

# Gestaltung, Validierung und Optimierung von Messprogrammen für geotechnische Aufgabenstellungen

Tom Schanz<sup>1</sup> und Jörg Meier<sup>2</sup>

Beim Entwurf von den Bau begleitenden Messprogrammen steht die Frage „Wo messe ich welche Größen wie häufig und mit welcher notwendigen Präzision?“ im Mittelpunkt. Messprogramme sind kein Selbstzweck zur Anhäufung beliebig detaillierter und umfangreicher Daten, sondern dienen u. a. der quantitativen Beantwortung von Fragen nach der Gebrauchstauglichkeit und der Standsicherheit. Daraus leitet sich unmittelbar ein wesentlicher Abstimmungsbedarf zwischen den Verantwortlichen für die Gestaltung des Messprogramms und für die Durchführung der notwendigen Nachweise, und das im Vorfeld der eigentlichen Berechnungen, ab.

Oben gestellte Frage kann erfolgreich mit den Methoden der angewandten Mathematik beantwortet werden. Zu quantifizieren ist dazu letztendlich die Sensitivität der Systemantwort (z. B. von Deformationen, Spannungen oder hydraulischen Potentialen) bezüglich häufig zunächst unbekannter Systemparameter, wie z.B. von Anfangs- und Randbedingungen, Geometrien oder Materialkennwerten.

## **Zusammenfassung:**

Eine umfassende messtechnische Instrumentierung ist heutzutage integraler Bestandteil der Mehrzahl aller „bedeutungsvollen“ geotechnischen Projekte. Nicht zuletzt auf Grund immer anspruchsvollerer Vorhaben erweitert sich das Nutzungsgebiet der so gewonnenen Messdaten zunehmend von einer reinen Überwachung und Beweissicherung zu einem wichtigen Indikator für die Entscheidungsfindung im Rahmen der operativen Ausführung (im Sinne der „Beobachtungsmethode“). Um diese Nutzungsbereiche zu eröffnen müssen die von Projekt zu Projekt unterschiedlich zu betrachtenden relevanten Aspekte der Systemantwort des jeweiligen Vorhabens in ausreichender Qualität und Umfang wieder gegeben werden. So ist

---

<sup>1</sup> Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Tom Schanz, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Bodenmechanik, Coudraystraße 11c, D 99421 Weimar, [tom.schanz@uni-weimar.de](mailto:tom.schanz@uni-weimar.de),

<sup>2</sup> Dipl.-Ing. Jörg Meier, Bauhaus-Universität Weimar, Professur Bodenmechanik, [joerg.meier@vint.de](mailto:joerg.meier@vint.de)

grundsätzlich ein Messprogramm anzustreben, welches möglichst kosteneffizient ausreichende Daten zur Verfügung stellt.

Da die Planung und Definition eines solchen Messprogramms i. d. R. bereits vor Beginn der eigentlichen Bauarbeiten abgeschlossen sein muss, ist dieser Arbeitsschritt als nicht-trivial anzusehen. Als Lösungsweg bietet sich eine numerische Modellierung des geplanten Projektes an, wobei sowohl die geplanten Arbeitsschritte als auch verschiedene messtechnischen Instrumentierungen an diesem Modell numerisch untersucht werden können. In diesem Beitrag wird eine Strategie für die Analyse von Messprogrammen in Kombination mit einem objektiven Bewertungskriterium vorgeschlagen.

**Layout, validation and optimization of measuring campaigns for geotechnical applications:** *Comprehensive measurement instrumentation is nowadays an integral part of almost all geotechnical projects. Not at least because of more and more demanding projects the use of measurement data expands from an pure monitoring and securing evidence to an important indicator for decision-making under operational execution. To enable this field of utilization, the correct aspects or system response of the project must be given in sufficient quality and completeness. Therefore in general a monitoring program has to be chosen, which gives sufficient data in a most cost-effective way.*

*Since the planning and definition of such a measurement program usually has to be completed before the start of the work, this step must be considered as non-trivial. A solution which is proposed herein can be the numerical modeling of the planned project, where both the scheduled work steps and the monitoring instrumentation can be investigated numerically. In this paper, a strategy for an investigation of monitoring programs in combination with an objective evaluation criterion is presented.*

## 1 Einleitung und Motivation

Die Nutzung numerischer Verfahren für geotechnische Fragestellungen wird in der Literatur vielfach beschrieben. Stellvertretend sei *Jing 2003* [13] genannt, der einen sehr umfangreichen *State of the Art*-Bericht zur Anwendung von numerischen Methoden bei geotechnischen Fragestellungen gibt. Aufbauend auf derartigen Simulationen finden zunehmend Verfahren zur inversen Parameterbestimmung und, allgemeiner, der Modellidentifikation, Anwendung. Diese Ansätze versuchen, die Parameter eines numerischen Modells (Anfangs- und Randbedingungen, Geometriedaten und Konstitutivbeziehungen) iterativ so zu quantifizieren, dass die resultierende Systemantwort

