

Kalibrierung eines dreidimensionalen Finite-Differenzen-Modells einer Massenbewegung mithilfe der adaptiven Kalman-Filtertechnik



Thilo Schmalz, Ewald-Hans Tentschert, Alexander Preh, Kurt Mair am Tinkhof, Wien; Christian Zangerl, Innsbruck; Andreas Eichhorn, Darmstadt

Kurzfassung

Massenbewegungen treten insbesondere in gebirgigen Regionen verstärkt auf und stellen häufig eine Gefahr für Mensch und Infrastruktur dar. Für die Untersuchung solcher geodynamischen Prozesse werden heute oftmals numerische Modelle verwendet, die das Verhalten des Untergrundes simulieren. Die Anpassung solcher Modelle an in situ-Messdaten geschieht jedoch häufig durch unsicheres „trial and error“. Einen Genauigkeitsgewinn und die statistische Beurteilung der Modellanpassung verspricht hier die adaptive Kalman-Filtertechnik. Diese erlaubt die optimale Schätzung des Zustands des Systems „Rutschhang“ und kann auch zur Prädiktion des künftigen Hangverhaltens eingesetzt werden. Nachfolgend soll die Entwicklung eines adaptiven Kalman-Filters anhand einer noch simulierten Testböschung erläutert werden. Die Methode der Modellkalibrierung soll später auf das Modell eines realen Untersuchungsobjekts angewendet werden, und zusammen mit den erfassten Monitoringdaten die Grundlage für ein wissensbasiertes Alarmsystem für Massenbewegungen schaffen.

Schlüsselwörter: Massenbewegung, Monitoring, numerische Modellierung, Finite-Differenzen-Methode, adaptives Kalman-Filter, Parameterschätzung

Abstract

Mass movements especially appear in mountainous regions and often cause dangerous situations for men and infrastructure. Today, the analysis of such geodynamic processes is commonly done by numerical modelling to simulate the behaviour of bedrock. The adjustment of such models with measured data is usually done by statistically non assured 'trial and error' methods. Adaptive Kalman-filtering can be used to increase accuracy and enable the statistical evaluation of the adaptation results. The optimal estimation of relevant system quantities and the prediction of the future slope behaviour are possible. The application of an adaptive Kalman filter to a still simulated test slope is described below. The calibration method will be applied to a model of a real slope being the basis for a knowledge-based alarm system for mass movements.

Keywords: mass movement, monitoring, numerical modelling, finite-difference methods, adaptive Kalman filter, parameter estimation

1. Motivation

Die Untersuchung von Massenbewegungen und die Installation von Frühwarnsystemen zum Schutz von Mensch, Umwelt und Infrastruktur erlangt gerade in Gebirgsregionen eine zunehmende Bedeutung [1]. Im Bereich von Hangrutschungen basieren Frühwarnsysteme derzeit im Wesentlichen auf am Hang erfassten Monitoringdaten (u.a. Tachymetermessungen, GPS, Extensometer, etc.). Defizite liegen bspw. in der Assoziation zwischen gemessenen Ereignissen und theoretischen Modellrechnungen bzw. im Verständnis der zugrunde liegenden Versagensmechanismen.

Im Rahmen des FWF-Projektes KASIP (Knowledge-based Alarm System with Identified Deformation Predictor) [2] soll eine verbesserte Interpretation der Monitoringdaten durch eine Verknüpfung mit möglichen ursächlichen Versagensmechanismen erreicht und damit letztendlich eine zuverlässigere Alarmierung ermöglicht werden. Hierzu wird zunächst ein numerisches Modell des Rutschhanges entwickelt, das den inneren Aufbau der Massenbewegung möglichst realitätsnah abbildet. Das Modell stellt die Grundlage für die Prädiktion und die Erklärung von Versagensereignissen des Hanges dar. Durch die Kombination der numerischen Berechnungsergebnisse mit empirischen Monitoringdaten wird

eine Verbesserung der modellimmanenten Parameter (z.B. Festigkeiten) im Sinne einer least squares-Schätzung (Modellkalibrierung) angestrebt und die statistische Beurteilung der Berechnungsergebnisse ermöglicht.

