

Konzept zur Parameteridentifikation für numerische Modellierungen von Großhangrutschungen

Jörg Meier, Tom Schanz

Bauhaus-Universität Weimar, Professur für Bodenmechanik

ZUSAMMENFASSUNG:

Die numerische Modellierung von großräumigen Hangbewegungen zählt in zunehmendem Maße zu den regelmäßigen Aufgaben der Geotechnik im Bereich der Mittel- und Hochgebirge. Basis derartiger Untersuchungen ist in der Regel eine geodätische Messkampagne. Bei der Entscheidung für oder gegen eine zumeist kostenintensive und aufwändige Aufnahme von Geometrie- und Bewegungsdaten von instabilen Gebirgsbereichen, wie z. B. Großhangrutschungen, stellt sich oft die Frage der möglichst breiten Weiterverwendung. Neben der Darstellung der gemessenen Werte in Karten- und Reißwerk können Geometriedaten oft noch in einer numerischen Modellierung Verwendung finden. Die Daten der Zeitreihen der Bewegungsvektoren konnten bis jetzt in solchen Simulationen nicht direkt verwendet werden, da sie keine direkten Eingabeparameter darstellen. Ihre Anwendung war von diesem Standpunkt aus „nur“ auf den manuellen Vergleich mit den Modellierungsergebnissen beschränkt.

Ausgehend von einem kurzen Überblick über Optimierungsverfahren soll am Beispiel einer idealisierten Großhangrutschung die Anwendung inverser Ansätze zur Parameteridentifikation auf der Grundlage von Bewegungsvektoren dargelegt und diskutiert werden. Neben der Identifizierung relevanter Modellparameter wird die Vorgehensweise bei mehrdimensionalen Aufgabenstellungen geschildert und die Vor- und Nachteile verschiedener Algorithmen gegenüber gestellt.

ABSTRACT:

Numerical modelling of large slope movements' gains increasing attention and is an important part of the geotechnical assessments and predictions. Geotechnical analysis related to low and high mountain ranges rely basically on geodetic measurements. Such measurements are costly and time consuming and that is why it is of great interest that the extensive geodetic measurements and the obtained data in unstable mountain ranges are utilized in an optimum way to be used in further numerical simulations. Beside accounting for values recalculated from geodetic maps the geometry data can also be considered for the numerical modelling.

Time series of deformation vectors are rarely used in computer simulations, because they do not belong to standart sets of input parameters. The usage of time series is limited to the manual comparison with the results of the numerical model. Starting with short overview of optimization procedures we present an inverse parameter identification procedure based on the slope movement vectors data and apply it to a fictitious large slope movement problem. The results and the used procedure are discussed in details. Advantages and disadvantages of different optimization algorithms as well as discussion on the multidimensional problems and their application are also addressed.

1 Motivation

Durch die Verwendung von unterschiedlichen numerischen Verfahren im Bereich von geotechnischen Problemstellungen (in der Regel handelt es sich um FE- und FD-Methoden) bietet sich die Möglichkeit, auch extrem komplexe Anfangsrandwertprobleme zu bearbeiten. Mit den verfügbaren Werkzeugen ergeben sich jedoch Schwierigkeiten, die – wie so oft – im Detail zu Tage treten: Zum Beispiel wird bei der Erstellung numerischer Modelle immer wieder die Fragestellung angetroffen, welche Zahlenwerte für die betreffenden Modellparameter einzusetzen sind. Neben der nur selten durchführbaren, zeitaufwändigen und teuren Möglichkeit, die Parameter über Bohrungen und / oder oft komplexe Laborversuche zu ermitteln, soll in diesem Artikel ein Beitrag zu der Möglichkeit der inversen Bestimmung von Modellparametern erbracht werden. Ziel ist es, bestehende Parametersätze unter Zuhilfenahme von Messwerten automatisiert an ein spezielles Modell anzupassen und zu verbessern. Generell sollte bei der Planung einer Inversion darauf geachtet werden, das verwendete „Vorwärtsmodell“ so einfach wie möglich und dabei so kompliziert wie nötig zu formulieren. Dies betrifft insbesondere die Ordnung bzw. Komplexität der konstitutiven Ansätze.

2 Grundlagen

2.1 Einführung

Ausgangspunkt einer jeden Parameteridentifikation ist eine „normale“ Modellierung (die so genannte „Vorwärtsrechnung“) mit einem Satz notwendiger Modellparametern, wie z.B. Materialkennwerten und geometrischen Abmessungen. Die Ergebnisse einer solchen Berechnung werden i. d. R. manuell mit Messwerten verglichen, ggf. angepasst und die Berechnung erneut ausgeführt. Dieser zeitaufwändige Vorgang („trial and error“-Verfahren) kann durch die hier vorgestellten Verfahren automatisiert werden.

Das Flussdiagramm in Abb. 1 zeigt die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Parameteridentifikation. Im Vergleich zu der manuellen Festlegung der Parameter trifft hier – ausgehend von „geeigneten“ Schätz- bzw. Startwerten am Beginn der Optimierung – ein Optimierungsalgorithmus die Entscheidung für die Zahlenwerte des nächsten Durchlaufes. Nach der Festlegung des neuen Parametersatzes, bei dem ein oder auch mehrere Werte gleichzeitig geändert werden können, wird automatisch eine weitere Vorwärtsrechnung durchgeführt. Durch den Vergleich der Ergebnisse der Simulation mit den vorgegebenen Messwerten kann nun eine Abweichung vom (unbekannten) optimalen Parametersatz errechnet werden („Zielfunktionen“), indem z. B. im einfachsten Fall für die Zeitverläufe der Messreihe und der Simulation die Methode der kleinsten Quadrate angewendet wird. Auf der Basis dieses Zahlenwertes in Verbindung mit dem zugrunde liegenden Parametersatz kann durch den Optimierungsalgorithmus ein neuer verbesserter Parametersatz festgelegt werden.

Dieser Zyklus, d. h. diese iterative Vorgehensweise, kann durch verschiedene Abbruchkriterien gestoppt werden, u.a.:

- Die errechnete Abweichung liegt unterhalb eines vorgegebenen Grenzwertes.
- Die errechnete Abweichung konnte seit einer anzugebenden Anzahl von Zyklen nicht gesenkt werden.
- Eine vorgegebene maximale Anzahl von Zyklen und/oder eine vorgegebene Zeitspanne wurden erreicht.

