Abb. 7a; Wertebereich [3,9141E-03...1,9151E-08]) auf. Das gesuchte Minimum mit den Koordinaten ( $E_{Schichtgrenze} = 7,001E+008$  N/m<sup>2</sup>;  $t = 12,49$  m;  $\varphi = 30,0^\circ$ ) wird mit

einem Particle-Swarm-Optimizer (EBERHARDT & KENNEDY 1995, KENNEDY & EBERHARDT 1995, SHI & EBERHART 1998a und 1998b, VAN DEN BERG 2001) mit 10 Individuen für den Fall, dass die Verschiebungsvektoren beider Inklinometer einbezogen werden, i. d. R. nach 35 bis 40 Berechnungsschritten sehr gut angenähert. Liegen für eine Optimierung nur die Vektoren an den beiden Ansatzpunkten vor, benötigt der PSO ca. 50 bis 55 Berechnungsschritte. Bei der Nutzung der Daten des Ansatzpunktes nur eines Inklinometers konnte keine verlässliche inverse Bestimmung der gesuchten Koordinaten durchgeführt werden, da aufgrund der Rauigkeit und damit auftretenden Nebenminima keiner der zur Verfügung stehenden Optimierungsalgorithmen reproduzierbar erfolgreich das Optimum fand.

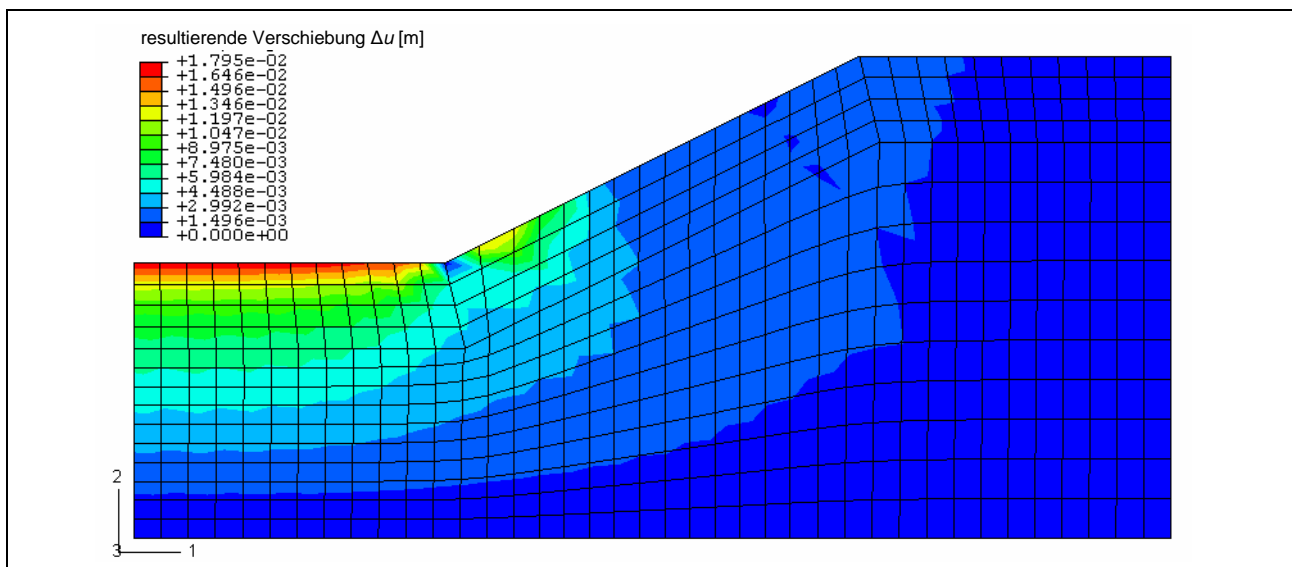


Abb. 6: Visualisierung der resultierenden Verschiebungen für die Entfernung der Fußschüttung der Referenzsimulation mit dem Materialmodell Mohr-Coulomb