Mit der Weiterverarbeitung von theoretischen Berechnungen im kalibrierten Modell und der in situ erfassten Messdaten in einem wissenschaftlichen Alarmsystem soll dann eine Steigerung der Zuverlässigkeit bei der Warnung bzw. Alarmierung von Rutschungen erzielt werden (Abbildung 1).

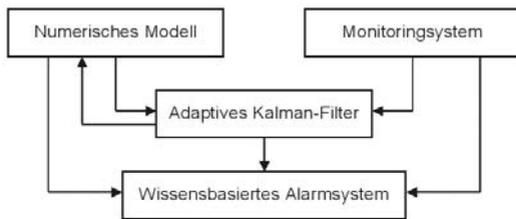


Abb. 1: Komponenten im Projekt KASIP

Die Modellierung der Massenbewegung erfolgt mithilfe des Programms $FLAC^{3D}$ der Firma Itasca [3], welches auf der Finite-Differenzen-Methode [4] beruht (s.a. Kapitel 3.1) und die Berechnung dreidimensionaler Kontinuumsmodelle ermöglicht. Die bisher übliche Anpassung des numerischen Modells an die Messdaten durch die „trial and error“-Methode [5] soll durch Anwendung der adaptiven Kalman-Filtertechnik verbessert werden. Das so verbesserte Modell kann dann zur Prädiktion bzw. realitätsnahen Simulation künftiger Hangzustände eingesetzt werden.

2. Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsobjekt im Projekt KASIP dient die Massenbewegung „Steinlehnen“ bei Gries

im Sellrain, Nordtirol, Österreich (Abbildung 2a). Der stark zerlegte Untergrund besteht im Wesentlichen aus Paragneisen, Amphiboliten und Granodioritgneisen. Im oberen Teil der Böschung beträgt der Neigungswinkel ca. 43° , im unteren Teil ca. 31° .

Die Mächtigkeit der Rutschmasse beträgt 10 bis 20 m im hochaktiven Bereich (Abbildung 2b), die absolute Mächtigkeit liegt bei bis zu 100 m. Ausgelöst durch zahlreiche Felsstürze an der übersteilten Stirne der Massenbewegung bewegte sich der hochaktive Bereich im Juni 2003 ca. 20 m talwärts. Aufgrund der Gefährdung der nahegelegenen Siedlung wurde ein Monitoring-System installiert. Hierbei handelte es sich zunächst um einen terrestrischen Laserscanner, welcher nach Abnahme der Felssturzerreignisse durch ein Tachymeter (Station am Gegenhang) mit im Rutschhang angebrachten Reflektoren ersetzt wurde. Die Beobachtung der Reflektoren erfolgte bislang in unregelmäßigen Zeitschritten (Messrate $\Delta t = 1$ Monat bis zu 1 Jahr). Die aktuelle Bewegungsrate des Hanges liegt bei ca. 25 cm pro Jahr [6]. Die Beträge der Verschiebungsvektoren für 19 Hangpunkte sind in Abbildung 3 dargestellt.

3. Vereinfachtes numerisches Böschungsmodell

Derzeit erfolgt in KASIP die Generierung eines dreidimensionalen numerischen Modells des Steinlehnen [7]. Die Modellkalibrierung soll dann unter Ausnutzung der am Hang verfügbaren Monitoringdaten (Abbildung 3) im adaptiven Kalman-Filter erfolgen. Die Festlegung der Modellgeometrie erfolgt auf der Grundlage von im Jahr 2003 durchgeführten Laserscannerbefliegungen. Die initiale Parametrisierung des Modells und die Identifikation von Homogenbereichen (von Mate-