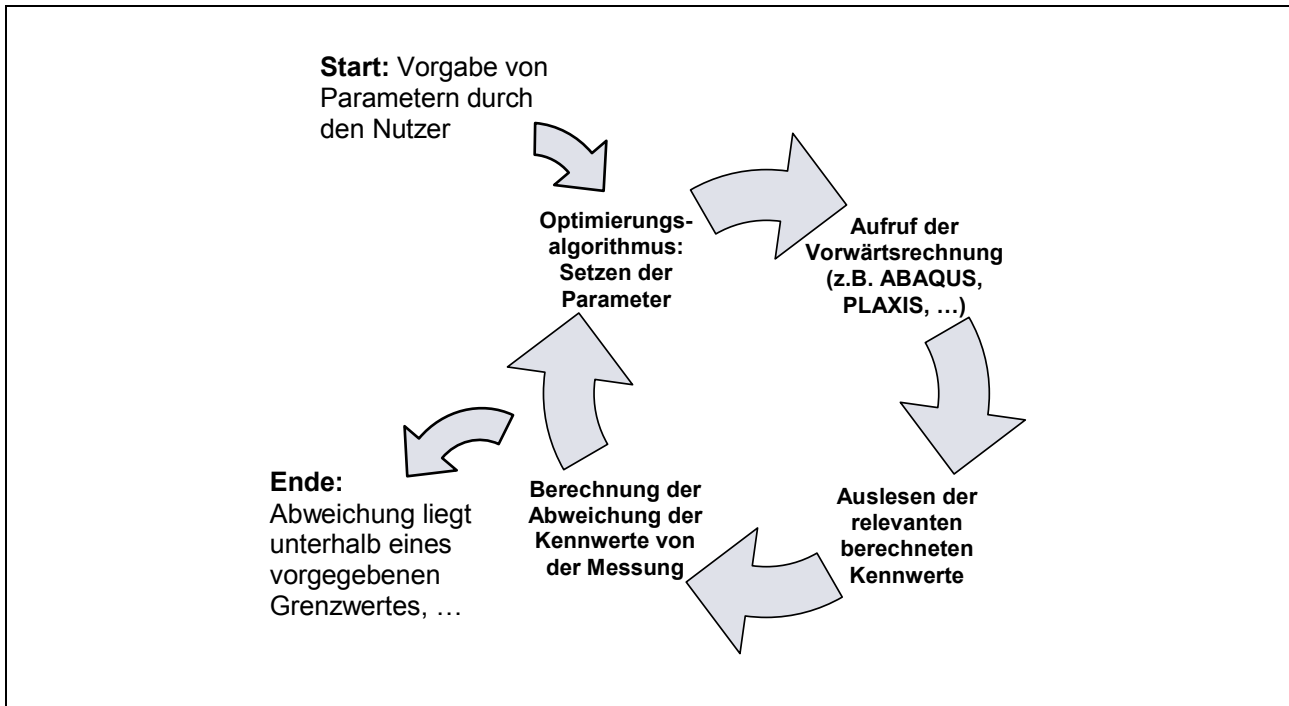


Abb. 1: Vorgehensweise im Rahmen der Parameteridentifikation

Bei der Durchführung einer Parameteridentifikation werden somit folgende Schritte ausgeführt:

1. Erstellung (Konzept und Implementierung) einer „normalen“ Vorwärtsrechnung und Optimierung deren Laufzeit.
2. Auswahl der zu identifizierenden Parameter mit ihren Grenzwerten und ggf. Vorbereitung der Vorwärtsrechnung auf die Parameteridentifikation. Zur Ermittlung der maßgeblichen Parameter ist eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen.
3. Ausgewählte Parameter sollten unter Zuhilfenahme von „Vorwissen“ fixiert werden.
4. Erstellung eines Algorithmus zur Errechnung der Abweichung aus den Messwerten und den Ergebnissen der Vorwärtsrechnung, d.h. Definition der Zielfunktion. Dies beinhaltet ggf. die Wichtung unterschiedlicher Parameter bzw. beim Vorliegen hochgradig nichtlinearer Probleme die Regularisierung der Optimierungsstrategie.
5. Auswahl eines Optimierungsalgorithmus und Start der Optimierung

Die manuelle Optimierung der Vorwärtsrechnung auf eine möglichst kurze Laufzeit ist nötig, da – abhängig vom Modell, dem verwendeten Optimierungsalgorithmus und der Anzahl der zu identifizierenden Parameter – der Zyklus sehr oft durchlaufen werden muss.

In einer durch die Autoren verfassten Software ist das beschriebene Vorgehen mit den Abbruchkriterien und verschiedenen Optimierungsalgorithmen verfügbar. Weiterhin wurden Schnittstellen zu verschiedenen kommerziellen Programmpaketen wie z. B. ABAQUS und PLAXIS geschaffen, um die Einbindung von unterschiedlichen Vorwärtsrechnungen möglichst einfach und benutzerfreundlich zu gestalten.

2.2 Optimierungsalgorithmen

Einer der Schlüsselpunkte der in Abschnitt 2.1 vorgestellten Vorgehensweise sind die Optimierungsalgorithmen. In der Literatur wird eine Vielzahl solcher Berechnungsansätze beschrieben

(z. B. Nelder & Mead, Davidon, Pohlheim, ...), so dass hier nur ein kurzer Überblick über die verschiedenen Klassen gegeben werden soll, der keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Einfache Methoden

Zu den einfachen Methoden zählen die Rasterverfahren und das Monte-Carlo-Verfahren. Bei beiden Verfahren wird für eine vorher bestimmte Anzahl von Parameterkombinationen die Abweichung bestimmt und die „beste“ Kombination als Ergebnis geliefert, wobei sich beide Methoden nur bei einer geringen Anzahl von Parametern eignen.

Bei den Rasterverfahren wird der Werteraum jedes Parameters gleichmäßig schrittweise abgesucht. Nach einem Durchgang kann im Bereich der „besten“ Lösung rekursiv ein weiterer Durchlauf durchgeführt werden. Bei zyklischen bzw. gebietsweise zyklischen Funktionen können die Rasterverfahren unter Umständen ähnlich dem aus der Physik bekannten Moiré-Effekt versagen.

Bei dem Monte-Carlo-Verfahren werden die Werte des Parametersatzes zufällig gewählt. Durch diesen Umstand ist diese Methode gegenüber zyklischen Funktionen als unproblematisch einzustufen. Als Besonderheit ist hervorzuheben, dass kein Durchlauf aufgrund der an eine Zufallsfunktion geknüpften Parameterbestimmung exakt reproduzierbar ist.