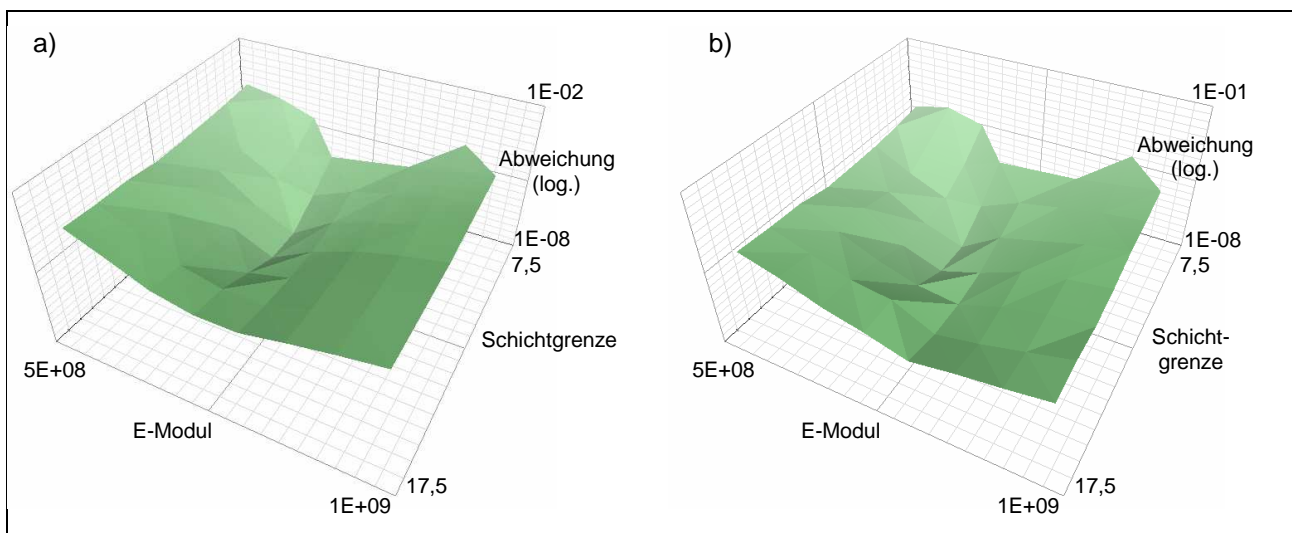


Abb. 7: Visualisierung der Ergebnisse der Optimierung mit dem Materialmodell Mohr-Coulomb für  $\varphi = 28^\circ$  (a: alle Messwerte; b: Ansatzpunkte Inklinometer)

Tab. 2: Vergleich des Berechnungsaufwandes zur Bestimmung des Optimums (Materialmodell: Mohr-Coulomb, Verfahren: Particle-Swarm-Optimizer)

Basisdaten	Berechnungsschritte	Funktionsaufrufe
alle Verschiebungsvektoren beider Inklinometer	35...40	350...400
Verschiebungsvektoren am Kopf beider Inklinometer	50...55	500...550

## 4 Inverse Behandlung einer Großhangrutschung

Als zweite Aufgabenstellung wurde ein numerisches Experiment auf der Basis von geologischen und geometrischen Daten eines instabilen Hanges in Österreich gewählt. Das Gebiet Hornbergl „Fauler Schrofen“ mit dem Murenbach befindet sich wie in Abb. 8 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 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: (ALBRECHT 1999)

- 7 große Mureneignisse mit schweren Schäden im Siedlungsgebiet
- 1976: Felssturz am „Faulen Schrofen“ (ca. 100 000 m<sup>3</sup>)
- mehrere kleine Felsstürze
- mehrere kleine Murenabgänge

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. (Abb. 9) (ALBRECHT 1999, MEIER et al. 2005)

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 (Abb. 9).

Die numerische Modellierung auf der Basis des ingenieurgeologischen Modells des aktuellen Zustandes des Hanges wurde als „verschmierte“ Modellierung durchgeführt. 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.

In dem verwendeten Modell (Abb. 10) wurde auf die Modellierung der Allgäuschichten verzichtet und durch einen vertikal fixierten Rand ersetzt, da diese in diesem Bereich 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.