„möglichst gut“ mit vorliegenden Messwerten übereinstimmt. Grundsätzlich wird bei inversen Parameterbestimmungen durch eine globale Fehlerminimierung angestrebt, eine möglichst eindeutige Lösung in Form eines optimalen Parametersatzes zu finden. Als Gütekriterium wird der sogenannte Zielfunktionswert  $f(x)$  definiert, der die Abweichung zwischen den Ergebnissen der aktuellen, sogenannten „Vorwärtsrechnung“ und den als „Referenzwerten“ bezeichneten Messwerten beschreibt. Ausgangspunkt für den hier vorgestellten Ansatz ist die Überlegung, dass ein Messprogramm dann als ausreichend bzw. optimiert anzusehen ist, wenn auf der Basis der erzeugten Messdaten eine eindeutige und „präzise“ Rückrechnung ausgewählter Modellparameter möglich ist. Der Ansatz, alle technisch erfassbaren Werte und Werteverläufe messtechnisch aufzunehmen, ist nicht zuletzt aus finanzieller Sicht i. d. R. nicht umsetzbar. Oft wird in der Praxis auf eine „Straffung“ und „Optimierung“ des nötigen Messprogramms gedrungen. Ziel sollte demnach ein Messprogrammdesign sein, welches Datensätze mit allen notwendigen Informationen erzeugt und gleichzeitig wirtschaftlich umzusetzen ist.

In diesem Kontext ergeben sich Fragestellungen zu folgenden Teilaspekten:

Welche Messmimik ist für welche physikalische Feldgröße einzusetzen? – Diese Frage beinhaltet die Festlegung des Messprinzips und der Messgenauigkeit.

An welcher Position sind Sensoren anzuordnen?

In welchen Projektphasen bzw. Zeitabschnitten sind welche Arten von Messungen mit welcher notwendigen Präzision und Häufigkeit vorzusehen? – Diese Frage weist darauf hin, dass die erläuterte Analyse signifikant vom jeweils betrachteten Bauzustand abhängig ist. Am Beispiel einer Fundamentbelastung erläutert heißt das:

Phase 1 – deutlich unterhalb der Gebrauchslast: hohe Sensitivität der Arbeitslinie gegenüber der Bodensteifigkeit, geringe Sensitivität bezüglich der Scherfestigkeit.

Phase 2 – bei zunehmender Mobilisierung der Fundamenttragfähigkeit kehren sich diese Verhältnisse um, d.h. die Sensitivität bezüglich der Scherfestigkeitsparameter des Baugrunds steigt deutlich an, die gegenüber der Kompressibilität nimmt hingegen deutlich ab.

Die nachfolgenden Abschnitte umfassen die Beschreibung von Strategien, die eine objektive Einschätzung sowohl von bereits bestehenden Messprogrammdesigns ermöglichen (Abschnitt 3), als auch Planungshilfen für Messprogramme von Projekten mit inversen Fragestellungen (Absicht bzw. Notwendigkeit der Modellidentifikation) bieten (Abschnitt 4). Hierzu findet das der inversen Parameterbestimmung zugrunde liegende Paradigma des Zielfunktionswertes in Kombination mit Abtastverfahren und statistischen Analysemethoden

Anwendung (Abschnitt 2). Am synthetischen Beispiel eine Schüttung auf einem Setzungsempfindlichen Untergrund wird der Ansatz abschließend exemplarisch erläutert.

## 2 Theoretische Grundlagen

Anwendungen der Rückrechnung bzw. Identifizierung von Modellparametern („back analysis“) in der Geotechnik werden beispielsweise durch *Ledesma et al. 1996a* [14] bzw. *Gens et al. 1996* [10] (synthetisches und reales Beispiel einer Tunnelauffahrung), *Ledesma et al. 1996b* [15] (synthetisches Beispiel eines Tunnelvortriebs und Auffahrung einer Kaverne in den Spanischen Pyrenäen), *Finsterle 2000* [8] (Sanierung von Grundwassersystemen), *Malecot et al. 2004* [18] (inverse Behandlung von Pressuremetermessungen und Baugrubenaushub auf der Basis von FEM-Simulationen), *Feng et al. 2005* [7] (inverse Bestimmung von Parametern visko-elastischer Modelle für Fels), *Cui & Sheng 2006* [5] (Bestimmung des minimalen parametrischen Abstandes zum Grenzzustand in Form des Sicherheitsindex nach *Hasofer und Lind* für ein Streifenfundament), *Schanz et al. 2006* [24] (mehrphasiger Baugrubenaushub und Entsättigung einer Sandsäule) und *Meier et al. 2008* [21] (Modellierung und Parameteridentifikation einer Hangrutschung in den italienischen Alpen) beschrieben.

Alle Autoren stimmen darin überein, dass für den Fall der Existenz einer „geeigneten“ Vorwärtsrechnung Optimierungsstrategien erfolgreich für das Fachgebiet der Geotechnik genutzt werden können, siehe zusätzlich auch *Calvello & Finno 2002* und *2004* [3, 4]. „Geeignete“ Vorwärtsrechnung heißt an dieser Stelle, dass das numerische Modell bezüglich der realistischen Abbildung der vorliegenden physikalischen Phänomene im Vorgang validiert wurde.