Gradientenmethoden

Bei den Gradientenmethoden wird versucht, für die aktuelle Parameterkombination den Änderungsvektor zu finden, der zu einer möglichst „guten“ Abweichung in der näheren Umgebung führt. Diese Methoden lassen sich gut mit einer Kugel auf einer hügeligen Oberfläche vergleichen, die immer entgegen der Richtung des größten Anstieges rollt. 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.

Evolutionäre Methoden

Evolutionäre Methoden lassen sich als stochastische Suchverfahren klassifizieren. Der Name und das Prinzip der evolutionären Methoden leiten sich von dem Evolutionsbegriff in der Biologie ab. Es werden pro Zyklus für eine bestimmte Anzahl von Parametersätzen („Individuen“ → „Population“) die Abweichungen berechnet und nach vorgegebenen Regeln die neue Population erstellt. Hier finden die Konzepte der Evolution Anwendung (Selektion, Mutation, Crossing-Over, ...). Der Ergebnisparametersatz wird in der jeweiligen Population durch das Individuum mit der „besten“ Abweichung repräsentiert. Diese Verfahren sind – je nach Regelsatz – als sehr robust einzustufen. Sie liefern oft auch bei extrem großen Parameterzahlen mit einer vertretbaren Anzahl von Zyklen gute Werte. Die Durchläufe der evolutionären Methoden sind i. d. R. ähnlich der Monte-Carlo-Methode, nicht exakt reproduzierbar.

3 Anwendungsbeispiele

Die vorgeschlagene Vorgehensweise wird im Folgenden anhand von zwei Anwendungsbeispielen erläutert. An Stelle der Messdaten zum Vergleich mit den Berechnungsergebnissen tritt eine Vorwärtsrechnung mit bekannten Modellparametern. Bei davon abweichenden Startwerten des inversen Verfahrens sind diese letztendlich zu ermitteln. Ein derartiges „numerisches Experiment“ bietet den Vorteil der Kenntnis der „exakten“, d.h. richtigen Lösung.

3.1 Modellierung und Optimierung eines Scherversuchs

Als erstes Anwendungsbeispiel wird bewusst ein einfaches numerisches Modell gewählt: Mit ABAQUS/Explicit wurde der in Abb. 2 schematisch abgebildete zyklische Scherversuch zweier Felsblöcke modelliert („numerisches Experiment“). Mittels der im Abschnitt 2 vorgestellten Methoden sollen ausgewählte Parameter einer Referenzsimulation bestimmt werden. Ausgewählt wurden dazu:

- der Kontakt-Reibungswinkel φ
- und die Kontakt-Schubsteifigkeit κ (Scherspannung über den realisierten Scherweg bei elastischer Beanspruchung, „tangential softening“, Abb. 3).

In der „Referenzsimulation“ (numerisches Experiment) wurde für den Reibungswinkel φ ein Wert von $25,0^\circ$ und für die Steifigkeit κ ein Wert von $1\text{E}+9$ kPa/m angenommen. Die Normalbelastung wurde auf der Oberkante des $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ großen Blocks mit $1\text{E}+4$ kPa gewählt.

Die Definition der Zielfunktion erfolgte unter Anlehnung an die Methode der kleinsten Quadrate nach Gleichung (1). Es wurden für die jeweiligen Parameter Wichtungsfaktoren (r_u und r_τ) vorgesehen, um die stark unterschiedlichen Wertemengen auf einen gemeinsamen Zahlenbereich zu skalieren.

$$D = \sum_t \left((\Delta u(t) \cdot r_u)^2 + (\Delta \tau(t) \cdot r_\tau)^2 \right) \quad (1)$$

mit: D Abweichung

$\Delta u(t)$ Differenz der gemessenen und berechneten relativen Verschiebung der Körper zum Zeitpunkt t

r_u Konstante zur Normierung der Differenz der relativen Verschiebung (hier: $r_u = 1$)

$\Delta \tau(t)$ Differenz der gemessenen und berechneten Scherspannungen zum Zeitpunkt t

r_τ Konstante zur Normierung der Differenz der Scherspannungen (hier: $r_\tau = 3,0\text{E}-07$)

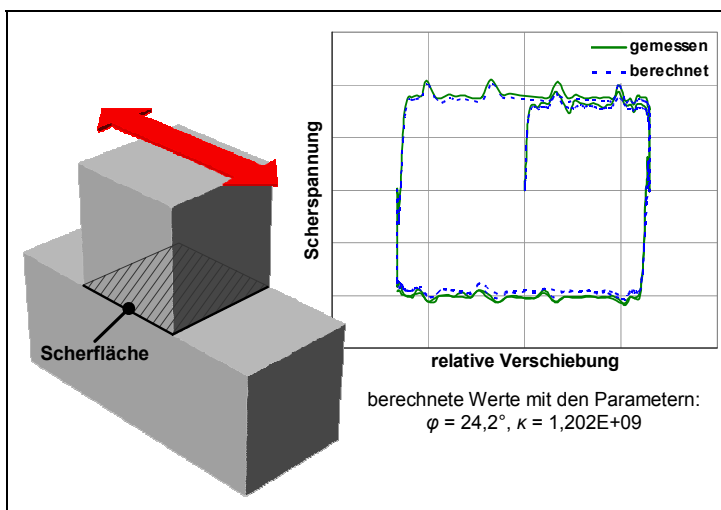


Abb. 2: Schematische Darstellung des modellierten zyklischen Scherversuchs mit Verschiebungs-Scherspannungs-Diagramm