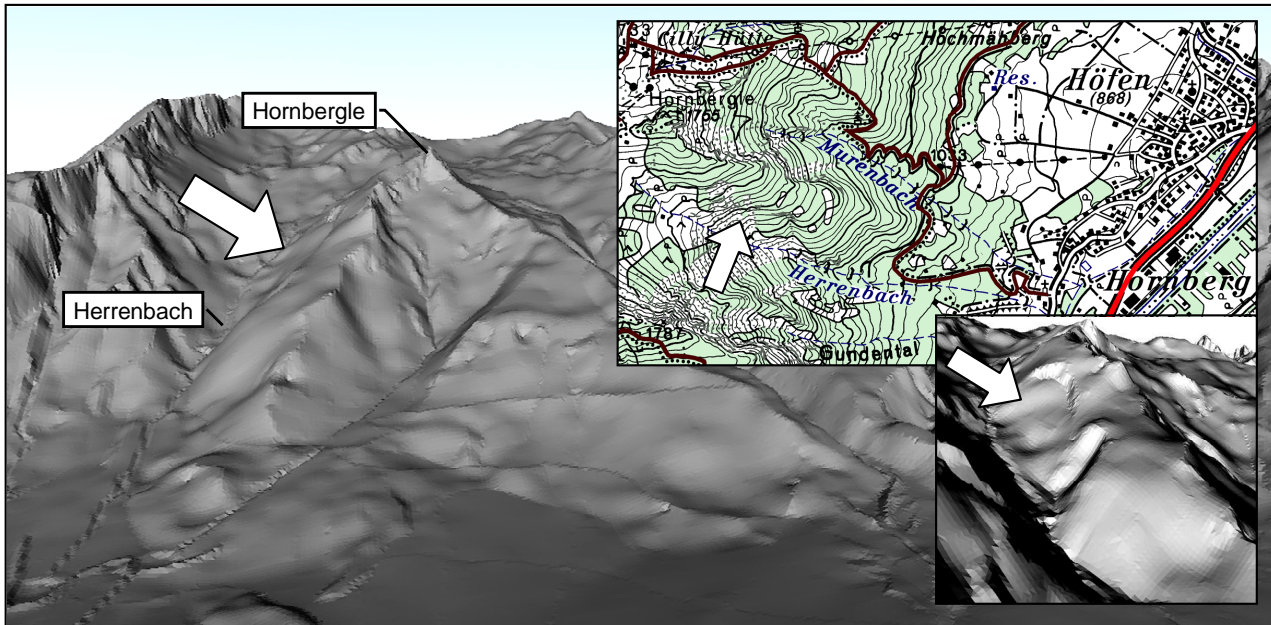


Abb. 8: Lage der Massenbewegung am „Faulen Schrofen“ bei Reutte/Tirol (3D-Oberflächenmodell mit topografischer Karte)