Grundlage für die inverse Parameterbestimmung ist die objektive und reproduzierbare Bewertung einer auf einem Parametersatz basierenden Vorwärtsrechnung in Bezug auf einen vorgegebenen Satz von Referenzwerten. Häufig wird die Berechnung des Zielfunktionswertes in Anlehnung an die Methode der kleinsten Quadrate für mehrere Zeitserien wie folgt definiert:

$$f(x) = \sum_g [w_g \cdot f_g'(x)] \quad (1)$$

mit:

$$f_g'(x) = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^m w_h (y_g^{calc}(x) - y_g^{meas})_h^2 \quad (2)$$

In den oben genannten Gleichungen (1) und (2) bezeichnet  $x$  den (zunächst unbekannt) Parametervektor mit den Steuergrößen der Vorwärtsrechnung,  $y^{calc}$  bzw.  $y^{meas}$  die aktuell berechnete Systemantwort für  $x$  bzw. die Messdaten und  $w_g$  positive Wichtungsfaktoren bzw. –funktionen, die entsprechend den Messfehlern von  $f'_g(x)$  vorzugeben sind. Durch die Gewichte  $w_g$  könnte die unterschiedlichen Reihen  $g$  auf den gleichen Wertebereich und die gleiche Einheit gebracht werden. Beispielsweise ist eine Reihe mit hoher Genauigkeit mit einem höheren Wichtungsfaktor im Vergleich zu einer Reihe mit höheren Messungenauigkeiten zu beaufschlagen. Analog sind die Wichtungsfaktoren  $w_h$  innerhalb von Datenreihen nutzbar. Die Zahlenwerte der Gewichtungsfaktoren müssen auf der Basis von Ingenieur Erfahrung unter Beachtung der jeweiligen Optimierungsaufgabe festgelegt werden.

Eine Kernvoraussetzung für inverse Parameterbestimmungen und somit auch für die hier vorgestellte Strategie ist die Einhaltung des Vergleichbarkeitsgrundsatzes zwischen Referenzdaten und Ergebnissen der Vorwärtsrechnungen. Diese Bedingung ist nicht nur bei der numerischen Umsetzung der Vorwärtsrechnung und der damit verbundenen Auswahl von Ergebnisdatensätzen zu beachten, sondern sollte ebenfalls Einfluss auf das Design des zugrunde liegenden Messprogramms für das invers zu behandelnde reale geotechnische Projekt bzw. die Aufgabenstellung haben.

Da eine Planung und Evaluierung von Messprogrammen wie bereits festgestellt vor Beginn der eigentlichen Projektausführung stattfinden muss, liegen zu diesem Zeitpunkt entsprechend keinerlei reale Messdaten vor. Für eine Untersuchung muss demzufolge auf synthetische „Messdaten“ zurückgegriffen werden, die zu diesem Zweck zu generieren sind. Hierzu wird für das numerische Modell des jeweiligen Projektes ein möglichst realistischer, jedoch geschätzter Parametersatz vorgegeben und die Ergebnisse dieser Vorwärtsrechnung als „approximierte“ Referenzwerte im weiteren Verfahren genutzt. Ausgehend von der Tatsache, dass der exakte Verlauf dieser Referenzwerte direkt von dem angenommenen Parametersatz abhängt, sollte eine ausreichend große Menge von unterschiedlichen Referenzparametersätzen für die Auswertungen analysiert werden. Idealerweise erfolgt die Generierung dieser Referenzwerte mit einer von der „Vorwärtsrechnung“ verschiedenen numerischen Umsetzung.

Für die Generierung von Stützstellen steht in der mathematischen Fachliteratur eine Vielzahl von sogenannten „Abtastverfahren“ zur Verfügung. Insbesondere durch das Fachgebiet der statistischen Versuchsplanung (engl.: *design of experiments*, *DOE*) wird eine Fülle von Konzepten beschrieben, auf die für unsere geschilderte Aufgabenstellung zurückgegriffen werden kann. Ziel der DOE ist hierbei, für eine vorgegebene Menge von Stützpunkten  $P$

innerhalb eines vorgegebenen Suchbereichs  $U$  eine möglichst gute und gleichmäßige Dispersion  $d_n(P; U)$  zu erzielen. Für eine detaillierte Beschreibung und Klassifizierung der Methoden sei stellvertretend auf *Myers & Montgomery 1995* [23], *Schmidt & Launsby 1998* [25] und *Montgomery 2001* [22] verwiesen.

Die nachfolgend vorgestellten statistischen Analyseverfahren fordern prinzipiell eine möglichst gleichmäßige Dispersion der zugrunde liegenden Stützpunkte innerhalb des zu untersuchenden Bereichs. Eine Nutzung der vorgenannten Abtastverfahren zur Generierung dieser Basisdaten erscheint evident. Es können jedoch ergänzend, oder sogar ausschließlich, Informationen aus anderen Quellen genutzt werden, so die benötigten Anforderungen erfüllt sind. Existierende manuelle Berechnungsserien seien stellvertretend als solche alternativen Quellen genannt. Im Rahmen von Untersuchungen von Details der Zielfunktionstopologie können die vorgenannten Abtastverfahren in Unterräumen von  $U$  angewendet werden. Sowohl eine einfache Begrenzung von  $U$  bei gleich bleibender Anzahl von Dimensionen (entspricht der Anzahl der unbekanntem Modellparameter) als auch Unterräume mit geringerer Dimensionalität sind hierfür gebräuchlich.