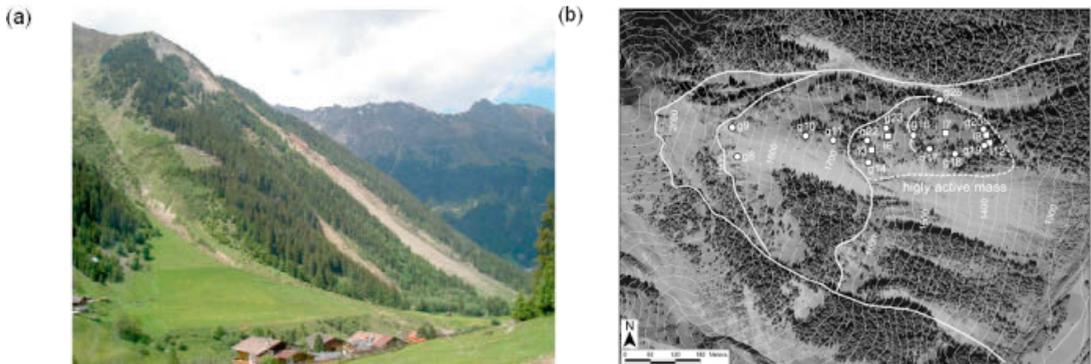


Abb. 2: Untersuchungsgebiet Steinlehnen. (a) Blick von Süden. (b) Orthofoto mit Positionen der Laserscannerfenster (l) und Reflektoren (g) [6].

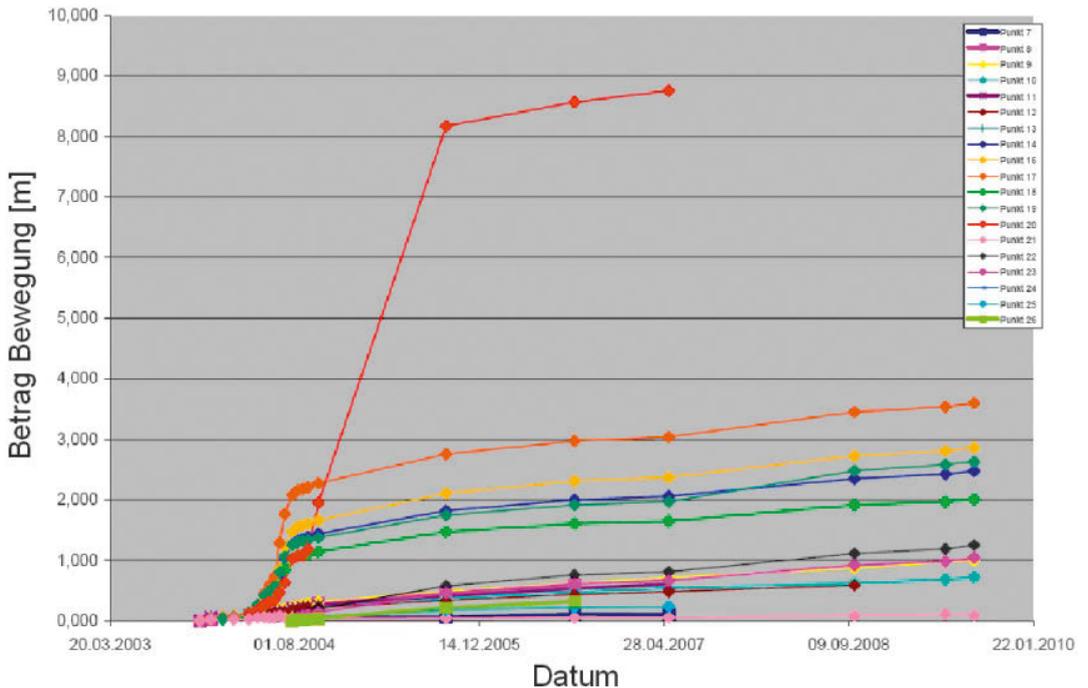


Abb. 3: Betrag der Punktverschiebungen seit Juni 2003 (Quelle: alpS GmbH)

rialparametern) erfolgt zunächst auf der Grundlage von geologischen Kartierungen. Die Daten werden vom Projektpartner „alpS – Zentrum für Naturgefahren- und Risikomanagement GmbH“ (Innsbruck, Österreich) zur Verfügung gestellt.

Im Folgenden werden die im Projekt verwendete Modellierungsmethode und die grundsätzliche Strategie der Modellkalibrierung mittels adaptiver Kalman-Filterung zunächst anhand von Simulationsrechnungen bei einer vereinfachten homogenen Modellböschung vorgestellt.