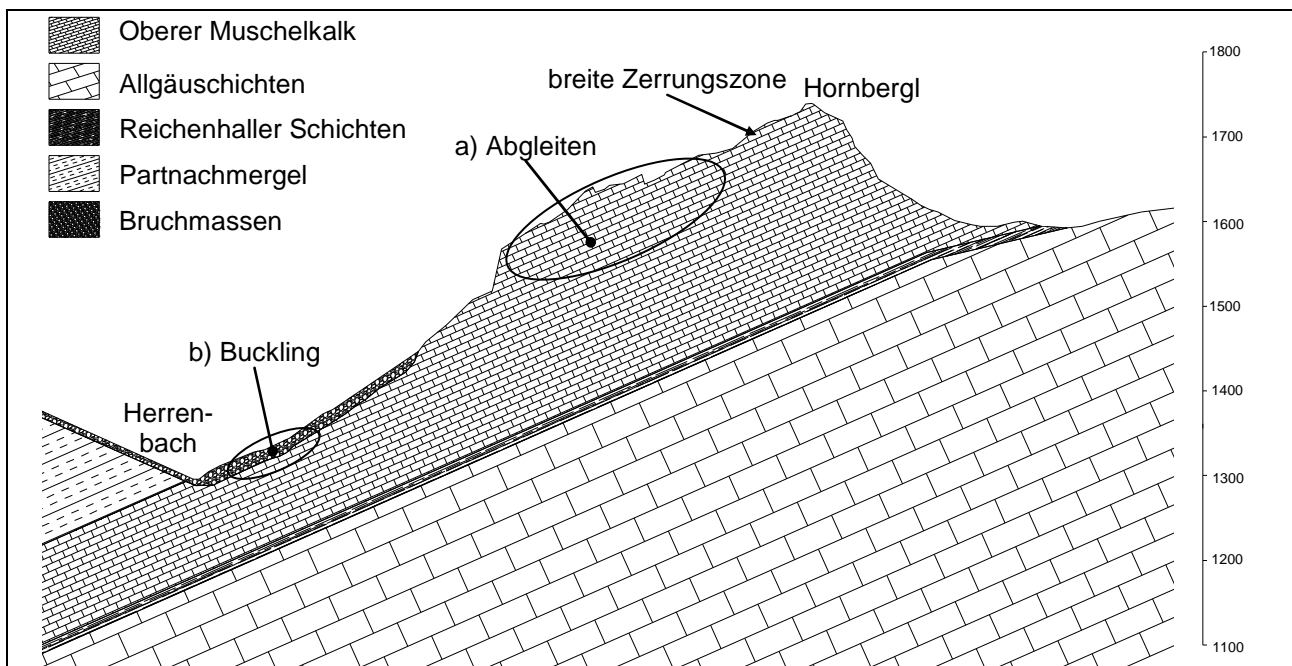


Abb. 9: Ingenieurgeologischer Schnitt im Bereich des Felssturzes von 1976

Resultierend aus den ingenieurgeologischen Aufnahmen und den Rahmenbedingungen des Modells wurden die Reichenhaller Schichten, die Partnachmergel, die tief liegenden Bereiche des Oberen Muschelkalks (ab einer Teufe von ca. 50 m) und der Bereich Hornbergl als ideal elastisch modelliert. Sowohl die Bruchmassen als auch die Zerrißungszone wurden durch das Materialmodell „Mohr-Coulomb“ wieder gegeben. Für die Modellierung der tagesnahen Bereiche 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. Dieses Materialmodell beschreibt ein elastisch - plastisches Materialverhalten und stellt ein einfaches Kontinuumsmodell dar, das bis zu drei Kluftscharen mit unterschiedlichen Richtungen enthalten kann. Eine Kluftschare wird aus einer Mehrzahl von Klüften mit einer bestimmten Orientierung gebildet, deren Abstände zueinander im Vergleich zu den Modell-

abmessungen sehr gering sind. Somit wird der Felsverband als verschmiertes Modell berechnet, das sowohl dem intakten Fels, der Matrix, als auch den Trennflächen Rechnung trägt. Das Materialverhalten der Matrix wird als isotrop elastisch angenommen. Das in Gleichung (4) gegebene Bruchkriterium  $f_a$  in der Trennfläche entspricht dem Mohr-Coulomb Kriterium.

$$f_a = \tau_a - p_a \cdot \tan \beta_a - d_a = 0 \quad (4)$$

mit:  $\tau_a$  Schubspannung in der Trennfläche a  
 $p_a$  Druckspannung in der Trennfläche a  
 $\beta_a$  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 „Kluftschar 1“ und die dazu senkrecht stehende „Kluftschar 2“. In Tab. 3 wurden die Materialparameter der Kluftscharen für das Materialmodell „Jointed Material“ und alle weiteren verwendeten konstitutiven Parameter 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 aufweist.

Im Rahmen eines einleitenden „geostatischen“ Berechnungsschritts (d. h. hydrostatischer Primärspannungszustand,  $K_0 = 1 - \sin\varphi$ ) bei einer vollständigen Fixierung des Modells vorgegeben und diese Fixierungen in 30 weiteren Schritten sukzessiv gelöst. Im Rahmen eines numerischen Experiments sollte die Abminderung ausgewählter konstitutiver Parameter des tagesnahen Oberen Muschelkalks in einem nachfolgenden Berechnungsschritt invers bestimmt werden. In der Referenzsimulation wurde hierzu der Elastizitätsmodul auf  $E_{low} = 7,0E+02 \text{ MN/m}^2$  und der Reibungs- und Dilatanzwinkel auf den Trennflächen um je  $10^\circ$  herabgesetzt.

