

Bergschadenkunde, gestern, heute und morgen

Nándor Tamáskovics

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik

Lehrstuhl für Bodenmechanik, Grundbau und bergbauliche Geotechnik

Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Deponiebau und geotechnische Sicherungsverfahren

ZUSAMMENFASSUNG:

Die Prognose von Bodenbewegungen in Untersuchungsverfahren der Bergschadenkunde gehört zu einer der grundlegend wichtigen Aufgabenstellungen in Verbindung mit bergbaulichen Arbeiten und ihrer markscheiderischen Begleitung. Die klassischen Untersuchungsmethoden der Bergschadenkunde stützen sich auf markscherische Messungen an der Tagesoberfläche und im Inneren des beobachteten Gebirgsmassives. In neuester Zeit wurden in die quantitative Prognose von Bodenbewegungen verstärkt moderne Untersuchungsmethoden der Geomechanik einbezogen, deren Anwendung sowohl eine Kenntnis der Struktur und der Geometrie der anstehenden geologischen Materialien als auch eine tiefgreifende mechanische Charakterisierung ihres Deformationsverhaltens erfordert und sich damit einer der größten Herausforderungen der geotechnischen Modellierung stellt.

ABSTRACT:

The prediction of soil movements in mining subsidence studies is one of the most important disciplines in connection with mining works and their geodetic measurement control. The classical methods of mining subsidence analysis are based on measurements of the ground surface. Lately, geomechanic methods have been included into the quantitative prediction soil movements, requiring both detailed knowledge on the structure and geometry of the geologic materials in the ground and a profound characterization of their expected deformation behaviour, leading to one of the greatest challenges in geotechnical modelling.

1 Einleitung

Die Prognose von Bodenbewegungen in Untersuchungsverfahren der Bergschadenkunde gehört zu einer der grundlegend wichtigen Aufgabenstellungen in Verbindung mit bergbaulichen Arbeiten und ihrer markscheiderischen Begleitung [5]. Die klassischen Untersuchungsmethoden der Bergschadenkunde stützen sich auf markscherische Messungen an der Tagesoberfläche und im Inneren des beobachteten Gebirgsmassives. In neuester Zeit wurden in die quantitative Prognose von Bodenbewegungen verstärkt moderne Untersuchungsmethoden der Geomechanik einbezogen, deren Anwendung sowohl eine Kenntnis der Struktur und der Geometrie der anstehenden geologischen Materialien als auch eine tiefgreifende mechanische Charakterisierung ihres Deformationsverhaltens erfordert und sich damit einer der größten Herausforderungen der geotechnischen Modellierung stellt.

2 Klassische Untersuchungsmethoden der Bergschadenkunde

Die klassischen Untersuchungsmethoden in der Bergschadenkunde gehen von einer phänomenologischen Behandlung des beobachteten Gebirgsmassives aus, in dem die bergbauliche Tätigkeit durchgeführt wird. Sowohl die geometrischen Verhältnisse im aktiven Grubenbauwerk als auch die eintretenden bergbaubedingten Verschiebungen sind durch geodätische Messungen meistens gut geklärt. Aus der Vorfelderkundung liegen auch umfangreiche Informationen zur geologischen Struktur des Gebirgsmassives vor. Anhand der Auswertung von Verschiebungsamplituden in den primären und sekundären Verschiebungszonen können analytische Modelle zur quantitativen Bergschadensprognose formuliert werden, wie zum Beispiel die sehr erfolgreiche Trogtheorie. Die systematische Anwendung kalibrierter quantitativer Bergschadenprognoseverfahren auf ein Bergbaugebiet kann in die Steuerung der bergbaulichen Betriebsführung zur Optimierung des Bergschadenspotenzials einbezogen werden [5].

3 Fortgeschrittene Untersuchungsmethoden der Bergschadenkunde

In prognostische Betrachtungen der Bergschadenkunde wurden in neuester Zeit verstärkt fortgeschrittene numerische Methoden der Geotechnik erfolgreich einbezogen. Die Problemstellung der rechnerischen Erfassung von Bodenbewegungen in der Bergschadenkunde gehört mit der damit verbundenen Beschreibung des instationären Deformationsverhaltens von geologischen Materialien zu den größten Herausforderungen der geotechnischen Modellierung in der Gegenwart und in der Zukunft. Das wichtigste Arbeitsgebiet stellt die Entwicklung von Materialgesetzen zur Erfassung des elasto-visko-plastischen Verformungsverhaltens von Geomaterialien unter den Randbedingungen von Bergschadenprozessen mit dem Ziel, die relevanten Deformationsprozesse mit möglichst wenigen materialspezifischen Kennwerten zu erfassen, deren Anzahl den mathematischen Aufwand bei der Kalibration und bei der Anwendung in der Praxis erheblich beeinflusst.