3.1 Die Finite-Differenzen-Methode

Da eine Lösung großer nichtlinearer Gleichungssysteme analytisch zumeist nicht möglich ist, werden hierfür numerische Verfahren verwendet. Eines dieser Verfahren ist die Methode der Finiten Differenzen, welche zur Lösung gewöhnlicher und partieller Differentialgleichungen eingesetzt werden kann. Hierbei werden die Ableitungen der zu lösenden Gleichungen in dem zu untersuchenden Gebiet mittels Taylor-Entwicklung durch Differenzgleichungen ersetzt. Das Gebiet wird hierfür durch ein Gitter diskretisiert [4].

Auf der Finite-Differenzen-Methode basiert auch das Programm $FLAC^{3D}$ (Fast Lagrangian Analysis of Continua in three Dimensions) der Firma „Itasca Consulting Group, Inc.“, welches zur

Erzeugung des numerischen Modells des Steinlehnen verwendet wird. Dieses erlaubt die Berechnung dreidimensionaler Kontinuumsmodelle unter Anwendung unterschiedlicher elastischer und plastischer Materialmodelle.

Der Zustand eines Gitterpunktes wird dabei nur vom Zustand der Feldvariablen seiner Nachbarzonen beeinflusst, der Zustand einer Zone nur vom Zustand ihrer Randpunkte. Ausgehend von den Bewegungsgleichungen werden dann aus Spannungen und Kräften neue Geschwindigkeiten und Verschiebungen berechnet. Die Geschwindigkeiten der Gitterpunkte liefern die Dehnungsgeschwindigkeiten der einzelnen Zonen. Dadurch ergeben sich neue Spannungsverhältnisse. Auf diese Weise werden die auf das Gesamtsystem wirkenden Kräfte und Spannungen ausgeglichen. Die Berechnungen brechen ab, wenn die unausgeglichene Kraft unter ein vorgegebenes Minimum gefallen ist oder die Anzahl der vorgegebenen Berechnungsschritte erreicht ist [8].

3.2 Das Böschungsmodell

Das Böschungsmodell hat eine Höhe von insgesamt 40 m (15 m Sockelhöhe und 25 m eigentliche Böschungshöhe), eine Breite von 40 m und eine Tiefe von 70 m. Es ist mit 1607 Gitterpunkten diskretisiert und weist damit eine verhältnismäßig

große Maschenweite auf (Abbildung 4), was aber aus Gründen einer begrenzten Rechenzeit in der Testphase zunächst als sinnvoll angesehen wird.

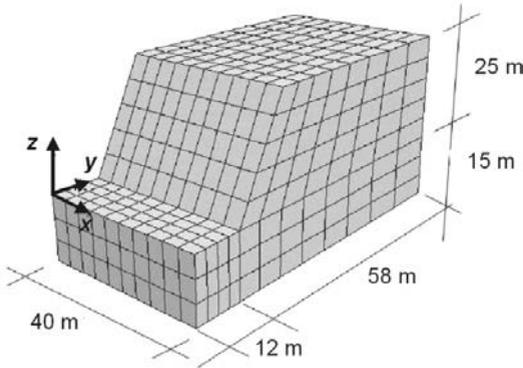


Abb. 4: Böschungsgeometrie des $FLAC^{3D}$ -Modells

An den Modellrändern müssen Randbedingungen definiert werden. Diese werden so gewählt, dass die Bewegungen der xy -Ebene bei $z = -15$ m in x -, y - und z -Richtung, der yz -Ebenen bei $x = 0$ m und $x = 40$ m in x -Richtung und der xz -Ebenen bei $y = 0$ m und $y = 70$ m in y -Richtung gesperrt sind.

Im vereinfachten Böschungsmodell wird mit einem homogenen, mohr-coulombschen Materialmodell gearbeitet (nach [8], verändert). Neben der Dichte ρ , dem Elastizitätsmodul E und der Querkontraktionszahl ν werden der Böschung zwei Festigkeitsparameter (ein Reibungswinkel φ und eine Kohäsion c) zugeordnet. Die Festigkeiten legen das zeitliche (Deformations-) Verhalten der Böschung maßgeblich fest. Unterschreiten sie bestimmte Grenzwerte, kommt es zum Versagen. Sie sind damit die wesentlichen Zielgrößen der Modellkalibrierung.