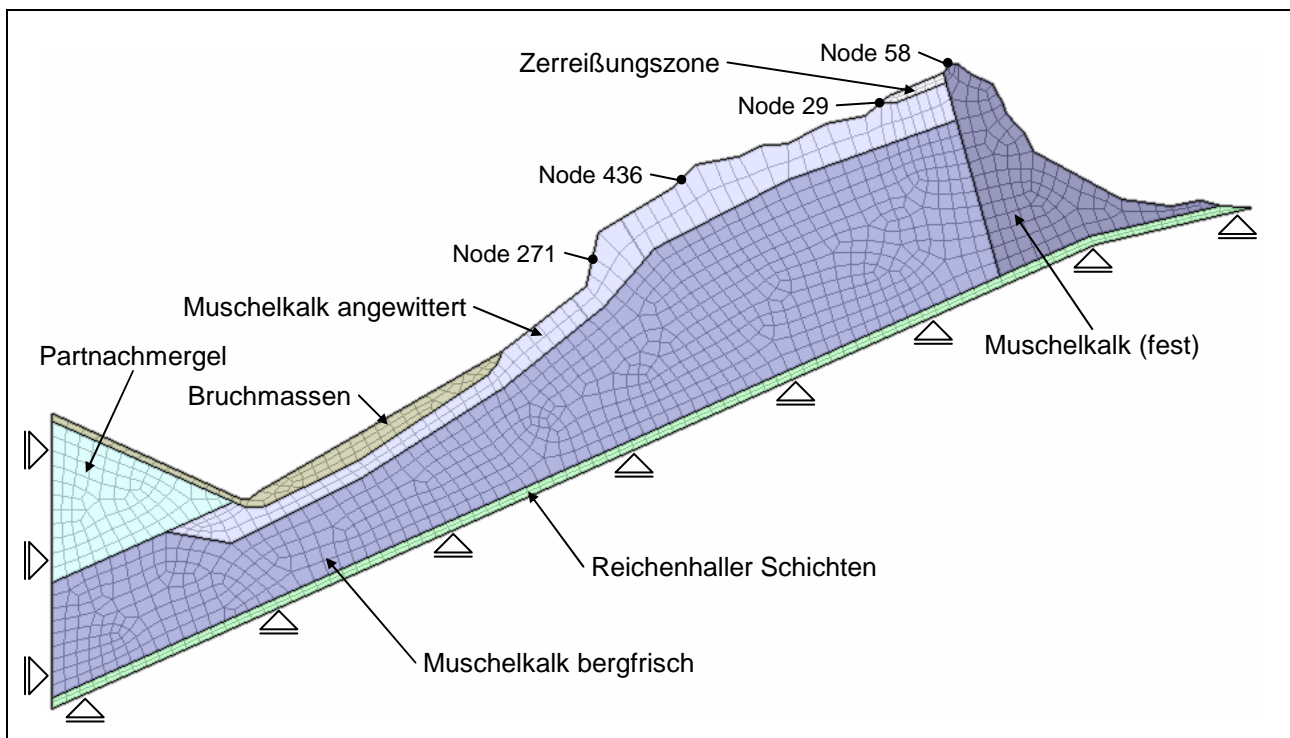


Abb. 10: Reutte: verwendetes 2D-Modell für ABAQUS/Standard

Tab. 3: Materialparameter des numerischen Modells Reutte (Erfahrungswerte)

Parameter		Wert
<i>Bruchmassen (Mohr-Coulomb)</i>		
Dichte $\rho$	[ ]	2200
E-Modul $E$	[ ]	5,0E+03
Querdehnungszahl $\nu$	[-]	0,3
Reibungswinkel $\varphi$	[°]	40
Dilatanzwinkel $\psi$	[°]	0
Kohäsion $C$	[kN/m <sup>2</sup> ]	10
<i>ZerreiBungszone (Mohr-Coulomb)</i>		
Dichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2600
Elastizitätsmodul $E$	[MN/m <sup>2</sup> ]	5,0E+03
Querdehnungszahl $\nu$	[-]	0,3
Reibungswinkel $\varphi$	[°]	40
Dilatanzwinkel $\psi$	[°]	5
Kohäsion $C$	[kN/m <sup>2</sup> ]	20
<i>Reichenhaller Schichten (Elastisch)</i>		
Dichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2200
Elastizitätsmodul $E$	[MN/m <sup>2</sup> ]	5,0E+04
Querdehnungszahl $\nu$	[-]	0,3
<i>Partnachmergel (Elastisch)</i>		
Dichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2600
Elastizitätsmodul $E$	[MN/m <sup>2</sup> ]	5,0E+04
Querdehnungszahl $\nu$	[-]	0,3
<i>Oberer Muschelkalk, bergfrisch (Elastisch)</i>		
Dichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2600
E-Modul $E$	[MN/m <sup>2</sup> ]	5,0E+04
Querdehnungszahl $\nu$	[-]	0,3
<i>Oberer Muschelkalk, angewittert (Jointed Material)</i>		
Dichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2600
Elastizitätsmodul $E$	[MN/m <sup>2</sup> ]	5,0E+03
Querdehnungszahl $\nu$	[-]	0,3
<i>Kluftschar 1 (hangparallel) / Kluftschar 2 (senkrecht zur Hangneigung)</i>		
Reibungswinkel $\varphi$	[°]	40 / 42
Dilatanzwinkel $\psi$	[°]	10 / 12
Kohäsion $C$	[kN/m <sup>2</sup> ]	350 / 400

Abb. 11 zeigt die aus der Herabsetzung des Elastizitätsmoduls und des Reibungswinkels resultierenden Verschiebungen der 2D-Berechnung für das beschriebene Modell. Es wird deutlich, dass die Verschiebungen für die Abminderung ausgewählter konstitutiver Parameter des tagesnahen Oberen Muschelkalks im Bereich der breiten Zerrungszone nahe dem Hornbergl ihr Maximum haben und dass lokal erhöhte Verschiebungsbeträge zwischen angewittertem Muschelkalk und Bruchmassen im unteren Bereich des Hanges auftreten. Weiterhin zeigt sich, dass die Verschiebungen über den Hang verteilt unterschiedliche Beträge aufweisen.