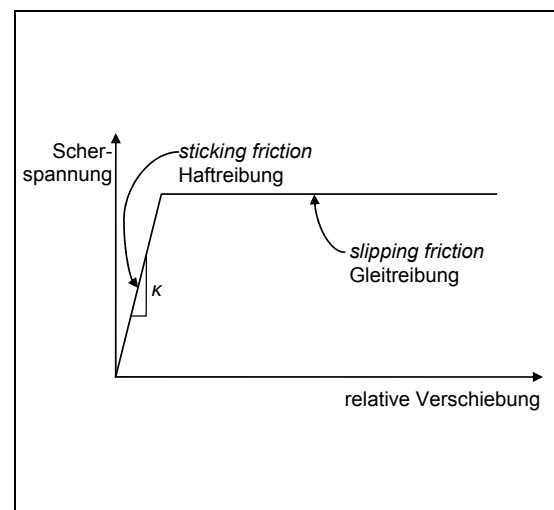
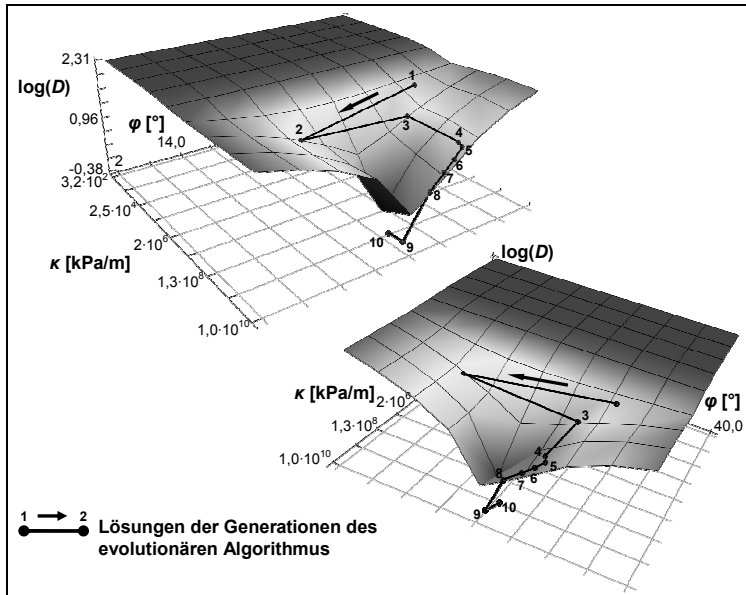


Abb. 3: Elastisches Gleiten im Vergleich zu der Scherspannungs-Scherweg-Beziehung für Haftreibung und Gleitreibung



Generation	bestes Individuum		
	φ [°]	κ [kPa/m]	D [-]
1	36,2	4,677E+07	84,38
2	15,2	1,585E+08	38,07
3	32,4	1,585E+08	25,68
4	32,1	8,650E+09	24,82
5	32,4	1,000E+10	19,17
6	31,1	1,000E+10	10,78
7	29,6	1,000E+10	5,84
8	27,3	1,000E+10	2,47
9	24,8	5,152E+09	0,12
10	25,3	1,312E+09	0,09
11

Abb. 4: Visualisierung und Ergebnisse der Zielfunktion des zyklischen Scherversuchs

Rasterverfahren

Der Einsatz des Rasterverfahrens bietet sich aus zwei Gründen als erster Schritt einer Optimierung an: Zum einen kann aus den Berechnungsergebnissen die Zielfunktion grob visualisiert werden (Möglichkeit der Erfassung lokaler und globaler Extremwerte) (Abb. 4) und zum anderen kann der Parametersatz mit der geringsten Abweichung als Startvektor für weitere Verfahren abgeleitet werden.

Es muss beachtet werden, dass bei einer Visualisierung der Zielfunktion aus den Ergebnissen eines Rasterverfahrens lokale Minima oder evtl. Rauigkeiten durch die lineare Interpolation verschluckt bzw. unterdrückt werden können.

Im gewählten Beispiel wurde das Rasterverfahren, wie in Abb. 4 dargestellt, mit einer Auflösung von 9×9 Rasterpunkten ausgeführt. Die Grenzen wurden mit $2,5^\circ$ bis $40,5^\circ$ für den Reibungswinkel φ und $1,0E+2$ bis $1,0E+10$ für die Steifigkeit κ vorgegeben.

Der Algorithmus lieferte als Ergebnisvektor die Werte von $24,2^\circ$ für den Reibungswinkel φ und $1,202E+09$ für die Steifigkeit κ (Abweichung: 0,42; Abb. 2).

Evolutionäres Verfahren

Unter Berücksichtigung der mit dem Rasterverfahren erstellten Visualisierung der Zielfunktion des Problems wurde ein nicht-lokalisiertes evolutionäres Verfahren mit einer Populationsgröße von 10 Individuen, einer Mutationswahrscheinlichkeit von 0,2 pro Parameter und Individuum und einem Selektionsdruck von 0,5 (nur die „besten“ 50% der Individuen einer Population werden für die Generierung der nächsten Generation herangezogen). Die Grenzen der Parameter wurden analog den Werten des Rasterverfahrens gewählt. Als Ausgangspopulation wurden 10 Individuen mit zufälligen Parameterwerten erzeugt.

Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass aufgrund der in das Verfahren einfließenden Zufallsgrößen zwar die Tendenzen der einzelnen Durchläufe gleichartig sind, jedoch kein Durchlauf reproduzierbar ist.

Die in Abb. 4 dargestellten Ergebnisse eines Durchlaufes des evolutionären Verfahrens zeigen bereits in der 9. Generation ein besseres Ergebnis als Endresultat des zuvor ausgeführten Rasterverfahrens. Ebenfalls wird aus Abb. 4 ersichtlich, dass die Verbesserung der globalen Lösung von Generation zu Generation nicht gleichmäßig, sondern in Schüben stattfindet. Die Optimierung kann

über die in Abb. 4 dargestellten 10 Generationen beliebig lang weitergeführt werden und wird sich, in Abhängigkeit von dem Algorithmus und seinen Steuergrößen, dem Minimum weiter annähern.

3.2 Modellierung und Optimierung einer großräumigen Hangbewegung

Für das zweite Anwendungsbeispiel wurde das idealisierte Modell einer, von einem regelmäßigen Trennflächengefüge durchzogenen, Festgesteinsböschung gewählt (Abb. 5).

Modellierung

Für die Modellierung des in Abb. 5 abgebildeten Hanges wurde in ABAQUS/Explicit ein 3D-Lamellenmodell verwendet. Die geomechanisch wirksamen Kluftkörper wurden als eigenständige Blöcke modelliert, die untereinander mittels Kontaktelementen interagieren. Das Materialverhalten der Blöcke wurde vereinfachend als ideal elastisch gewählt. Des weiteren wurden zwei Kluftscharen angenommen: die mit ca. 18° flacher als der Hang einfallende „Kluftschar 1“ und die dazu senkrecht stehende „Kluftschar 2“.

Die Knoten an den Rändern des Modells sind jeweils in horizontaler (berg- und talseitiger Rand) und vertikaler Richtung (unterer Rand) fixiert. Weiterhin wurden alle äußeren Knoten senkrecht zur Bildebene fixiert.

Für die Erzeugung des Primärspannungszustandes wird das gesamte Modell in einem vorge-schalteten Berechnungsschritt in horizontale Richtung fixiert und schrittweise mit der wirkenden Gravitation belastet.