Für eine geomechanisch gestützte bergschadenkundliche Untersuchung stehen derzeit sowohl Kontinuumsmechanische als diskontinuumsmechanische numerische Methoden zur Verfügung. In kontinuumsmechanischen Modellen wird das beobachtete Gebirgsmassiv makroskopisch erfasst. Diskontinuumsmechanische Modelle können Trennflächen und bevorzugte Versagenszonen im Gebirgsmassiv fokussiert in die geomechanische Modellierung einbeziehen. Großräumige Betrachtungen bergschadenkundlicher Untersuchungen können derzeit noch nur begrenzt mit mikromechanischen Modellen bedient werden, die das mechanische Verhalten von Geomaterialien auf der Ebene der Einzelpartikeln beschreiben und deren eindeutige Parameteridentifikation nicht immer möglich ist.

Die Arbeitsschritte bei einer geomechanisch gestützten bergschadenkundlichen Analyse sind die folgenden:

1. **Geologische und hydrogeologische Modellbildung:** In dem modellierten Gebirgsmassiv müssen die geologischen und hydrogeologischen Bedingungen erfasst werden. In einem aktiven Bergbauggebiet kann sich die Modellbildung auf die erhobenen Erkundungsdaten stützen. In Altbergbaugebieten kann eine Modellbildung durch fehlende Daten und eine begrenzte Möglichkeit einer Nacherkundung erheblich erschwert werden. Die möglichst genaue Erfassung der hydrogeologischen Bedingungen und der potenziellen Belastungen aus Wasserdrücken sind für eine Deformationsprognose von wichtiger Bedeutung.
2. **Geotechnische Modellbildung:** Die in der geologischen Modellbildung erfassten Materialien müssen gemäß ihrem zu erwartenden mechanischen Verhalten als eine geotechnische Einheit identifiziert und zugeordnet werden.
3. **Beschreibung des Materialverhaltens:** Das Deformationsverhalten der anstehenden Materialien wird mit Materialgesetzen abgebildet, die die wichtigsten Prozesse des mechanischen Verhaltens mit möglichst wenig materialspezifischen Kennwerten erfassen. Infolge der Belastungen des bergbaulich beanspruchten Gebirgsmassivs sind grundsätzlich sowohl elastische als auch plastische Deformationen zu erwarten und der Deformationsvorgang kann weiterhin mit zeitabhängigen Effekten eines primären, sekundären oder tertiären Kriechverhaltens unterlagert werden. Für eine geomechanisch gestützte Bergschadenanalyse kommt der genauen Erfassung des volumetrischen Deformationsverhaltens eine besondere Bedeutung zu, die plastische Scherdeformationen begleiten. Zur Beschreibung des Materialverhaltens muss die räumliche Verteilung der materialspezifischen Deformations- und Festigkeitskennwerte sowie der materialspezifischen Zustandsgrößen im betrachteten Gebirgsmassiv vorgegeben werden. Die Erfassung des Anfangszustandes der materialspezifischen Eigenschaften steht mit der Modellierung des Anfangsspannungszustandes in enger Verbindung.
4. **Erfassung des Ausgangsspannungszustandes:** In der Untersuchung des Deformationsvorganges in einem bergbaulich beanspruchten Gebirgsmassiv bildet die Ermittlung des Ausgangsspannungszustandes einen wichtigen Schritt. Der Ausgangsspannungszustand

wird sowohl durch das Eigengewicht als auch durch eine potenzielle geologische Vorbeanspruchung der im Gebirgsmassiv anstehenden Materialien geprägt, deren detaillierte Abbildung eine der größten Herausforderungen darstellt und oft nur mit plausiblen Annahmen angesetzt werden kann.

5. **Primärer bergbaulich geprägter Deformationsvorgang:** In Verbindung mit dem bergbaulichen Arbeitsprozess werden primäre Verschiebungen in das betrachtete bergbaulich beanspruchte Gebirgsmassiv eingetragen, die meist als eine Randbedingung in das mechanische Modell eingeführt werden.
6. **Sekundärer bergbaulich geprägter Deformationsvorgang:** Infolge des primären Deformationsvorganges wird ein sekundärer Deformationsvorgang im betrachteten bergbaulich beanspruchten Gebirgsmassiv hervorgerufen. Auf die Qualität der Abbildung des sekundären, meist zeitabhängigen Deformationsvorganges hat die Genauigkeit der Ergebnisse in den zuvor genannten Arbeitsschritten einen entscheidenden Einfluss. In einer umfassenden bergschadenkundlichen Analyse muss eine Abfolge von gekoppelten primären und sekundären Deformationsvorgängen in einzelnen Lastschritten betrachtet werden.

Die geomechanisch gestützten Untersuchungsmethoden der Bergschadenkunde beinhalten sowohl die Prognose von Deformationen als auch den Versagensfall eines Tagesbruches. Schwierig erweist sich dabei die Erfassung der Steifigkeit in dem Lockergestein in der Versagenszone. Ähnliche Problemstellungen des problematischen Kennwertansatzes ergeben sich jedoch auch in den etablierten alternativen, auf analytische und phänomenologische Beobachtungen basierenden Methoden der Tagesbruchprognose genauso. Die geomechanischen Modelle bergschadenkundlicher Untersuchungen bieten den entscheidenden Vorteil der klaren Kennwertidentifikation und die Alternative zu ihrer Bestimmung in Laborversuchen unter definierten mechanischen Randbedingungen.