### **Zielfunktionswerteverteilung**

Die graphische Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Abweichungswerte erlaubt eine erste Bewertung einer Zielfunktionstopologie und der durch sie repräsentierten inversen Aufgabenstellung. Neben statistischen Eckdaten wie dem Minimal- und Maximalwert ist aus dieser Darstellungsform der tatsächliche Verlauf der Verteilung ersichtlich. Zwar sind aufgrund des Ausschlusses der eigentlichen Parameterwerte für diese Präsentationsmethode i. d. R. keine parameterbezogenen quantitativen Angaben möglich, jedoch können in gewissen Grenzen qualitative Aussagen zur generellen Gestalt der Topologie (z.B. Rauigkeit, Parallelität von mehreren lokalen Minima) abgeleitet werden.

Eine Darstellung der Zielfunktionswertedistribution kann in Form eines Histogramms, als Graph der kumulierten (relativen) Häufigkeiten (Summenhäufigkeiten) oder als Kombination beider erfolgen. Die Anzahl der Abweichungswerte pro Histogrammklasse korrespondiert direkt mit der Steigung des Summengraphen: je steiler der Graph für eine Stelle ist, desto häufiger tritt der entsprechende Abweichungswert auf. Bereiche, in denen keine Zielfunktionswerte vorliegen, äußern sich durch eine konstante akkumulierte Häufigkeit.

## Scatterplot-Matrix

Abbildung 1 zeigt das prinzipielle Schema des Matrix-Plots zur Ergebnisvisualisierung der Ergebnisse von Abtastverfahren. Matrix-Plots stellen ein mathematisches Standardwerkzeug für die Untersuchung mehrdimensionalen Datensätze dar (z. B. *Manly 1944* [19]). Jedes nicht-diagonale Element der Matrix zeigt Abhängigkeiten in der Stützpunktverteilung der jeweiligen zwei Parameter. Folglich ist die Matrix, wie in Abbildung 1 in Form einer Prinzipskizze verdeutlicht, symmetrisch. Das Matricelement D - B deutet beispielsweise darauf hin, dass die beteiligten (zunächst unbekannt) Parameter B und D nicht voneinander unabhängig sind, sondern eine Korrelation aufweisen. Die Diagonalelemente des Matrixplots (A - A, ..., D-D) zeigen Plots, in denen der Wert der Zielfunktion über dem der jeweiligen Spalte zugeordneten Parameter dargestellt ist. Diese Plots können entsprechend als Projektionen der Zielfunktionstopologie bezeichnet werden. Falls die Optimierungsaufgabe als „gut gestellt“ (*well-posed*) bezeichnet werden kann, wird jeder dieser Zielfunktionsprojektions-Plots einen deutlichen Extremwert aufweisen, wie dies beispielsweise im Diagramm D-D dargestellt ist. Andernfalls kann der jeweilige Parameter nicht zuverlässig mittels inverser Verfahren bestimmt werden. Durch eine Filterung der Stützpunkte kann eine Darstellung nur solcher Parameterkombinationen erfolgen, für die der zugehörige Zielfunktionswert einen festzulegenden Schwellen- oder Grenzwert nicht überschreitet. Die Punktverteilung in einem solchen Matrix-Plot kann einen Hinweis auf die Größe und Form des Extremalbereichs geben. Für weitere statistische Analysen kann der aus der Statistik bekannte lineare zweidimensionale Korrelationskoeffizient für die einzelnen nicht-diagonalen Plots errechnet werden. *Will et al. 2003* geben beispielsweise einen Grenzwert von 0,5 für einen entsprechenden Korrelationskoeffizienten an, unterhalb dem eine Parameterkombination als „nichtkorreliert“ angenommen werden kann. (*MEIER et al. 2007*)

Die Punktverteilung in einem solchen Matrix-Plot kann einen Hinweis auf die Größe und Form des Extremalbereichs geben. Für weitere statistische Analysen kann der aus der Statistik bekannte lineare zweidimensionale Korrelationskoeffizient für die einzelnen nicht-diagonalen Plots errechnet werden. *Will et al. 2003* [27] geben beispielsweise einen Schwellenwert von 0,5 für einen entsprechenden Korrelationskoeffizienten an, unterhalb dem eine Parameterkombination als „nichtkorreliert“ angenommen werden kann (*Meier et al. 2007* [20]).