4. Ansatz zur Kalibrierung des Böschungsmodells

Das numerische Modell einer Massenbewegung wird zunächst mithilfe der verfügbaren geologischen und topografischen Vorinformationen aufgebaut und repräsentiert damit einen bestimmten Zustand in der Vergangenheit. Um nun beispielsweise aktuelle Verschiebungsraten von Oberflächenpunkten (z.B. prozessierte Ergebnisse aus Tachymetermessungen) abbilden zu können, muss das Modell entsprechend an die aktuelle Situation angepasst werden. Üblicherweise geschieht dies durch die Variation von Materialparametern (i. a. der Festigkeitsparameter Reibungswinkel φ und Kohäsion c), hier zumeist allerdings als reines „trial and error“-Verfahren.

Die o.g. Vorgehensweise der Anpassung des numerischen Modells an die Messdaten soll durch eine echte Modellkalibrierung im adaptiven Kalman-Filter verbessert werden. Die adaptive Kalman-Filterung ermöglicht die optimale Schätzung des aktuellen Zustands der Massenbewegung, welcher sowohl durch die Kinematik (Lage, und ggf. Geschwindigkeit und Beschleunigung der Gitterpunkte) als auch durch die modellimmanenten Materialparameter (adaptiver Anteil) repräsentiert wird (u. a. [9] und [10]).

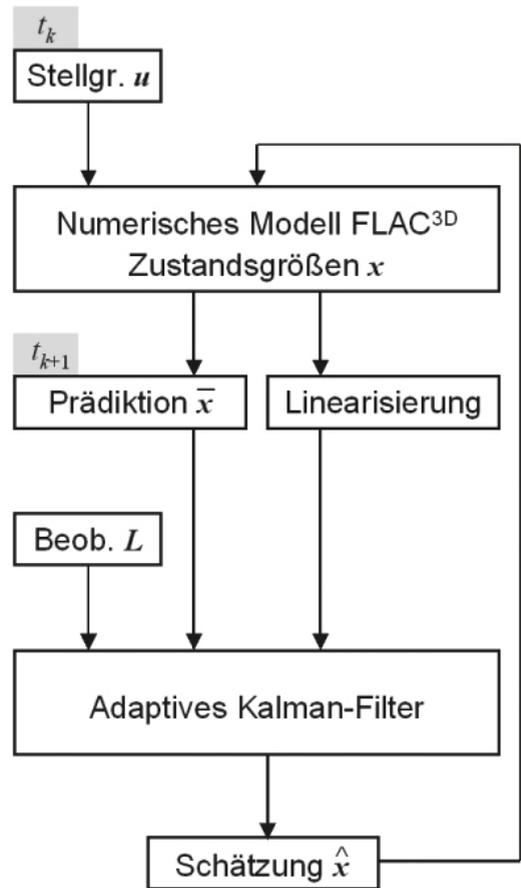


Abb. 5: Prinzip des Filterverlaufs

Das Prinzip des Filterverlaufs ist in Abbildung 5 dargestellt. Der Zustandsvektor x umfasst sowohl einen kinematischen Anteil x_{kin} (Positionen und ggf. Geschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen der Gitterpunkte) als auch einen adaptiven Anteil x_p , in welchem die Festigkeitsparameter φ und c aufgenommen werden können.

Die Prädiktion des Zustandsvektors von einer Filterepoche t_k nach t_{k+1} wird direkt mit dem

nichtlinearen FLAC^{3D}-Modell berechnet, wobei externe Einflussgrößen als Stellgrößen u berücksichtigt werden.

Für die im Kalman-Filter erforderliche Varianzfortpflanzung (Bestimmung der Kovarianzmatrix der Prädiktion) muss das FLAC^{3D}-Modell linearisiert werden. Dies erfolgt durch numerisches Differenzieren nach den Zustands- und Stellgrößen, was einen außer-ordentlich rechenintensiven Vorgang darstellt (bereits mehrere Stunden im vereinfachten Böschungsmodell).

Unter Ausnutzung der Messdaten L wird dann der aktuelle Zustandsvektor zur Epoche t_{k+1} geschätzt. Der adaptive Teil des Zustandsvektors enthält gerade die Schätzwerte für die anzupassenden Festigkeitsparameter.