Bei Deformationsmessungen im Rahmen von bergschadenkundlichen Untersuchungen wird ein sehr großer Datenumfang über einen langen Beobachtungszeitraum systematisch erhoben, wodurch sich die Möglichkeit zur Anwendung inverser Methoden anbietet. Dabei werden die materialspezifischen Kennwerte und Zustandsvariablen der verwendeten Materialgesetze aus systematischen Rückrechnungen ermittelt und präzisiert. Die synergetische Ergänzung der Arbeitsgebiete des Markscheidewesens und der Geotechnik auf dem Gebiet der Bergschadenkunde eröffnet weite Möglichkeiten für die Anwendung geomechanischer Untersuchungsmethoden.

In geomechanischen Problemstellungen lassen sich materialspezifische Parameter häufig nicht scharf eingrenzen und es ergibt sich die Frage nach Berechnungsmethoden mit unscharfen Zahlen, stochastischen Methoden oder Intervallalgorithmen mit dem Ziel, die zusammengesetzten Auswirkungen der Variation von Eingangsgrößen auf das Berechnungsergebnis zu untersuchen. Zur Behandlung dieses Problems wurden zahlreiche theoretische Ansätze entwickelt, wie die Arithmetik mit unscharfen Zahlen (Fuzzy-Methoden), die daraus entwickelten "Fuzzy-Finite-Element-Methoden", die "Point-Estimate-Methoden" sowie die klassischen Monte-Carlo-Simulationen [6].

Die Anwendung von geomechanischen Simulationen mit numerischen Methoden unter dem Einbeziehen von unscharfen Zahlen stoßen schnell an ihre Grenzen, wenn eine hohe Zahl von materialspezifischen Eingangsgrößen oder Dimensionierungsgrößen des betrachteten Vorganges unscharf abgebildet werden muss und der rechentechnische Aufwand unvermeidbar ansteigt. Zur Abwendung dieses Problems wurde für geomechanische Berechnungen das wahrscheinlichkeitstheoretisch gestützte Intervallberechnungsverfahren der "Random-Set-Theorie" vorgeschlagen und in zahlreichen praktischen Anwendungen erfolgreich angewendet. Die Grundidee der "Random-Set-Theorie" besteht darin, die unscharfen Eingangsgrößen in einzelne Intervalle mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten einzuordnen und die rechnerischen Untersuchungen für alle möglichen Kombinationen der unteren (Bel="Belief function") und oberen (Pl="Plausibility function") Intervallgrenzen durchzuführen. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse führt wiederum zu einem mit Eintrittswahrscheinlichkeiten gewichteten Intervall der Ergebnisgrößen (Zielgrößen) des modellierten Prozesses. Bei der Anwendung der "Random-Set-Theorie" muss beachtet werden, dass die theoretische Formulierung eine Annahme zur Monotonie der Antwortfunktion des modellierten physikalischen Vorganges in den vorgegebenen Beobachtungsintervallen einführt. Der große Vorteil der praktischen Anwendung der "Random-Set-Theorie" besteht in der deutlichen Reduktion der Anzahl notwendiger Berechnungen auf ein vertretbares Maß für ingenieurtechnische Anwendungen [2, 8, 9, 6, 7].

Tab. 1: Materialkennwerte und Modellparameter

Parameter:			Variante:							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Materialkennwerte:										
Dichte	ρ	$[kg/m^3]$	2000							
Reibungswinkel	φ	$[^\circ]$	30	30	10	10	30	30	10	10
Kohäsion	c	$[kN/m^2]$	1	1	10	10	1	1	10	10
Dilatanzwinkel	ψ	$[^\circ]$	0							
Querdehnungszahl	ν	$[1]$	0,33	0,33	0,45	0,45	0,33	0,33	0,45	0,45
Referenzspannung	p_{ref}	$[N/m^2]$	10^5							
Elastizitätsmodul	E_{ref}	$[N/m^2]$	10^6	10^6	10^6	10^6	10^7	10^7	10^7	10^7
Steifigkeitsexponent	m	$[1]$	0,50	0,50	0,75	0,75	0,50	0,50	0,75	0,75
Modellparameter:										
Mächtigkeit	h	$[m]$	30	50	30	50	30	50	30	50
Primärradius	r_0	$[m]$	10							
Außenradius des Modells	r_1	$[m]$	50							
Primärverschiebung	u_0	$[m]$	1							
Sekundärverschiebung	u_1	$[m]$	0,369	0,148	0,338	0,122	0,281	0,152	0,548	0,081

4 Geomechanisch gestützte bergschadenkundliche Untersuchung

Eine geomechanisch gestützte Bergschadenanalyse bietet den Vorteil, dass das mechanische Verhalten des modellierten Gebirgsmassivs mit deterministischen mathematischen Modellen detailliert erfasst werden kann. In einer Serie von systematischen Berechnungen wird die Leistungsfähigkeit von geomechanischen Untersuchungsmethoden für den Fall eines synthetischen Beispielbergschadens dargestellt.