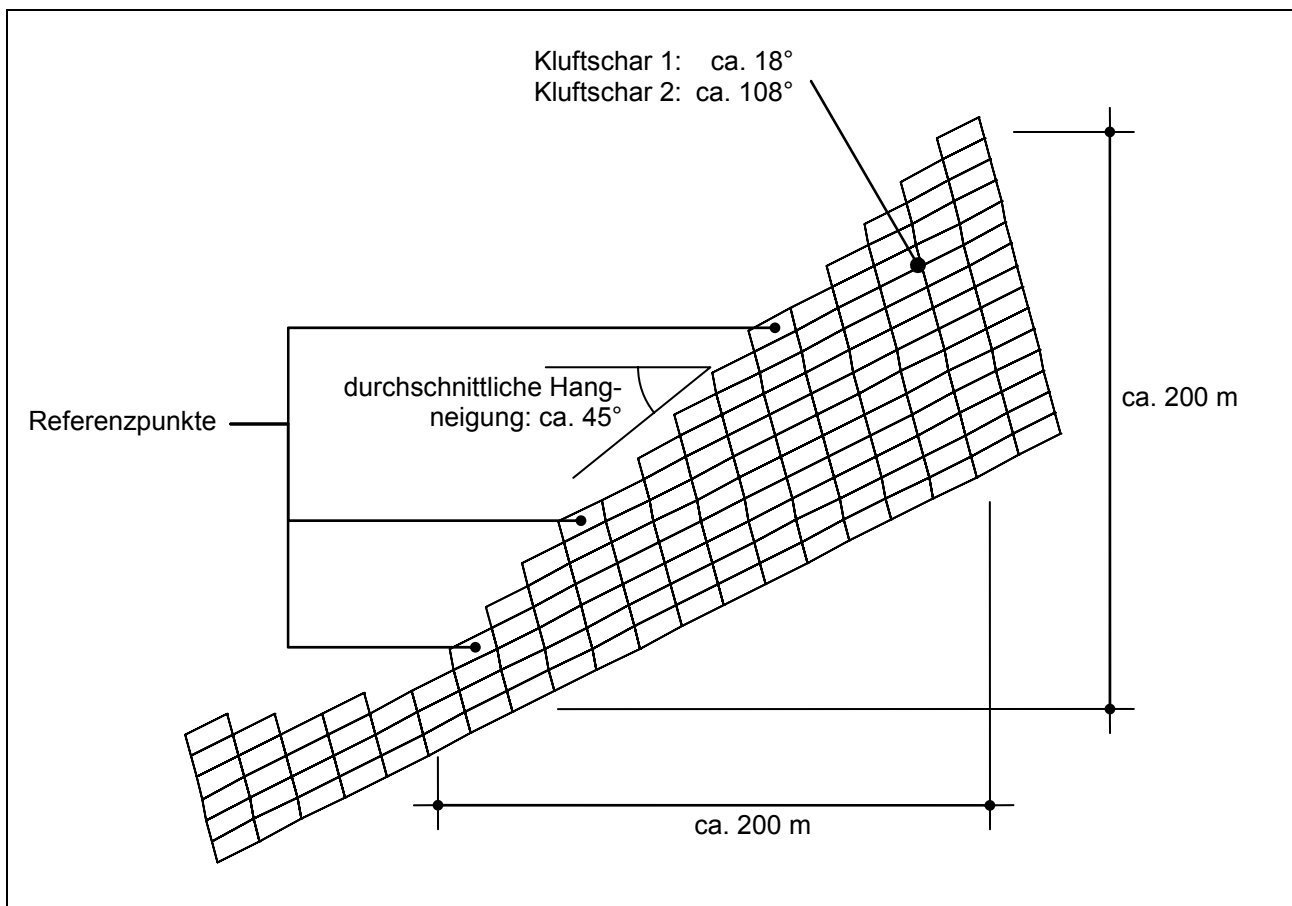


Abb. 5: Schematische Darstellung der idealisierten Festgesteinsböschung mit Trennflächen

Bei der Verwendung von exakt quaderförmigen Klufkörpern kann es bei einer Relativverschiebung der Blöcke gegeneinander leicht zu dem in Abb. 6a visualisierten gegenseitigen „Verhaken“ kommen. Da ein Risswachstum, eine Materialschädigung oder auch ein Auseinanderbrechen der einzelnen Blöcke nicht in dem numerischen Modell beschrieben wird, kann dies zu unrealistischen Spannungsakkumulationen in den Eckbereichen der einzelnen Blöcke führen. Diese können wiederum numerische Instabilitäten (übermäßige Deformation des Netzes in diesen Bereichen, Herabsetzung des Zeitschrittes, Abbruch der Berechnung) und/oder eine Überbewertung der Standsicherheit des Hanges zur Folge haben.

Um diese Probleme zu umgehen wird ein „Abrunden“ der Klufkörper, wie in Abb. 6b dargestellt, durchgeführt. Nachteile dieses Vorgehens bestehen in der höheren Anzahl der benötigten Elemente zur Modellierung eines Klufkörpers, in der geringfügig verkleinerten Auflagefläche und in der schwierigeren Geometrie (und damit komplizierteren Erstellung der Blöcke) auf.

Um den genannten komplexen Anforderungen gerecht zu werden und außerdem dem Anspruch auf eine automatisierte inverse Parameterbestimmung zu genügen, wurde ein neuer automatischer Netzgenerator entwickelt:

- Orientierung und Lage der Hangoberfläche und Modellgröße (Parameter: Verlauf der Hangoberfläche, Modellabmessungen und Fixierungen an den Modellgrenzen)
- Orientierung und Abstand der der jeweiligen Trennflächenschar (Parameter: Normalvektor der Trennflächenschar und Funktion zur Berechnung des Abstandes der Trennflächen¹)
- Unterteilung der jeweiligen Klufkörper in Elemente (Parameter: durchschnittliche Elementlänge in Richtung der Achsen des lokalen Koordinatensystems)
- Abrundung der Klufkörper (Parameter: Abrundungsradius)
- Lage der zur Berechnung der Abweichung benötigten Referenzpunkte
- Parameter der konstitutiven Material- und Trennflächenmodelle und ggf. deren räumliche Verteilung im Modell
- Parameter der einzutragenden Lasten und deren zeitlicher Verlauf
- Eigenschaften der verschiedenen Berechnungsschritte des numerischen Modells

Parameter der Optimierung

Die zahlreichen für eine Optimierung in Frage kommenden Parameter lassen sich, wie in Abb. 7 dargestellt, grob in drei Gruppen unterteilen: In die Gruppe der Materialparameter des Gesteins, in die Gruppe der konstitutiven Parameter der Trennflächen und in die Gruppe der geometrischen Modellparameter. Wobei die beiden Gruppen der konstitutiven Parameter von den verwendeten Material- und Trennflächenmodellen der Simulationssoftware abhängen. Für nahezu alle der Modellparameter muss in der Praxis zudem noch eine, durch weitere Parameter beschriebene, räumliche Verteilung angenommen werden.