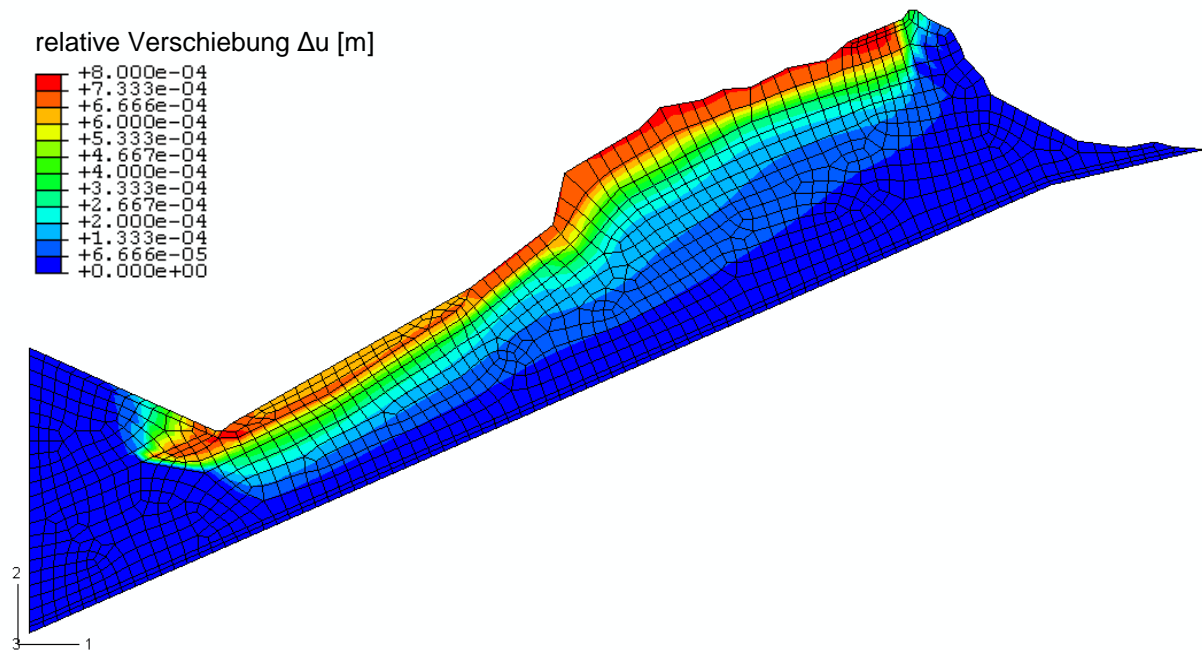


Abb. 11: Ergebnisse des 2D-Modells für ABAQUS/Standard

## Zielfunktion

Die bereits für die inverse Behandlung der Lage einer Trennfläche in einer Böschung (Abschnitt 3) verwendete Gleichung (3) wurde auch für dieses Beispiel genutzt. Auf der Basis der Verschiebungsvektoren der in Abb. 10 mit „Node 29“, „Node 58“, „Node 271“ und „Node 436“ gekennzeichneten Punkte wurden die Abweichung für die Abminderung der konstitutiven Parameter berechnet.

## Inverse Parameterbestimmung

Eine inverse Parameteridentifikation sollte die Zahlenwerte des herabgesetzten Elastizitätsmoduls  $E_{low}$  und des Reibungs- bzw. Dilatanzwinkels auf den Trennflächen der Referenzrechnung bestimmen. Der Suchbereich wurde für  $E_{low}$  mit  $[2,0E+02 \dots 5,0E+03 \text{ MN/m}^2]$  und für den Reibungswinkel  $\varphi$  mit  $[25^\circ \dots 40^\circ]$  vorgegeben. Der Dilatanzwinkel wurde gemäß der Beziehung  $\psi = \varphi - 30^\circ$  bestimmt (für  $\varphi < 30^\circ$  wurde  $\psi$  auf  $0^\circ$  festgesetzt). Abb. 12 visualisiert die Zielfunktions-topologie auf der Basis eines Rasterverfahrens. Mittels der bereits für das erste Beispiel verwendeten Particle-Swarm-Methode mit 10 Individuen konnte bereits nach 8 Berechnungsschritten (80 Aufrufe der Vorwärtsrechnung) ein  $E_{low}$  von  $7,14E+02 \text{ MN/m}^2$  und ein  $\varphi$  von  $30,1^\circ$  erreicht werden. Nach 18 Berechnungsschritten (180 Berechnungsaufrufe) wurden ein  $E_{low}$  von  $6,99E+02 \text{ MN/m}^2$  und ein  $\varphi$  von  $30,0^\circ$  ermittelt.

Probleme ergeben sich insbesondere bei niedrigen („ungünstigen“) Werten für den Reibungswinkel und das E-Modul, da für diese Parameterkombinationen nicht immer ein Equilibrium berechnet werden kann – oder die Bestimmung dieses eine überproportionale Anzahl von Iterationen und somit eine starke Zunahme der Berechnungszeit bedeutet. In dem hier vorgestellten Fall wurde diesem Effekt durch die Einführung eines niedrigen Stabilisierungsfaktors („dissipated energy fraction“, ABAQUS User Manual) gegengesteuert.