Wenn auch die Grenzen der Anwendbarkeit oft aufgezeigt wurden, ist das elasto-plastische DRUCKER-PRAGER-Materialmodell zur Untersuchung des mechanischen Deformationsverhaltens von Geomaterialien vielfach erfolgreich herangezogen worden. In den folgenden Beispielberechnungen wurde das DRUCKER-PRAGER-Materialmodell zur Beschreibung eines ideal elasto-plastischen Deformationsvorganges verwendet. Die materialspezifischen Kennwerte sind wie folgt definiert:

- Die Fließfunktion des DRUCKER-PRAGER-Materialmodells:

$$f = \beta \sqrt{\frac{3}{2} J_2(\boldsymbol{\sigma})} + \alpha I_1(\boldsymbol{\sigma}) - k \leq 0, [1].$$

Die Größe $J_2(\boldsymbol{\sigma})$ steht für die zweite Invariante des Spannungsdeviators und $I_1(\boldsymbol{\sigma})$ für die erste Invariante der Spannung $\boldsymbol{\sigma}$.

- Der Parameter β ist eine implementationsbedingte Konstante:

$$\beta = \sqrt{\frac{2}{3}}, [1].$$

- Der Koeffizient α steht mit dem Reibungswinkel φ im Zusammenhang:

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3} (3 + \sin \varphi)}, [1].$$

- Der Term k wird aus der Kohäsion c abgeleitet:

$$k = \frac{6 c \cos \varphi}{\sqrt{3} (3 + \sin \varphi)}, [1].$$

- Die nicht-assozierte Fließregel (plastisches Potenzial) wird ähnlich der Fließfunktion formuliert:

$$g = \gamma \sqrt{\frac{3}{2} J_2(\boldsymbol{\sigma})} + \delta I_1(\boldsymbol{\sigma}), [1].$$

- Der Koeffizient γ ist eine implementationsbedingte Konstante:

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{3}}, [1].$$

- Der Koeffizient δ wird aus dem Dilatanzwinkel ψ abgeleitet:

$$\delta = \frac{2 \sin \psi}{\sqrt{3} (3 + \sin \psi)}, [1].$$

- Die Modellierung der Steifigkeit erfolgte mit einer spannungsabhängigen Formulierung des Elastizitätsmoduls. Der Referenzwert des Elastizitätsmoduls E_{ref} ist auf dem Niveau der Referenzspannung p_{ref} definiert. Der Elastizitätsmodul E wird mit dem Exponenten der Steifigkeit m berechnet:

$$E = E_{ref} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^m, [N/m^2].$$

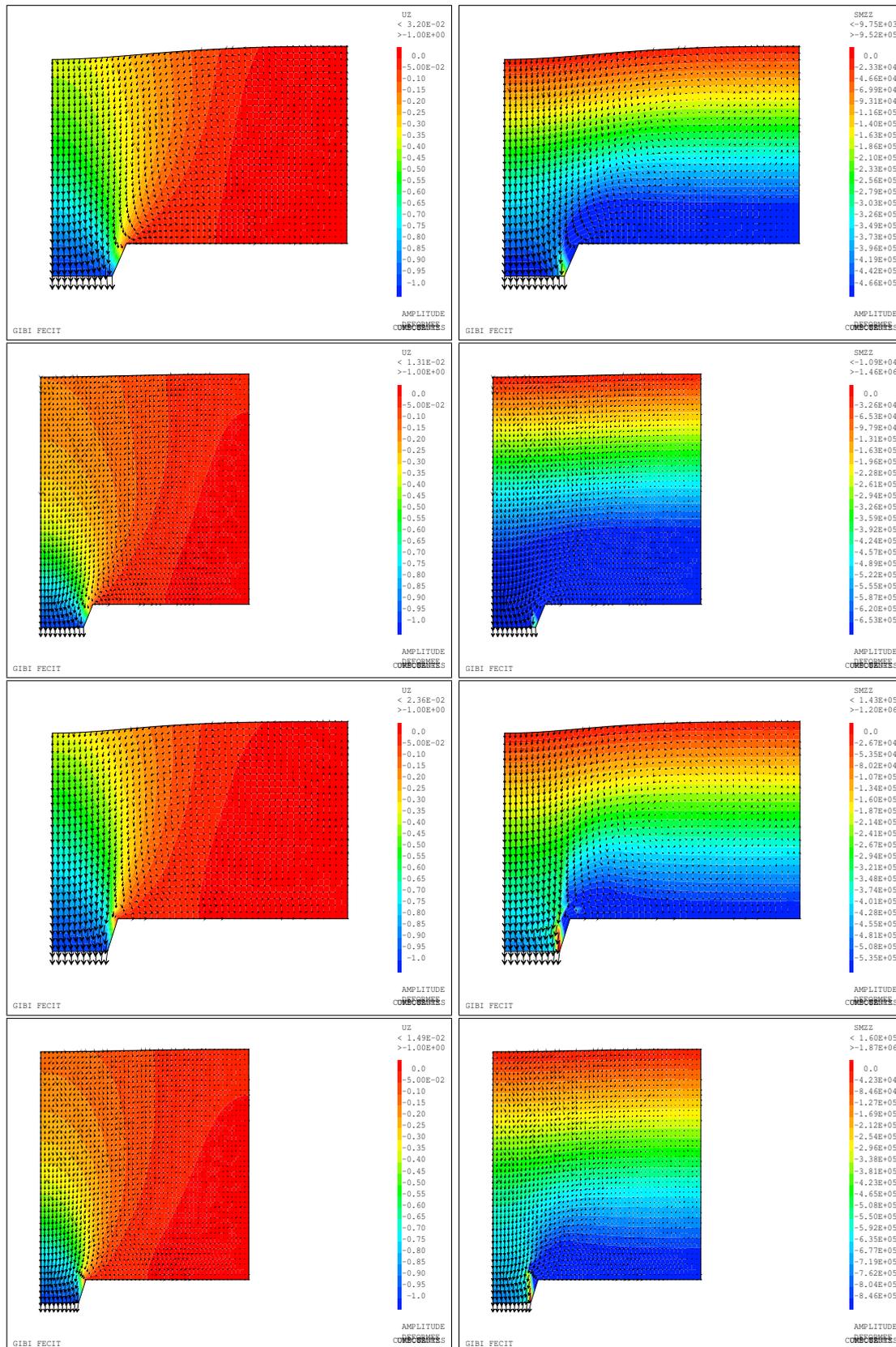


Abb. 1: Prognose des sekundären Verschiebungs- und Spannungszustandes nach Primärdeformation im Gebirgsmassiv