5. Optimale Schätzung des Festigkeitsparameters c im statischen Modell

Im Rahmen der Untersuchungen im vereinfachten Böschungsmodell soll gezeigt werden, dass die Schätzung von a priori unzureichend bekannten Festigkeitsparametern im adaptiven Kalman-Filter möglich ist. Im vorliegenden Ex-

periment wird das Böschungsmodell zunächst als statisches System betrachtet (u.a. [11]), d.h. das Deformationsverhalten wird als Folge von statischen Gleichgewichtslagen simuliert. Als Stellgröße u wird dabei eine zeitliche Variation des Reibungswinkels φ der Böschung vorgegeben. Die Kohäsion c wird als zu identifizierende Größe über mehrere Epochen im Filter geschätzt.

Die Simulation von Messdaten L erfolgt unter Vorgabe eines festen Sollwertes c_{Soll} für die Kohäsion. Im FLAC^{3D}-Modell werden die räumlichen Positionen (x_i, y_i, z_i) der $i = 1 - 1607$ Gitterpunkte für $k = 0 - 4$ Epochen berechnet und anschließend in das Kalman-Filter eingeführt.

Der Verlauf der Schätzwerte für die Kohäsion ist in Abbildung 6 für verschiedene Startwerte c_0 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Schätzwerte unabhängig vom Startwert generell gegen den Sollwert konvergieren. In fünf von den sechs dargestellten Fällen liegen die verbleibenden Restabweichungen bereits nach vier Filterepochen in einem Bereich von $< 0,5\%$ des Sollwertes, wo-