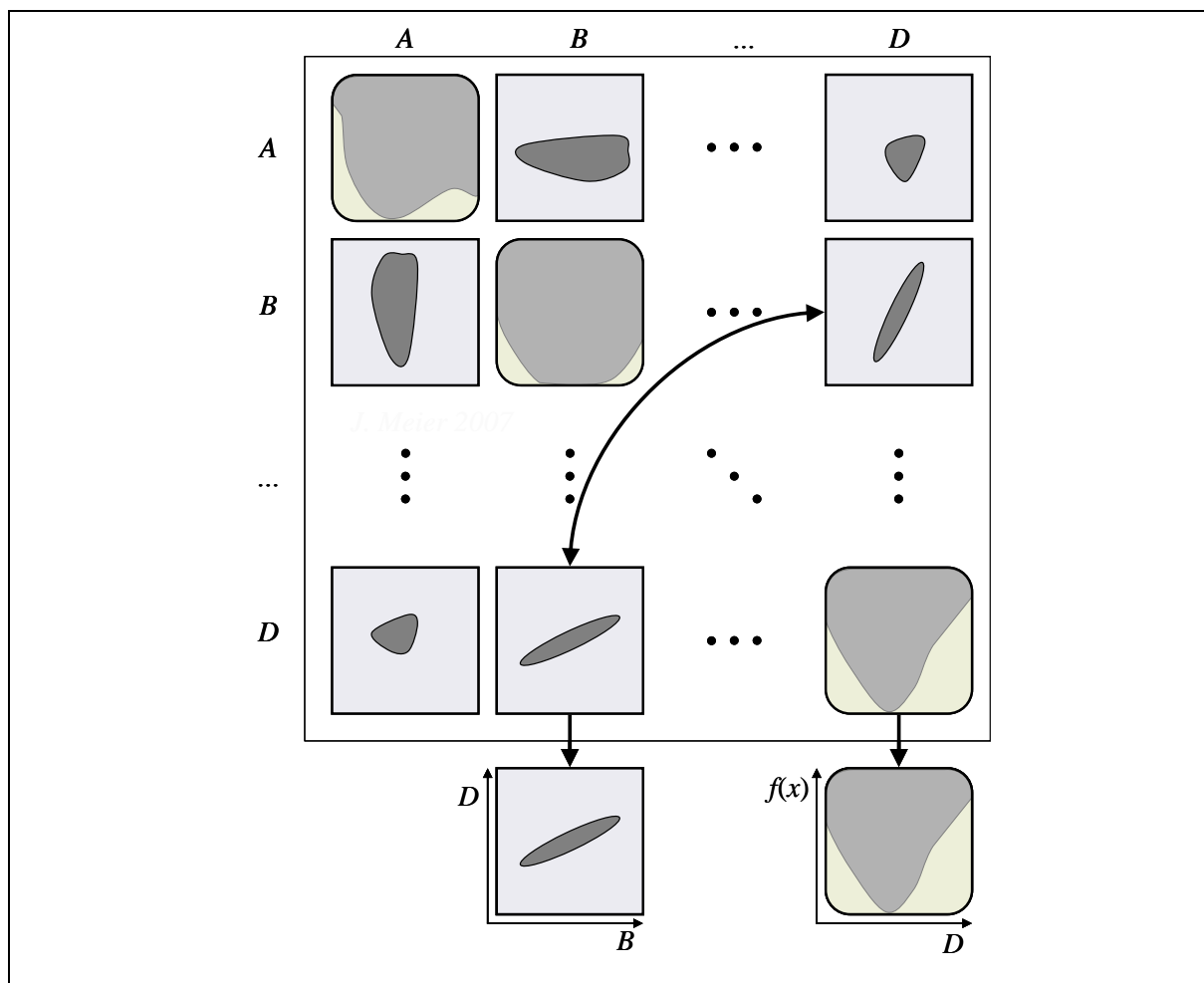


Abbildung 1: Statistische Analyse via Matrix-Plot; Prinzipschema - Statistical analysis by matrix plot; principal sketch

## Sensitivitätsanalyse

Die *Sensitivitätsanalyse* (engl.: *sensitivity analysis*) stellt eine Untersuchungsmethode dar, die den Einfluss der verschiedenen Eingangs- bzw. Modellparameter auf die Variation der Zielfunktion an einer Stützstelle bewertet. Die so errechnete Parameterempfindlichkeit ist demnach hochgradig von der Wahl des geschätzten Lösungsvektors, den genutzten Referenzdaten und deren Eigenschaften abhängig, auf den sie sich bezieht [2, 6, 1, 26].

. (BECK & ARNOLD 1977, EVERS 1980, AHUJA et al. 1993, SCHWARZ 2001)

Mathematisch gesehen entspricht die (*lokale*) *Sensitivität*  $s(x)$  (auch: *Sensitivitätskoeffizient*; engl.: *sensitivity*, *sensitivity coefficient*) dem in Gleichung (3) wiedergegebenen Gradienten der Zielfunktion an der Stelle  $x$  [2].(BECK & ARNOLD 1977). Die Elemente dieses  $n$ -dimensionalen Vektors der Anstiege weisen jedoch jeweils aufgrund ihres Parameterbezugs unterschiedliche physikalische Maßeinheiten auf und sind somit nicht ohne weiteres vergleichbar. Für eine Vermeidung dieses Effektes kann auf die Definition der *skalierten*