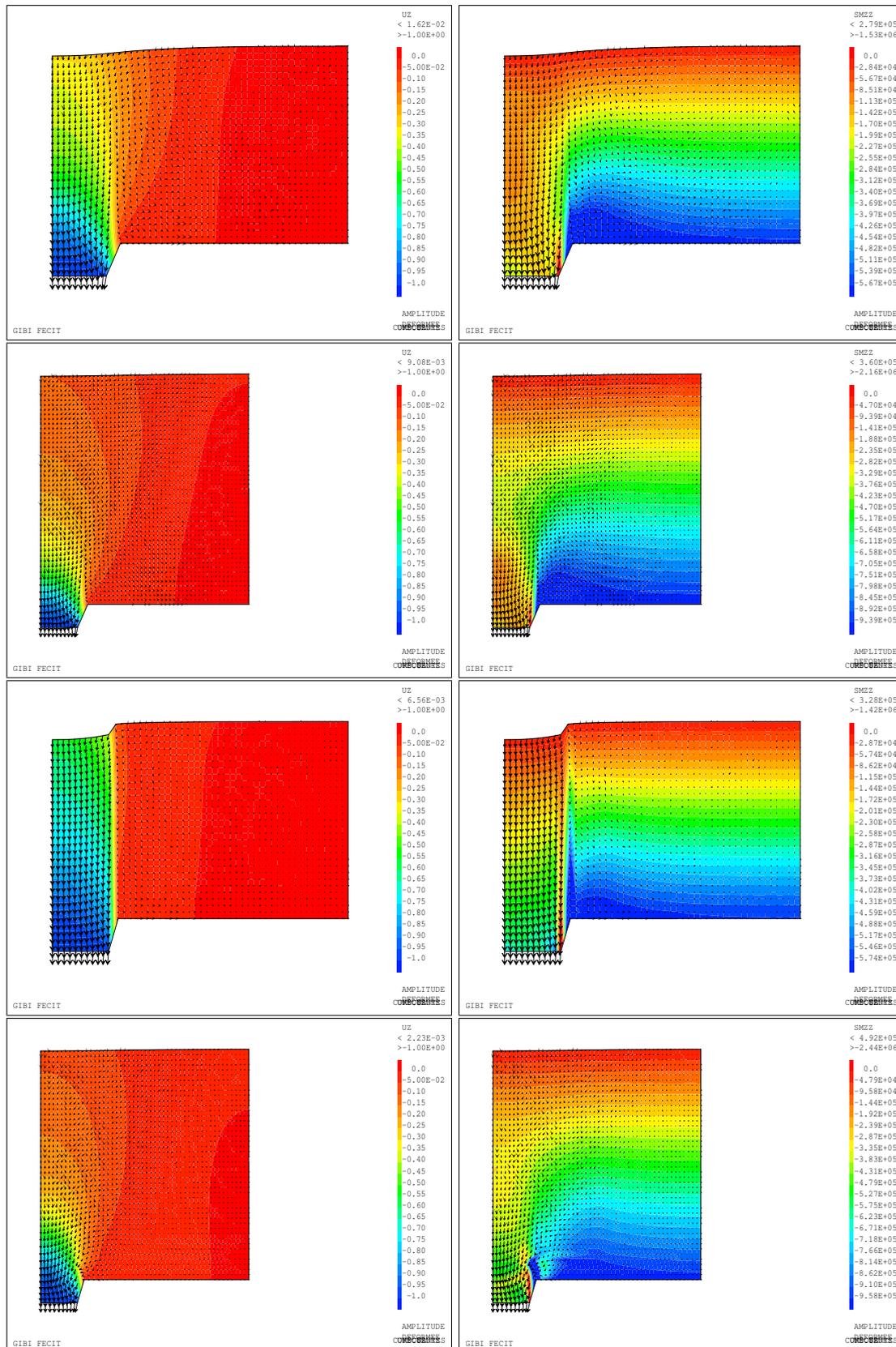


Abb. 2: Prognose des sekundären Verschiebungs- und Spannungszustandes nach Primärdeformation im Gebirgsmassiv

Beim Ableiten des Zusammenhanges zwischen dem Koeffizienten α und dem Term k mit dem Reibungswinkel φ und der Kohäsion c sowie zwischen dem Koeffizienten δ und dem Dilatanzwinkel ψ wurde die kreiskegelförmige Fließfläche des DRUCKER-PRAGER-Materialmodells an den sechseckigen Kegel der Fließfläche des MOHR-COULOMB'schen Versagenskriteriums auf der sicheren Seite, im Grenzzustand des Zuges $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ angepasst. Eine Anpassung ist auch im Grenzzustand des Druckes $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ sowie bei beliebiger Wichtung (zum Beispiel Mittelwert) der beiden Grenzfälle ebenso möglich.

Zur Verdeutlichung der wichtigsten Deformationsverhältnisse bei einer geomechanisch gestützten syntethischen Bergschadenprognose wurden Beispielberechnungen mit systematischer Variation wichtiger bergschadenkundlicher Prozessparameter durchgeführt. Die materialspezifischen Kennwerte und die geometrischen Angaben der einzelnen Beispielmolelle sowie die erzielten Berechnungsergebnisse für die maximale Verschiebungsprognose an der Oberfläche und innerhalb des Gebirgsmassives wurden in der Tabelle 1 zusammengestellt.

In den Beispielmolellen wurden acht Fälle einer geomechanisch gestützten Bergschadenprognose unter Variation der Mächtigkeit des betrachteten Gebirgsmassives, der Scherfestigkeit und der Steifigkeit im anstehenden Material berechnet, dessen mechanisches Verhalten mit dem ideal-elasto-plastischen DRUCKER-PRAGER-Materialmodell abgebildet wurde. Das Material wurde über die gesamte Mächtigkeit h des betrachteten Gebirgsmassivs als homogenes Gradientenmedium der elastischen Steifigkeit modelliert, indem der Elastizitätsmodul E ausgehend von der wirksamen Spannung im Ausgangszustand spannungsabhängig eingestellt wurde. Die Querdehnungszahl wurde auf einem materialspezifischen Wert konstant gehalten. Die elastische Steifigkeit blieb im Verlauf der Berechnung der Bergschadenprognose unabhängig von eintretenden Belastungs- und Entlastungsvorgängen konstant. In dem rotationssymmetrischen Modell mit der radialen Ausdehnung von $r_1 = 50 [m]$ und unterschiedlich variiertes Höhe h wurde eine primäre Vertikalverschiebung $u_0 = 1 [m]$ bis zu einem Primärradius von $r_0 = 10 [m]$ eingeführt. Am unteren Modellrand wurden die Vertikalverschiebungen und an den seitlichen Modellrändern die radialen Verschiebungen unterbunden. Eine Wirkung aus Wasserdrücken wurde in die Berechnung nicht einbezogen.

Die Berechnungsergebnisse für die einzelnen, in der Tabelle 1 genannten Berechnungsfälle sind in den Abbildungen 1 und 2 ersichtlich, wo auf der linken Seite jeweils das resultierende Verschiebungsfeld und auf der rechten Seite jeweils das resultierende Feld der wirksamen Vertikalspannungen mit farbigen Grafiken der jeweiligen Amplituden auf dem Hintergrund des überhöht dargestellten deformierten Kontinuums aufgetragen wurde. Das Verschiebungsfeld auf der linken Seite wurde zusätzlich mit einer überhöhten Vektordarstellung unterlegt.

Die Beispiele mit den Parametersätzen 1, 2, 5 und 6 wurden für eine Schicht aus einem rolligen und kohäsionslosen Lockergestein mit unterschiedlichen Mächtigkeiten des betrachteten Gebirgsmassivs sowie unterschiedlichen Steifigkeiten erstellt. Die Ergebnisse sind jeweils in den oberen vier Darstellungen der Abbildungen 1 und 2 ersichtlich. Die Beispiele mit den

Parametersätzen 3, 4, 7 und 8 wurden für eine Schicht aus einem bindigen und kohäsiven Lockergestein mit unterschiedlichen Mächtigkeiten des betrachteten Gebirgsmassivs sowie unterschiedlichen Steifigkeiten erstellt. Die Ergebnisse sind jeweils in den unteren vier Darstellungen der Abbildungen 1 und 2 ersichtlich. Der Tabelle 1 können die berechneten maximalen Sekundärverschiebungen an der Oberfläche des Modells entnommen werden.