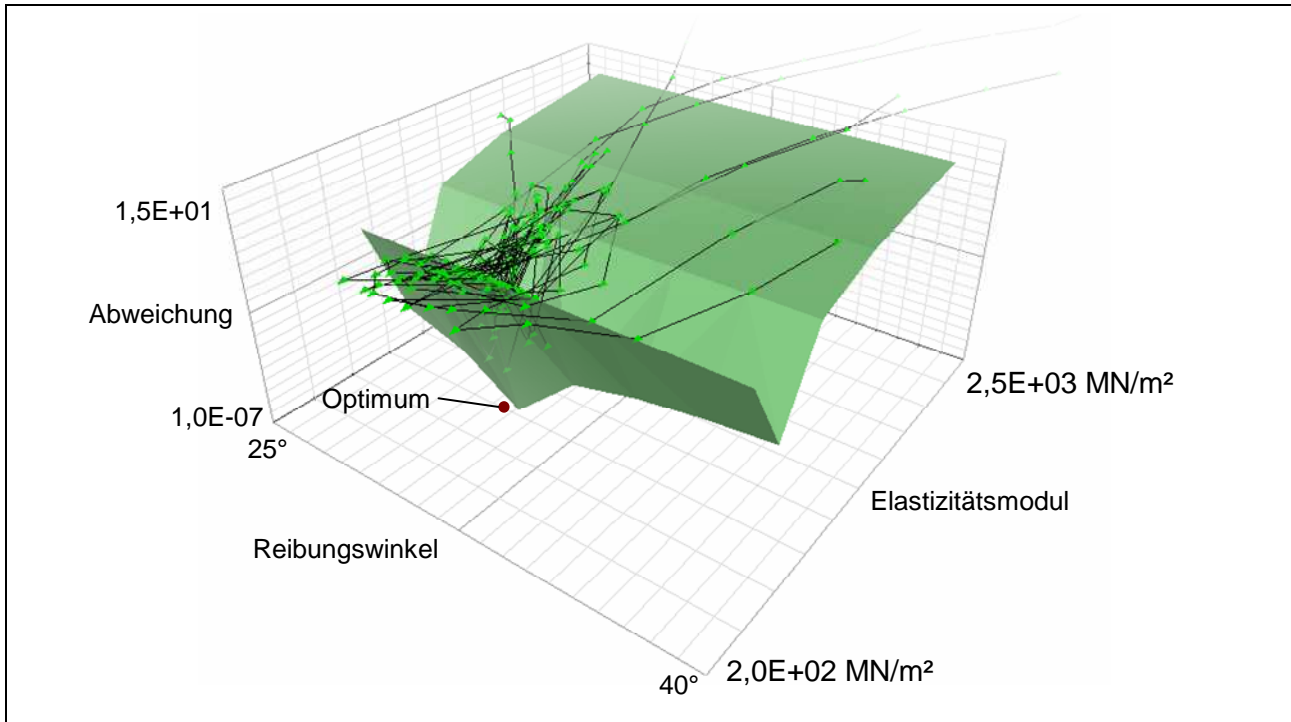


Abb. 12: Visualisierung der Zielfunktionstopologie und der Pfade der Particle-Swarm-Methode

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den inversen Verfahren steht eine leistungsfähige Klasse von Algorithmen zur Verfügung, um Parameterwerte von Simulationen zu kalibrieren. Am Beispiel zweier numerischer Experimente - der Fußentlastung einer Böschung und einer der Realität entlehnten Hangdeformation - konnte die Arbeitsweise der Optimierungsverfahren demonstriert werden. Hauptprobleme der inversen Behandlung dieser Aufgabenklasse sind nicht konvergierende Vorwärtsrechnungen, lange Berechnungszeiten der numerischen Simulationen und erhöhte Rauigkeiten der Zielfunktionstopologie.

Im Rahmen der weiteren Arbeit auf diesem Gebiet, soll versucht werden, reelle Messwerte als Referenzwerte für inverse Parameteridentifikationen zu verwenden. Hierbei muss besonderes Augenmerk auf die Fragestellung gelegt werden, ob die verwendeten Vorwärtsrechnungen in ausreichendem Maße die durch die Messwerte repräsentierten Vorgänge innerhalb der Hänge bzw. Böschungen wieder spiegeln.

## Danksagung

Der hier vorgestellte Artikel wurde im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes „Geomechanische Modellierung tiefgreifender Hangdeformationen“ ausgeführt. Die Autoren möchten sich für die Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Förderprogramms SCHA 675/11-2 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.