*Sensitivität*  $ss(x)$  (engl.: *scaled sensitivity*) nach Gleichung (4) zurückgegriffen werden. Durch die Einführung und geschickte Wahl des dimensionsbezogenen Faktors  $w_i$  wird zum einen eine einheitsfreie Größe geschaffen und die Wertebereiche auf ein vergleichbares Niveau skaliert. Durch verschiedene Autoren, wie beispielsweise *Zhang et al. 2003* [28] und *Hill 1998* [11], wird vorgeschlagen, den Faktor  $w_i$  auf den jeweiligen Parameterwert  $x_i$  gemäß Gleichung (5) festzulegen. Die Größe  $w_i$  stellt hier einen zusätzlichen positiven konstanten Faktor zur manuellen Anpassung der Sensitivität dar. Zwar wird über diese Strategie die Unabhängigkeit von der physikalischen Maßeinheit erreicht, jedoch werden für identische Anstiege der Zielfunktionstopologie an verschiedenen Stützpunkten unterschiedliche Sensitivitäten ausgewiesen. Die so errechneten skalierten Sensitivitäten sind nicht vom gewählten Koordinatensystem unabhängig (nicht invariant) und somit für unterschiedliche  $x$  nicht untereinander vergleichbar. Eine Festlegung von  $w_i$  auf einen konstanten – und folglich von  $x$  unabhängigen – Wert ist vorzuziehen [12, 11, 16, 26, 28, 17]. . (HILL 1992, HILL 1998, LEE & HOVLAND 2000, SCHWARZ 2001, ZHANG et al. 2003, MAGNUS & VASNEV 2007)

$$(3) \quad s(x) = \nabla f(x) = \text{grad}f(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

$$(4) \quad ss(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} w_1 \\ \vdots \\ \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} w_n \end{pmatrix}$$

$$(5) \quad w_i = x_i w'_i$$

*Frey & Patil 2002* [9] nennen als Möglichkeiten für die Berechnung des Anstieges an der Stelle  $x$  zum einen die numerische Differenzierung der Zielfunktion und alternativ die Gewinnung aus einer Regressionsanalyse. Verschiedene Verfahren zur numerischen Differenzierung sind in der Standardliteratur zur numerischen Mathematik beschrieben und zeigen besonders für hochdimensionale bzw. raue Topologien Nachteile. Zwar sind die mittels Regressionsanalyse bestimmten Anstiege weniger durch zufällige Störungen des Abweichungswertes betroffen, allerdings ist für die berechneten Werte aufgrund des statistischen Charakters der Methode von einer abgeminderten Genauigkeit gegenüber den Differenzenquotienten auszugehen. Weiterhin müssen ausreichend viele Stützstellen in der näheren Umgebung von  $x$  vorliegen oder ggf. zusätzlich generiert werden.

Über die Bildung des quadratischen Mittels der einzelnen skalierten Sensitivitäten nach Gleichung (6) sind Sensitivitätsvektoren in eine Art Effektivwert, die *gemittelte skalierte Sensitivität*  $css(x)$  (engl.: *composite scaled sensitivity*), eindeutig überführbar. Durch eine zusätzliche Normierung mit der maximalen  $css$  des Modells ist eine *relative gemittelte skalierte Sensitivität*  $rcss(x)$  (engl.: *relative composite scaled sensitivity*) gemäß Gleichung (7) mit einem Wertebereich zwischen 0 % und 100 % (0...1) berechenbar, die vornehmlich zu Darstellungs- und Vergleichszwecken Verwendung findet. Beispielsweise können mittels Darstellungen der Verteilungen der relativen gemittelten skalierten Sensitivität als Skalarfeld die Auswirkungen unterschiedlicher Referenzdatensätze bewertet werden [11].. (HILL 1998)

$$(6) \quad css(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} w_i \right)^2}$$

$$(7) \quad rcss(x) = \frac{css(x)}{\max css(x \in U)}$$

### 3 Validierung bestehender Messprogramme

Bei der Verifikation bestehender Messprogramme soll gewöhnlich im ersten Schritt geprüft werden, ob die aus dem vollständigen Programm resultierenden Referenzdaten ausreichen, um eine inverse Parameteridentifikation erfolgreich ausführen zu können. Bei einer positiven Bewertung sind im zweiten Schritt Messreihen zu identifizieren, die keinen oder einen sehr kleinen Einfluss auf das Ergebnis der inversen Parameterbestimmung haben und/oder redundante Informationen liefern. Solche Messreihen könnten nach weiterer Prüfung ggf. aus dem Messprogramm gestrichen werden. Analog kann so die Messfrequenz und der Zeitraum der Datenaufzeichnung bewertet werden.

Da eine Verifikation von Messprogrammen i. d. R. vor der Ausführung derselben stattfindet, stehen entsprechend für diese Aufgabenstellung keine Referenzdaten zur Verfügung. Um dennoch Untersuchungen zu ermöglichen, können im Sinne eines numerischen Experiments mittels der Vorwärtsrechnung und einem vorgegebenen Parametersatz synthetische Referenzwerte erzeugt werden. Der Parametersatz sollte hierfür auf der Basis der erwarteten Parameterwerte gewählt werden, wobei gegebenenfalls die Untersuchungen mit verschiedenen Parametersätzen wiederholt werden müssen. An dieser Stelle sei explizit auf den Umstand hingewiesen, dass die Ergebnisse von Untersuchungen, die auf synthetischen Referenzwerten basierenden, stark von dem zur Referenzwerterzeugung genutzten Parametersatz abhängen. Dies liegt in der physikalisch (und oft auch geometrisch) hochgradig nichtlinearen Natur der

zu behandelnden Randwertprobleme begründet. Die Wahl eines „falschen“, d.h. unrealistischen (Referenz-)Parametersatzes kann entsprechend zu ungültigen weil nicht auf realistische Konfigurationen übertragbaren Aussagen führen. Weiterhin sind die synthetischen Referenzwerte so aufzubereiten, dass diese den erwarteten Datenmustern, wie etwa Messfrequenz und Genauigkeit des Messprogramms, entsprechen.