Die Berechnungsergebnisse zeigen deutlich, dass der Betrag eines potenziellen Bergschadens bei gleichem Primärereignis und unter identischen geometrischen Bedingungen sowohl durch die Steifigkeits- als auch durch die Scherfestigkeitseigenschaften des anstehenden Materials beeinflusst wird. Unter ungünstiger Kombination der Eingangsgrößen kann ein Durchbruch des Primärereignisses bis zur Oberfläche in Form eines Tagesbruches ereignen (siehe Darstellungen 5 und 6 in der Abbildung 2).

Die vorliegenden Untersuchungen wurden mit dem leistungsfähigen Finite-Element-Programmsystem **Cast3M** (Nachfolgeversion des Programmsystems CASTEM-2000) vorgenommen, das durch die französische staatliche Behörde für nukleare Energie und alternative Energien **CEA** über mehrere Jahrzehnte hinweg entwickelt wurde. Das Programmsystem verfügt über einen offenen Quelltext in der speziellen objektorientierten Programmiersprache ESOPE (Derivat aus FORTRAN77) und seine Anwendung ist in der Forschung und Lehre mit der Bedingung der korrekten Bezeichnung der Urheberrechte *kostenfrei* [1].

Die besondere softwaretechnische Architektur des Programmsystems **Cast3M** als daten- und prozedurbasiertes mathematisches und mechanisches Baukastensystem ermöglicht eine sehr flexible Behandlung aller Felder physikalischer Größen während des Lösungsvorganges. Damit ist es möglich, beliebige Anfangszustände des geostatischen Spannungszustandes sowie der räumlichen Verteilung materialspezifischer Kennwerte und Zustandsvariablen im modellierten Material flexibel einzustellen. Die Modellierung erfolgt mit einer leistungsfähigen Programmiersprache (GIBIANE), die die parametrisierte Variation der Geometrie sowie der materialspezifischen Kennwerte und damit die einfache Berechnung von diversen standortspezifischen Konfigurationen bietet. Damit ist das Berechnungssystem für Untersuchungen mit einer systematischen Variation der Eingangsgrößen, wie dies bei einer Untersuchungsmethode mit unscharfen Zahlen erforderlich ist, ebenso hervorragend geeignet.

Die Berechnung eines Problems mit einer umfangreichen Variation von Eingangsparametern ist heute ohne die Anwendung von Parallelrechnern undenkbar. In Anbetracht der potenziellen Größe von Gebieten, die in bergschadenkundlichen Betrachtungen mit mechanischen Modellen erfasst werden müssen, bietet sich die Anwendung einer parallelisierten Modellierung an, in dem das Modell in einzelne Untergebiete zerlegt wird, deren Berechnung zur gleichen Zeit auf geteilten Rechenressourcen vorgenommen wird. Durch die Vernetzung der parallelen Recheneinheiten wird in jedem Rechenschritt ein Austausch von Daten für die Grenzgebiete zwischen den Untergebieten durchgeführt.

Eine umfangreiche Parametervariation für einzelne Modelle, wie dies zum Beispiel auch bei der Anwendung von Untersuchungsmethoden mit unscharfen Zahlen notwendig ist, erfordert das gleichzeitige Lösen von zahlreichen Aufgabenstellungen, die in Rechenschritten während einer parallelen Berechnung miteinander in keiner Verbindung stehen. Bei einer Vielzahl von unabhängigen Berechnungsvarianten wird über eine "embarrassingly parallel" Simulation gesprochen und für eine leistungsfähige Berechnung ist eine gute Organisation der Ressourcenverteilung innerhalb des Parallelrechners entscheidend. Zu diesem Zweck stehen spezielle Anwendungen ("Load-balancer", wie das populäre kostenfreie Verwaltungsprogramm für Parallelrechner **SLURM**) zur Verfügung, in denen parallele Berechnungsreihen als ein sogenanntes "Job Array" ausgeführt werden.

5 Zusammenfassung, Ausblick

Die Prognose von Bodenbewegungen in Untersuchungsverfahren der Bergschadenkunde gehört zu einer der grundlegend wichtigen Aufgabenstellungen in Verbindung mit bergbaulichen Arbeiten und ihrer markscheiderischen Begleitung. Die klassischen Untersuchungsmethoden der Bergschadenkunde stützen sich auf markscherische Messungen an der Tagesoberfläche und im Inneren des beobachteten Gebirgsmassives. In neuester Zeit wurden in die quantitative Prognose von Bodenbewegungen verstärkt moderne Untersuchungsmethoden der Geomechanik einbezogen, deren Anwendung sowohl eine Kenntnis der Struktur und der Geometrie der anstehenden geologischen Materialien als auch eine tiefgreifende mechanische Charakterisierung ihres Deformationsverhaltens erfordert und sich damit einer der größten Herausforderungen der geotechnischen Modellierung stellt.