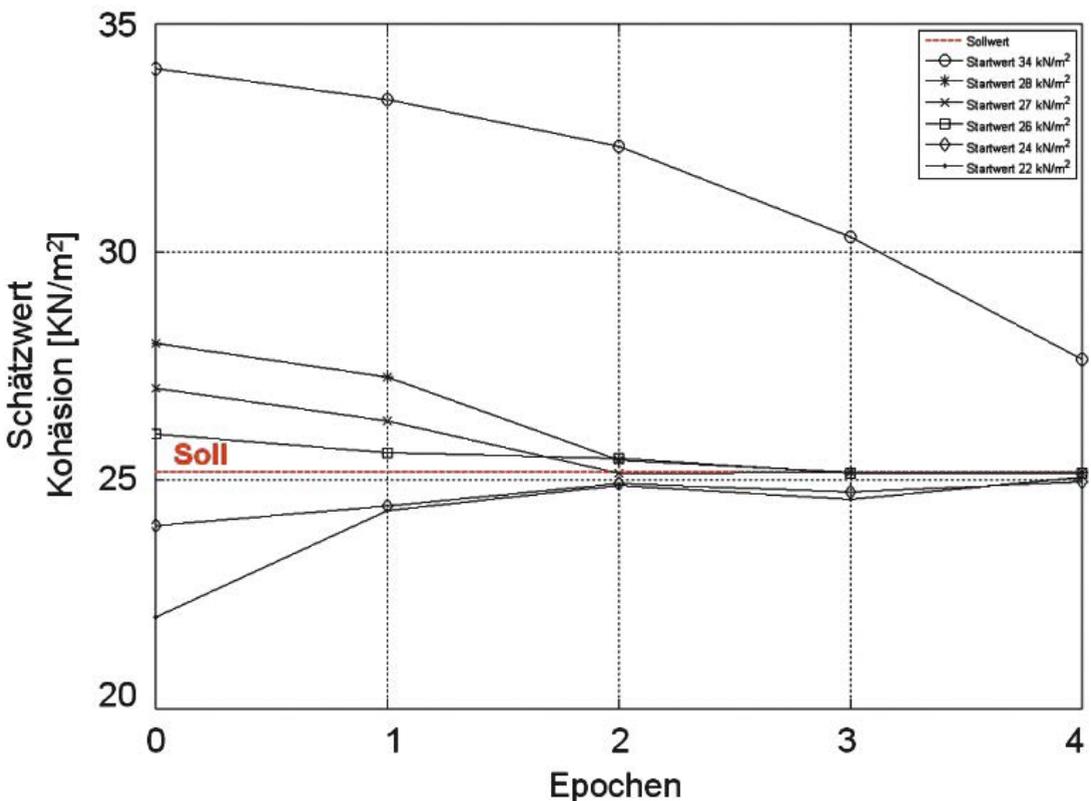


Abb. 6: Verlauf der Schätzwerte für die Kohäsion

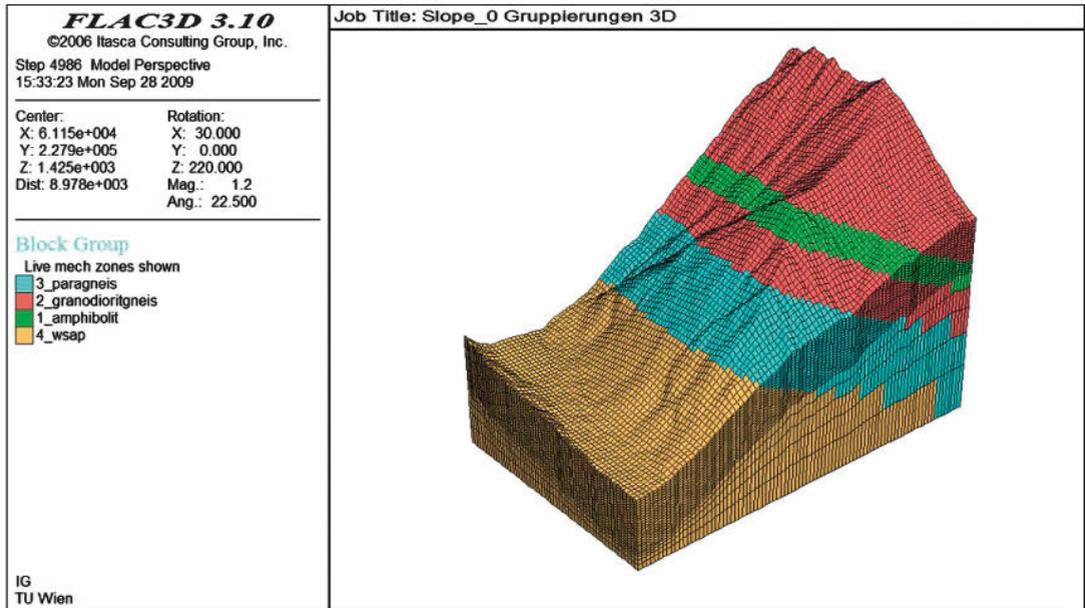


Abb. 7: FLAC^{3D}-Modell des Hanges „Steinlehnen“, Gries im Sellrain, Nordtirol, Österreich. Das Modell wurde anhand von Laserscannerdaten und geologischen Kartierungen (alpS GmbH) erzeugt und zeigt die geologischen Homogenbereiche.

durch eine präzise Schätzung erzielt wird. Es kann also ausgesagt werden, dass mit der adaptiven Kalman-Filterung ein adäquates Werkzeug zur Schätzung von Festigkeiten im numerischen Modell einer Massenbewegung vorliegt.

6. Ausblick

Das numerische Modell der Massenbewegung „Steinlehnen“ wird aus ca. 100.000 Gitterpunkten bestehen (Abbildung 7) und soll ebenfalls mit der Methode der adaptiven Kalman-Filterung kalibriert werden. Die Kalibrierung erfolgt dann nicht im statischen, sondern im dynamischen System. In diesem Fall müssen sowohl die Zeit als auch die am Modell angreifenden Kräfte berücksichtigt werden [11]. Grundlegende Untersuchungen zur Kalibrierung eines FLAC^{3D}-Modells mithilfe der adaptiven Kalman-Filterung im dynamischen System finden sich in [12].

Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung bedanken wir uns beim Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF), Projektnummer: P20137.

Für die Bereitstellung der Monitoringdaten bedanken wir uns bei der „alpS – Zentrum für Naturgefahren- und Risikomanagement GmbH“ (Innsbruck) und für die Durchführung der Tachymetermessungen bei Herrn Verm.-Ass. Dipl.-Ing. Volker Buhl (TU Darmstadt).