- VAN DEN BERG, F. (2001): An Analysis of Particle Swarm Optimizers. PhD thesis, University of Pretoria.
- BOYD, S.; VANDENBERGHE, L. (2006): Convex Optimization. Cambridge University Press.
- BUI, L. T.; ESSAM, D.; ABBASS, H. A.; GREEN, D. (2005): Performance analysis of evolutionary multi-objective optimization methods in noisy environments. ALAR Technical Report Series, University of New South Wales, Australia.
- CARRERA, J.; ALCOLEA, A.; MEDINA, A.; HIDALGO, J.; SLOOTEN, L. J. (2005): Inverse problem in hydrogeology. Hydrogeological Journal 13, Springer-Verlag, S. 206-222.
- CONNOR, J. J. (1976): Analysis of Structural Member Systems. Massachusetts Institute of Technology, The Ronald Press Company, New York.
- CUI, L.; SHENG, D. (2006): Genetic algorithms in probabilistic finite element analysis of geotechnical problems. Computers and Geotechnics 32, S. 555-563.
- EBERHARDT, R. C.; KENNEDY, J. (1995): A new optimizer using particle swarm theory. Proceedings of the Sixted International Symposium on Micro Machine and Human Science, S. 39 – 43, Nagoya, Japan, IEEE Service Center, Piscataway, NJ.
- FLEISCHER, J.; BROOS, A. (2004): Parameteroptimierung bei Werkzeugmaschinen – Anwendungsmöglichkeiten und Potentiale. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 1.0, Weimar
- FLORES SANTIAGO, O.; BAUSINGER, R. (1998): Automatische Schweißpunkt-Optimierung an Karosserien. XXV. FEM – Kongress, Baden-Baden
- JEONG, S.-J. (2003): Ein Beitrag zur Erzeugung nichtlinearer Entwurfsseegänge im numerischen Wellenkanal. Dissertationsschrift, Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, TU Berlin
- KENNEDY, J.; EBERHARDT, R. C. (1995): Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Volume IV, S. 1942 – 1948, Perth, Australia, IEEE Service Center, Piscataway, NY.
- KOLLIG, T.; KELLER, A. (2002): Efficient Multidimensional Sampling. Eurographics, Volume 21, Nr. 3.
- MALECOT, Y; FLAVIGNY, E.; BOULON, M. (2004): Inverse Analysis of Soil Parameters for Finite Element Simulation of Geotechnical Structures: Pressuremeter Test und Excavation Problem. R. B. J. Brinkgreve, H. Schad, H. Schweiger, E. Willand (Hsg.), Proc. Symp. Geotechnical Innovations, Glückauf Verlag, Essen. S. 659 – 675.
- MATOUŠ, K.; LEPŠ, M.; ZEMAN, J.; ŠEJNOHA, M. (2000): Applying genetic algorithms to selected topics commonly encountered in engineering practice. Computer methods in applied mechanics and engineering 190, Elsevier, S. 1629 – 1650.
- MCKAY, M. D.; CONOVER W. J.; BECKMAN R. J. (1979), “A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code”, Technometrics, 21, S. 239 - 245.
- MEIER, J.; SPICKERMANN, A.; RÜTZ, D.; MOSER, M.; SCHANZ, T. (2005): Geotechnisch - Numerische Modellierung der Massenbewegung am „Faulen Schrofren“ bei Reutte/Tirol. Tagungsband 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Erlangen
- MILLER, B. (1997). Noise, Sampling, and Efficient Genetic Algorithms. PhD thesis, Department of ComputerScience, Univeristy of Illinois at Urbana-Champaign.
- POLHEIM, H. (1999): Evolutionäre Algorithmen – Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis. Springer.

- PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T. (1992): Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press; 2. Auflage.
- SCHANZ, T.; ZIMMERER, M.; DATCHEVA, M.; MEIER, J. (2006): Identification of constitutive parameters for numerical models via inverse approach. Felsbau, Volume 25, No. 6
- SCHWARZ, S. (2001): Sensitivitätsanalyse und Optimierung bei nichtlinearem Strukturverhalten. Bericht Nr. 34, Institut für Baustatik, Universität Stuttgart.
- SHI, Y.; EBERHART, R. C. (1998a): Parameter Selection in Particle Swarm Optimization. Evolutionary Programming VII: Proc. EP98, New York: Springer-Verlag, S. 591-600.
- SHI, Y.; EBERHART, R. C. (1998b): A modified particle swarm optimizer. Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation, S. 69-73. Piscataway, NJ: IEEE Press.
- 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, S. 219 – 247