In dem hier behandelten Beispiel wurden die in Tab. 1 aufgeführten Parameter Reibungswinkel auf den Trennflächen und der Abrundungsradius der Blöcke gewählt.

Die Auswahl der Parameter auf zwei Größen wurde aufgrund der Tatsache beschränkt, dass auf der zur Verfügung stehenden Hardware eine ABAQUS/Explicit - Simulation ca. 30 min und die Berechnung der Abweichung (mit dem Auslesen und Filtern der Ergebnisse aus den Ausgabefiles) weitere 5 min beanspruchen. Grundsätzlich ist jedoch die Anzahl der Optimierungsparameter nicht beschränkt und kann gemischt aus jedem der drei Parametergruppen erfolgen.

¹ Im einfachsten Fall entspricht diese Funktion einer Konstanten. Was einem über das gesamte Modell gleich bleibenden Trennflächenabstand entspricht.

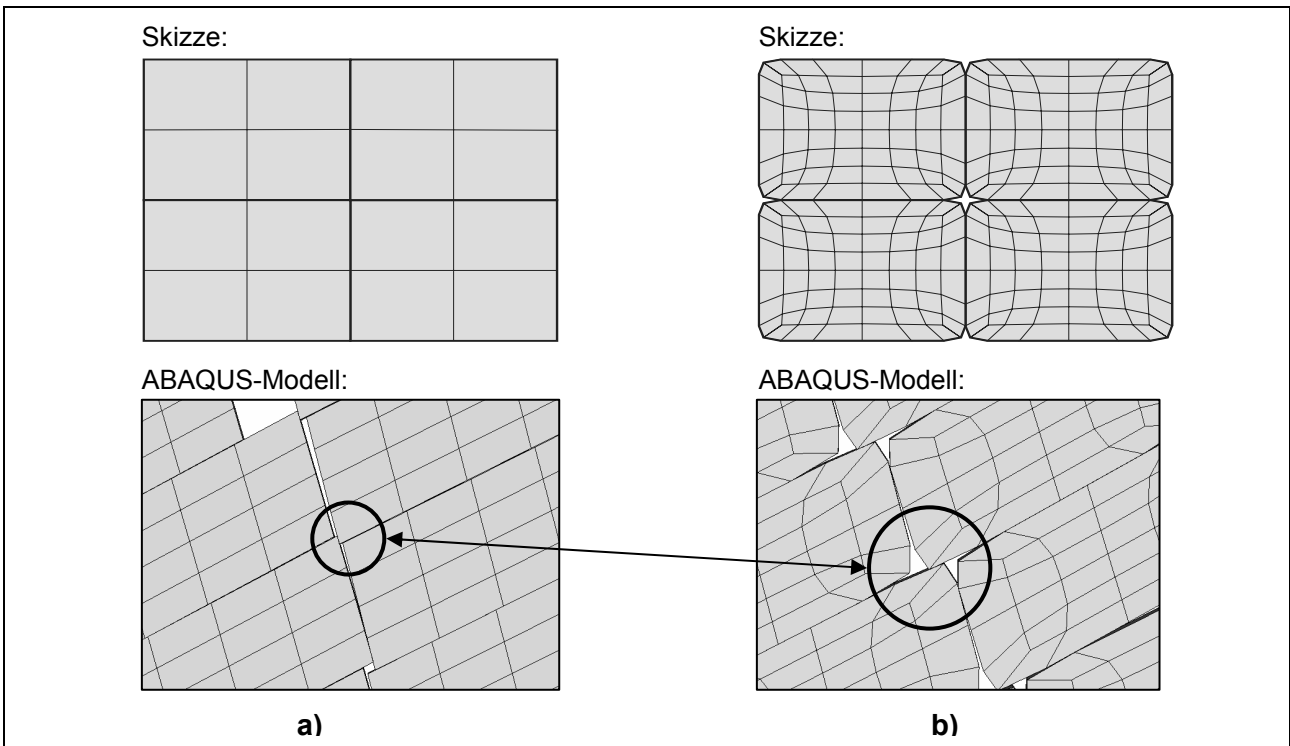


Abb. 6: angenommene Form der Kanten der Klufkörper a) ohne und b) mit Abfasung

Tab. 1: Parameter der Optimierung

Parameter	Wert in der Referenzsimulation	untere Grenze	obere Grenze
Reibungswinkel φ auf den Trennflächen	27°	5°	42°
Abrundungsradius R (in Prozent der Klufkörperlänge)	2,5%	1,5%	10,0%