Mittels der in Abschnitt 2 beschriebenen Untersuchungs- und Analyseverfahren als auch von Visualisierungsmethoden ist nun eine Abschätzung der Eigenschaften der Zielfunktions-topologie möglich. Kann bereits für diese Konfiguration kein klares und eindeutiges Optimum nachgewiesen werden, ist davon auszugehen, dass das zugrunde liegende Messprogramm einen unzureichenden Umfang besitzt oder dass zu viele Parameter bestimmt werden sollen bzw. Abhängigkeiten zwischen den zu bestimmenden Modellparametern vorliegen. Ist hingegen ein gut abgegrenzter und wohlgeformter Extremwertbereich belegbar, kann eine kritische Prüfung der verwendeten Referenzdatenreihen erfolgen.

Für eine solche kritische Prüfung bieten sich zwei Strategien an: Zum einen kann der Einfluss jeder Datenreihe bzw. jedes Messensors einzeln auf die Zielfunktionstopologie geprüft werden. Hierzu werden die jeweils anderen Datenreihen aus der Bildung des Gütwertes ausgeschlossen, so dass eine „aspektbezogene Zielfunktion“ entsteht. Inkrementell können nun, basierend auf Einzelbetrachtungen, ausgewählte Referenzdatenreihen kombiniert werden, bis eine ausreichende Güte der Zielfunktionstopologie erreicht wird. Hierbei können durchaus verschiedene Kombinationen zu akzeptablen Ergebnissen führen. Außerdem können unterschiedliche Beschaffenheiten der Datenreihen, wie z. B. Messfrequenz und Genauigkeiten, untersucht werden. Alternativ zu diesem inkrementellen Ansatz kann zum anderen über ein Ausschlussverfahren ausgehend von dem vollständigen Satz an Referenzdatenreihen eine immer kleinere Datenbasis zur Bildung des Abweichungswertes herangezogen werden. Ziel ist hier die Erhaltung der positiven Topologieeigenschaften bei einer möglichst großen Menge ausgeschlossener Datensätze.

Bei einer eventuellen Reduzierung des Messprogramms darf nicht außer Acht gelassen werden, dass eine ausreichende Redundanz erhalten bleiben muss. Die Möglichkeit eines Ausfalls oder einer Fehlfunktion eines Messensors sollte in die Entscheidungsfindung über die Optimierung von Messprogrammen einfließen. Weiterhin werden letztendlich die in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen auf der Basis einer Vorwärtsrechnung durchgeführt, die im Prozess der Modellbildung entsprechend abstrahiert wurde. Auch diese mögliche Fehlerquelle sollte in diesem Zusammenhang besondere Beachtung finden.

#### 4 Planungshilfen für Messprogramme

Über eine reine Verifikation bereits bestehender Messprogramme hinaus ist mit den beschriebenen Strategien ebenfalls eine Planungshilfe von Messprogrammen verfügbar. Formell kann hierfür eine theoretische Vollinstrumentierung angenommen und die Methoden zur Verifikation bestehender Messprogramme angewendet werden. Bei sehr komplexen Aufgabenstellungen kann dieses Unterfangen jedoch entsprechend aufwändig sein. Besonders interessant sind daher in diesem Kontext somit Verfahren, die die repräsentativsten Bereiche eines Modells im Hinblick auf ausgewählte physikalische Sachverhalte in Verbindung mit einer inversen Aufgabenstellung selbstständig ausweisen können. Aufgrund der hohen Repräsentativität sind diese Bereiche gleichzeitig für eine entsprechende Instrumentierung im Rahmen eines Messprogramms prädestiniert.

Um ein objektives Untersuchungskriterium zur Verfügung zu stellen, bietet sich der Einsatz von entsprechenden Kennzahlen in Form eines (modell-)punktbezogenen Skalarwertes an. Mit diesem Ansatz kann eine farbcodierte Darstellung von Skalarfeldern, ähnlich den bekannten Visualisierungen von Verschiebungs- oder Spannungsfeldern, erfolgen. Eine Berechnung der Kennwerte sollte somit in Anlehnung an die Diskretisierung des Modells, z. B. auf Basis der Netzknoten einer FEM-Diskretisierung, durchgeführt werden. Analog den Untersuchungen für eine Referenzdatenreihe kann für jeden Diskretisierungspunkt eine aspektbezogene lokale Zielfunktion definiert werden, die einen entsprechenden Abweichungswert zurück gibt. Die einzelnen Referenzdatenreihen sind wiederum, im Sinne eines numerischen Experiments, für einen oder mehrere vorzugebende Parametersätze zu bestimmen.