Bei Deformationsmessungen im Rahmen von bergschadenkundlichen Untersuchungen wird ein sehr großer Datenumfang über einen langen Beobachtungszeitraum systematisch erhoben, wodurch sich die Möglichkeit zur Anwendung inverser Methoden anbietet. Dabei werden die materialspezifischen Kennwerte und Zustandsvariablen der verwendeten Materialgesetze aus systematischen Rückrechnungen ermittelt und präzisiert. Die synergetische Ergänzung der Arbeitsgebiete des Markscheidewesens und der Geotechnik auf dem Gebiet der Bergschadenkunde eröffnet weite Möglichkeiten für die Anwendung geomechanischer Untersuchungsmethoden.

In einer systematischen Berechnung einer synthetischen bergschadenkundlichen Aufgabenstellung in einem elasto-plastischen Gradientenmedium der Steifigkeit wurde die Leistungsfähigkeit von makroskopischen geomechanischen Untersuchungsmethoden unter der Variation der geometrischen und materialspezifischen Bedingungen vorgestellt. Die Berechnungsergebnisse zeigen deutlich, dass der Betrag eines potenziellen Bergschadens bei gleicher Primärereignis und unter identischen geometrischen Bedingungen sowohl durch die Steifigkeits- als auch durch die Scherfestigkeitseigenschaften des anstehenden Materials beeinflusst wird. Unter ungünstiger Kombination der Eingangsgrößen kann ein Durchbruch des Primärereignisses bis zur Oberfläche in Form eines Tagesbruches ereignen.

Die Berechnung eines Problems mit einer umfangreichen Variation von Eingangsparametern ist heute ohne die Anwendung von Parallelrechnern undenkbar. In Anbetracht der potenziellen Größe von Gebieten, die in bergschadenkundlichen Betrachtungen mit mechanischen Modellen erfasst werden müssen, bietet sich die Anwendung einer parallelisierten Modellierung an, in dem das Modell in einzelne Untergebiete zerlegt wird, deren Berechnung zur gleichen Zeit auf geteilten Rechenressourcen vorgenommen wird. Eine umfangreiche Parametervariation für einzelne Modelle, wie dies zum Beispiel auch bei der Anwendung von Untersuchungsmethoden mit unscharfen Zahlen notwendig ist, erfordert das gleichzeitige Lösen von zahlreichen Aufgabenstellungen, die in Rechenschritten während einer parallelen Berechnung miteinander in keiner Verbindung stehen.

Literatur

- [1] COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (CEA): **Cast3M - Modulares Programmsystem mit offenem Quelltext zur Lösung physikalischer Probleme mit der Methode der Finiten Elemente - Anwendung in der Lehre und Forschung kostenfrei**; Internetseite, Information, Download und Dokumentation: <http://www-cast3m.cea.fr>; CEA, Saclay, Paris, 2016.
- [2] DUBOIS, D.; PRADE, H.: **Random Sets and Fuzzy Interval Analysis**; *Fuzzy Sets and Systems*, vol.42(1991), p.87-101.
- [3] FENK, J.: **Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergebirge**; *Freiberger Forschungshefte, Reihe A, Geotechnik, Ingenieurgeologie, Bergbautechnologie, Verfahrenstechnik*; A639b, pp.139, Freiberg, 1981.
- [4] FENK, J.: **Tagesbrüche über Hohlräumen im Lockergebirge mit geneigter Schichtlagerung**; *Schlußbericht zum Thema DFG-II-D-02-Fe488/1-1*, pp.105, Freiberg, 2000.
- [5] KRATZSCH, H.: **Bergschadenkunde**; ISBN:3-00-001661-9, p.844, *Deutscher Markscheiderrischer Verein e.V., Herne*, 1997.
- [6] PESCHL, G.M.; SCHWEIGER, H.F.: **Application of the random set finite element method (RS-FEM) in geotechnics**; *Proceedings of the 9th Symposium on Numerical Models in Geomechanics - NUMOG IX, Ottawa*, p.249-255, Ottawa, 2004.
- [7] SHEN, H.; WIDODO, S.; KLAPPERICH, H.; TAMASKOVICS, N.: **Reliability Analysis of Reinforced Slope by Random Set Theory**; in Bräu, G. (ed.): *Abschrift FS-KGEO, 2013*, pp.4, München, 2013.
- [8] TONON, F.; BERNARDINI, A.; MAMMINO, A.: **Determination of Parameters Range in Rock Engineering by Means of Random Set Theory**; *Reliability Engineering and System Safety*, vol.70(2000), no.3, p.241-261.
- [9] TONON, F.; BERNARDINI, A.; MAMMINO, A.: **Reliability Analysis of rock Mass Response by Means of Random Set Theory**; *Reliability Engineering and System Safety*, vol.70(2000), no.3, p.263-282.