Weitere Informationen zum Projekt KASIP: <http://info.tuwien.ac.at/ingeo/research/kasip>

Referenzen

- [1] *United Nations University (2006)*: Land-slides, United Nations University, January 18, 2006, R/E01/06/rev1, <http://www.ehs.unu.edu/file.php?id=81>, letzter Zugriff 11/ 2009.
- [2] *Kasip (2010)*: Projektthomepage, [http:// info.tuwien.ac.at/ingeo/research/kasip](http://info.tuwien.ac.at/ingeo/research/kasip), letzter Zugriff 02/2010.
- [3] *Itasca (2006)*: Fast Lagrangian Analysis of Continua in three Dimensions. Version 3.1. Manual.
- [4] *Smith, G. D. (1985)*: Numerical solution of Partial Differential Equations – Finite Difference Methods. Oxford University Press.
- [5] *Meier, J., Schaedler, W., Borgatti, L., Corsini, A., Schanz, T. (2008)*: Inverse Parameter Identification Technique Using PSO Algorithm Applied to Geotechnical Modeling. In: Journal of Artificial Evolution and Applications, Volume 2008, Article ID 574613.
- [6] *Zangerl, C., Eberhardt, E., Schönlaub, H., Anegg, J., (2007)*: Deformation behaviour of deep-seated rock-slides in crystalline rock. Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands – Eberhardt, Stead & Morrison (eds.), Taylor Francis Group, London ISBN 978-0-415-44401-9, Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27-31 Mai, 901-907
- [7] *Mair am Tinkhof, K., Preh, A., Tentschert, E.-H., Eichhorn, A., Schmalz, T., Zangerl, C. (2009)*: KASIP – Knowledge-based Alarm System with Identified Deformation Predictor. Posterbeitrag. 58. Geomechanik Kolloquium / Franz-Pacher-Kolloquium. Salzburg, [http://info.tuwien.ac.at/ingeo/research/ kasip/publications.html](http://info.tuwien.ac.at/ingeo/research/kasip/publications.html).

- [8] *Roth, W. (1999)*: Entwicklung von Sicherheitsfaktoren mittels des kontinuums-mechanischen Finite-Differenzen-Codes FLAC. Diplomarbeit. Institut für Ingenieurgeologie. TU Wien.
- [9] *Brammer, K., & Siffling, G. (1989)*: Kalman-Bucy-Filter: deterministische Beobachtung und stochastische Filterung. R. Oldenbourg Verlag, München Wien.
- [10] *Eichhorn, A. (2005)*: Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven Kalman-Filterung. Dissertation. Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen. Universität Stuttgart.
- [11] *Isermann, R. (1988)*: Identifikation dynamischer Systeme. Band 1: Frequenzgangmessung, Fourieranalyse, Korrelationsanalyse, Einführung in die Parameterschätzung. Springer-Verlag.
- [12] *Schmalz, T., Eichhorn A., Mair Am Tinkhof, K., Preh, A., Tentschert, E., Zangerl C. (2010)*: Untersuchungen zur Implementierung eines adaptiven Kalman-Filters bei der Modellierung instabiler Talflanken mittels des Finite-Differenzen-Codes FLAC^{3D}, Ingenieurvermessung 2010 – T. Wunderlich (Hrsg.). München. 23.-27. Februar 2010. München: Wichmann.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Geophys. Thilo Schmalz, Institut für Geodäsie und Geophysik, Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, Technische Universität Wien, Gusshausstr. 27-29, A-1040 Wien
E-Mail: schmalz@tuwien.ac.at

Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn, Geodätisches Institut, Forschungsgruppe Messsysteme und Sensorik, Technische Universität Darmstadt, Petersenstr. 13, D-64287 Darmstadt, Deutschland
E-Mail: eichhorn@geod.tu-darmstadt.de

Prof. Dr. Ewald-Hans Tentschert, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien
E-Mail: Ewald-Hans.Tentschert@tuwien.ac.at

Dr. techn. Alexander Preh, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien
E-Mail: Alexander.Preh@tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Kurt Mair am Tinkhof, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien
E-Mail: kurt.mairamtinkhof@tuwien.ac.at

Dr. Christian Zangerl, alpS – Zentrum für Naturgefahren- und Risikomanagement GmbH, Grabenweg 3, A-6020 Innsbruck
E-Mail: Zangerl@alps-gmbh.com