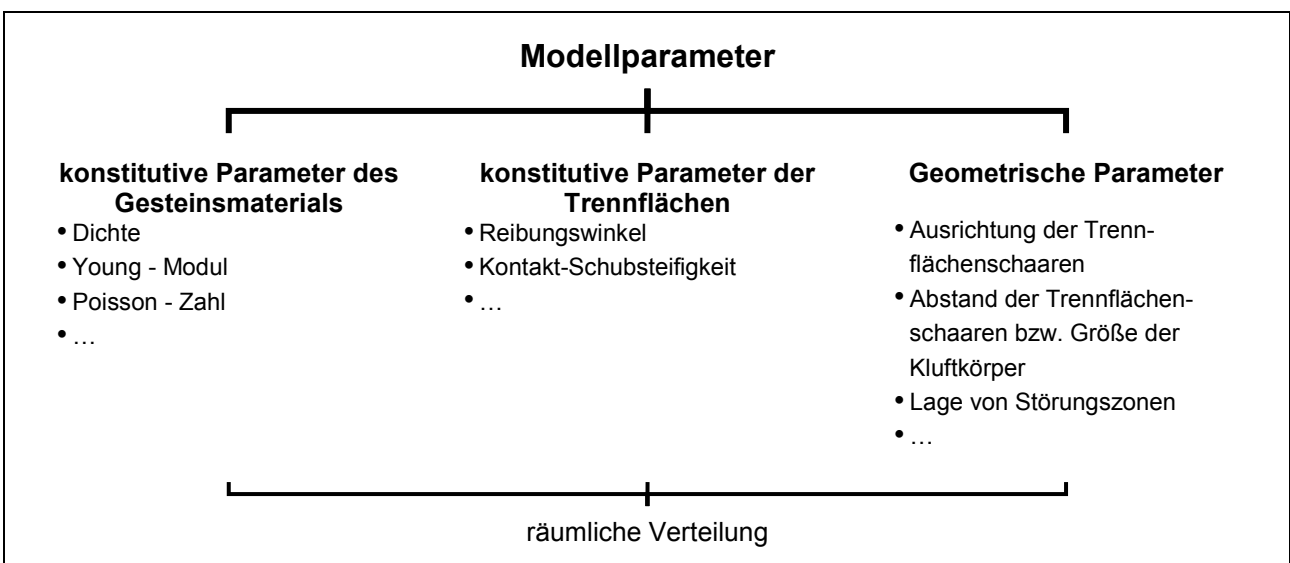


Abb. 7: Prinzipiell mittels eines inversen Ansatzes zu berücksichtigende Modellparameter

Berechnung der Abweichung

Die Berechnung der Abweichung der für einen Parametersatz errechneten Lösung von den Referenzmesswerten ist ebenfalls als nicht-trivial einzustufen. Sie wird i. d. R. auf der Basis von Referenzpunkten erfolgen. So genügt es z. B. nicht, die Lage bzw. der relativen Verschiebung eines einzelnen Punktes am Ende der Berechnung mit den Messwerten zu vergleichen, da so das restliche Modell nicht in die Bewertung eingehen würde. Eberfalls unbeachtet würden die Vorgänge während der Berechnung bleiben. Für die Berechnung der Abweichung müssen demnach Entwicklungen auch während der Berechnung und in ausgewählten Teilen des Modells Berücksichtigung finden.

Für den Anwendungsfall der Optimierung eines Hangs auf der Basis von Messwerten, werden die Referenzpunkte innerhalb des numerischen Modells – vorgegeben durch die Lage der Messpunkte der geodätischen Messkampagne – normaler Weise an der Hangoberfläche positioniert sein. Bei der Existenz von Daten innerhalb des Gesteinsverbandes, wie beispielsweise Inklinometermessungen, sind jedoch zusätzlich Referenzpunkte „innerhalb“ des Hangs möglich.

Im Rahmen der hier durchgeführten Optimierung wird in Anlehnung an das in Abschnitt 3.1 vorgestellte Verfahren die Abweichung durch den Vergleich von Zeitreihen der Verschiebung von drei, ebenfalls in Abb. 5 eingezeichneten, Referenzpunkten ermittelt.

Optimierung

Die in Abb. 8 dargestellte Visualisierung zeigt den Verlauf der Zielfunktion des Anwendungsbeispiels im Bereich der in Tab. 1 angegebenen Grenzen und eine Detailansicht in der näheren Umgebung der Parameter der Referenzsimulation. Deutlich zeigt sich der starke Einfluss des Abrundungsradius als geometrischen Parameter, der im Bereich des Wertes 2,5% ein deutliches Minimum zeigt und somit sehr gut den Betrag der Referenzsimulation wieder gibt. Ebenfalls wird deutlich, dass oberhalb eines kritischen Radius kein weiterer Einfluss auf die Zielfunktion vorhanden ist. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei zu großen Radien die Abtragung der Kräfte zwischen den Blöcken nicht mehr an den (nicht mehr vorhandenen) Kanten erfolgen kann, sondern in zunehmendem Maße mit immer kleiner Außenmittigkeit (ähnlich einem zentralen Stoß). Daraus ergibt sich ebenfalls ein Hinweis auf die Probleme der Modellierung von Gebirgsverbänden mittels kreis- bzw. kugelförmigen Ersatzkörpern, die ebenfalls ein Verkanten der Körper untereinander vernachlässigen.

Der Einfluss des Reibungswinkels in den Trennflächen wird oberhalb des kritischen Radius in Abb. 8a und in dem Diagramm der Abweichung R über dem Reibungswinkel φ in Abb. 8c deutlich. Das Diagramm zeigt bei $\varphi = 27^\circ$ erwartungsgemäß das Minimum der Zielfunktion. Weiterhin zeigt das Diagramm jedoch ein Nebenminimum bei ca. $\varphi = 24,9^\circ$, welches auf numerische Rechenungenauigkeiten zurückzuführen ist. Ein anzuwendendes „höheres“ Optimierungsverfahren sollte diese lokalen Minima nach Möglichkeit erkennen und nicht als globale Lösung identifizieren. Aus den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Verfahren bieten sich hier wiederum die Evolutionären verfahren an.

4 Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Methode zur inversen Bestimmung von Parametersätzen kann nicht als „Allheilmittel“ für das Parameterproblem der numerischen Modellierungen angesehen werden. Neben der Notwendigkeit der Erstellung der Zielfunktion und der Ein- und Ausgabefunktionen für das jeweilige numerische Verfahren sind folgende weitere Dinge zu beachten:

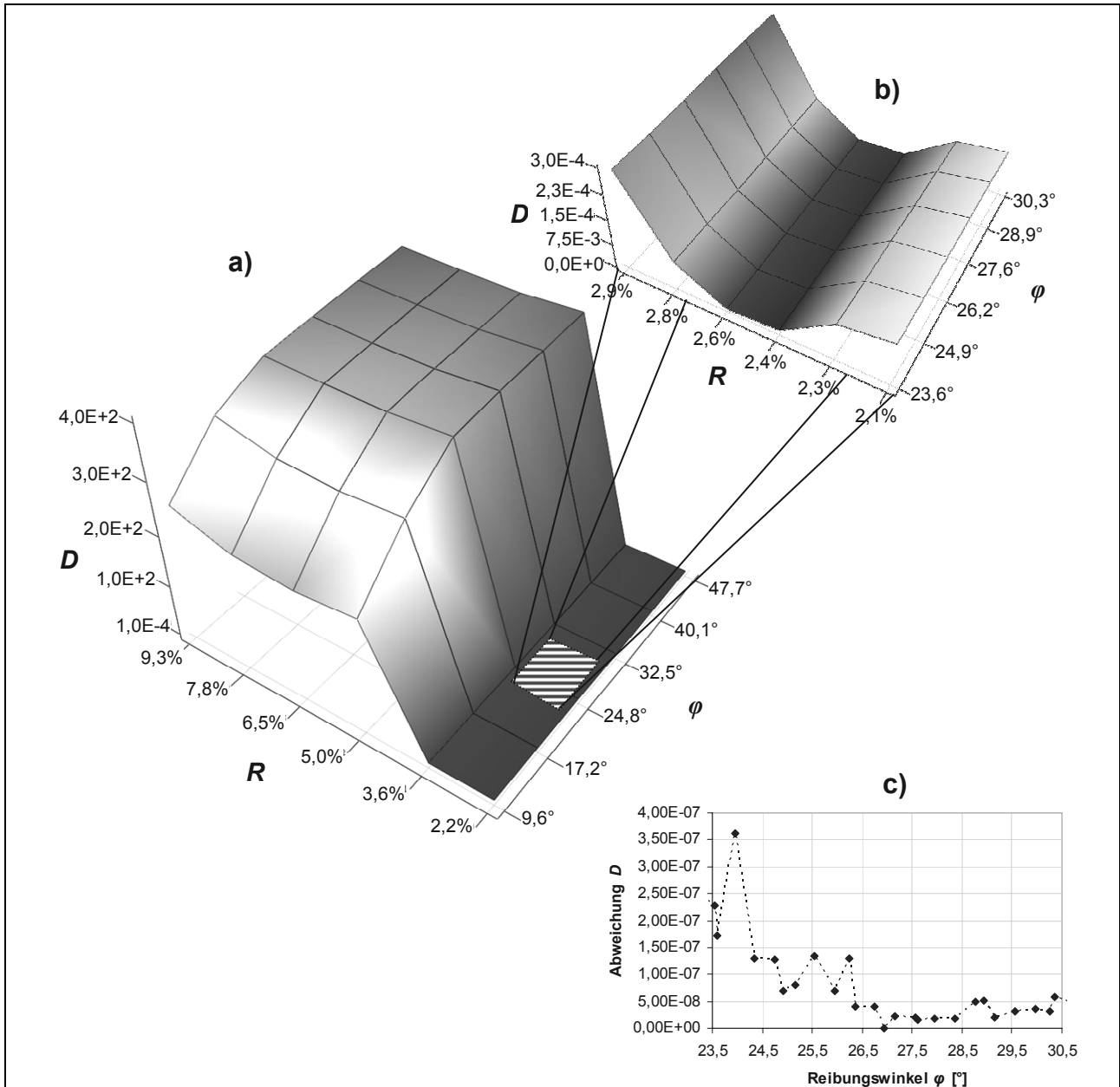


Abb. 8: Visualisierung und Ergebnisse der Zielfunktion der großräumigen Hangbewegung in den Grenzen der Optimierung (a), im näheren Umfeld der Lösung (b) und als Diagramm für $R = 2,5\%$ (c)

Rechenzeit

Je nach Modell und Anzahl der Parameter muss die Vorwärtsrechnung bis zu mehrere tausend Mal ausgeführt werden, bis ein zufrieden stellendes Ergebnis erzielt wird. Dies kann in einer sehr langen Rechenzeit einer solchen Analyse führen, kann jedoch – in gewissen Grenzen – durch die Anschaffung von leistungsfähigerer Hardware vermindert werden.

Eindeutigkeit der Lösung

In Abhängigkeit von dem Modell, den Parametern, den Referenzdaten und der Gestaltung der Zielfunktion kann es zu einer Mehrdeutigkeit der Lösung kommen. Wesentlich ist in diesem

Zusammenhang die Unterscheidung von „lokalen“ und „globalen“ Minima der Zielfunktion. Vereinfachend wirkt sich aus, wenn die Startwerte der relevanten Optimierung bereits auf Grund von vor geschalteten Verfahren im Bereich der globalen Lösung liegen (hybrider Ansatz). Die Ergebnisse einer inversen Parameteridentifikation sollten demnach immer kritisch auch unter diesem Gesichtspunkt betrachtet werden.

Vorteilhaft wirkt sich die Tatsache aus, dass bei einigen Optimierungsalgorithmen als „Abfallprodukt“ eine Sensitivitätsanalyse in verschiedenen Bereichen der Zielfunktion vorliegt und so weitere Aussagen zu den Modellparametern möglich sind (Stichwort: Auswirkung von „kleinen“ Störungen des Systems; Auswirkung von Unschärfe der Eingangsparameter).

Bei Berücksichtigung der oben genannten Einschränkungen und Besonderheiten der verschiedenen Optimierungsverfahren können die hier vorgestellten Werkzeuge bei der Bestimmung von Parametern von vielfältigen numerischen Modellen jedoch eine wichtige Hilfe sein.

5 Ausblick

Neben der in diesem Beitrag vorgestellten Behandlung eines zyklischen Scherversuches (entspricht dem Detailproblem der Kontaktbeschreibung auf Trennflächen im Fels) und der zur Zeit in Entwicklung befindlichen Analyse von Großhangrutschungen wurden von den Autoren weitere inverse Parameterbestimmungen ausgeführt (u. a. Analyse bodenmechanischer Laborversuche, Zeitsetzungsberechnungen, Standsicherheitsberechnungen). In den nächsten Schritten soll unter anderem versucht werden, die Parametrisierung der Hanggeometrie weiter auszubauen, ein benutzerdefiniertes Materialmodell für die Kontakt – Definition der Trennflächen zu verwenden und deren Parameter in die Optimierung mit einzubeziehen. Weiterhin sollen geometrische und konstitutive Imperfektionen in den Modellen Beachtung finden. Fernziel soll es sein, für ausgewählte Hänge auf der Basis der Messkampagnen und unter permanenter Einbeziehung der jeweils aktuellen Messdaten eine Art „Wetterbericht“ mit Voraussagen des Verhaltens in naher Zukunft mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsstufen zu erstellen.

6 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

Davidon, W. C. (1965): Variance algorithm for minimization. In: Computer Journal, Volume 10, Issue 4, S. 406 - 410

Nelder, J. A.; Mead, R. (1965): A simplex method for function minimization. In: Computer Journal. Volume 7, S. 308 - 313

Mallet, J.-L. (2002): Geomodelling. Oxford University Press

Matous, K.; Leps, M.; Zeman, J.; Sejnoha, M. (2000): Applying genetic algorithms to selected topics commonly encountered in engineering practice. In: Computer Methods Appl. Mech Engrg. 190 (2000), S. 1629 – 1650

Pohlheim, H. (2000): Evolutionäre Algorithmen – Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York