Möglichkeiten für eine Wahl des Kennwertes sind die in Abschnitt 2 beschriebenen skalaren Sensitivitätswerte, wie die gemittelte skalierte Sensitivität  $c_{ss}$  bzw. die relative gemittelte skalierte Sensitivität  $rc_{ss}$ . Aufgrund der auf einen Parametersatz bezogenen Definition, geben diese Zahlen nur eingeschränkte Informationen über die Zielfunktionstopologie wieder. Günstiger ist daher die Nutzung statistischer Kenngrößen einzuschätzen, die auf einem größeren Teil des Suchbereichs  $\Omega$  basieren. Beispielsweise bieten sich zu diesem Zweck Streubreiten der Zielfunktionswerte für Parametersätze aus einem Suchbereich  $\Psi \in \Omega$  an. Kann für einen Diskretisierungspunkt nur eine kleine Streubreite nachgewiesen werden, muss davon ausgegangen werden, dass entsprechende Messwerte nur eine geringe Repräsentativität besitzen.

Ein auf der Basis der beschriebenen Planungshilfen erstelltes Messprogramm sollte mit den Strategien zur Verifikation bestehender Messprogramme geprüft werden, um einen ausreichenden Umfang sicherzustellen und um Redundanzen auszuweisen.

## **5 Geotechnische Anwendung: Probeschüttung auf bindigem Boden**

Um das prinzipielle Vorgehen im Rahmen des erläuterten Konzepts exemplarisch darzustellen soll für das in Abbildung 2 dargestellte numerische Modell einer „unendlich langen“ Probeschüttung auf bindigem Boden die Ausweisung von Bereichen durchgeführt werden, die für eine messtechnische Instrumentierung im Hinblick auf die Bestimmung ausgewählter Bodenparameter besonders geeignet sind. Es wurde mit Absicht ein sehr überschaubares geotechnisches Randwertproblem gewählt, damit die abgeleiteten Aussagen auch vergleichsweise einfach, quasi intuitiv, verifiziert werden können.

Auf der Oberfläche des homogen angenommenen Baugrunds wird lagenweise in 5 einzelnen Schichten eine Probeschüttung aufgebracht und über die resultierenden zusätzlichen Gewichtskräfte der unterlagernde Boden belastet. Entsprechend wird eine entgegen der y-Achse gerichtete Erdbeschleunigung mit  $9,81 \text{ m/s}^2$  angenommen. Die untere Begrenzung des Modells ist sowohl horizontal als auch vertikal fixiert. Der linke und rechte Rand wird mit einer horizontalen Fixierung angenommen. Alle Begrenzungen sind so gewählt, dass unrealistische Randeinflüsse vermieden werden. Die Symmetrie der Geometrie wird für die Diskretisierung nicht ausgenutzt.

Der Probeschüttung ist ein rein linear elastisches Materialmodell zugewiesen. In Anlehnung an das Hookesche Gesetz stellt dieses konstitutive Modell einen isotropen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung her, welches zeitunabhängig und linear proportional durch den Elastizitätsmodul  $E$  und die Querdehnungszahl  $\nu$  definiert ist.

Bei Verwendung des Mohr-Coulomb-Materialmodells erfolgt die konstitutive Beschreibung des Baugrunds mit einem linear-elastisch, ideal-plastischem Stoffgesetz. Dieses in der Praxis sehr weit verbreitete Stoffmodell kann ohne Zweifel nur als (unzureichende) Näherung des realen Bodenverhaltens betrachtet werden und erweitert das linear elastische Stoffverhalten um die Coulombsche Versagenshypothese (Parameter Kohäsion  $c$  und Reibungswinkel  $\varphi$ ) nach Gleichung (8) und zum zweiten um das Theorie der Mohrschen Spannungskreise. Darüber hinaus kann über den Dilatanzwinkel  $\psi$  die Volumenänderung unter Schubbelastung des Bodens berücksichtigt werden (: das Materialmodell ist entsprechend nicht-assozierte Plastizität). Da das hier für den Boden verwendete Materialmodell keine „Kappe“ besitzt, werden Belastungen eines finiten Bodenvolumens, die die Coulombsche Versagenshypothese nicht verletzen (z.B. Kompressionspfade unter ödometrischen Randbedingungen), nur

ausschließlich elastische Verformungen verursachen. Irreversible Verformungen können folglich nur durch Scherbelastungen hervorgerufen werden. Aus Gründen der Anschaulichkeit und dem Ziel einer qualitativen Analyse wird trotz der genannten Einschränkungen kein höherwertiges Stoffmodell verwendet.

Im Rahmen der hier vorgestellten Berechnung ist die Probeschüttung durch einen Elastizitätsmodul von  $E = 1,0E+04 \text{ kN/m}^2$  und eine Querdehnzahl von  $\nu = 0,3$  charakterisiert. Für die Erzeugung des Referenzdatensatzes wird für den Boden ein Parametersatz mit einem Elastizitätsmodul mit  $E = 2,4E+04 \text{ kN/m}^2$ , einer Querdehnzahl von  $\nu = 0,3$ , einer Kohäsion von  $c = 5 \text{ kN/m}^2$ , einem Reibungswinkel von  $\varphi = 27^\circ$  und einem Dilatanzwinkel von  $\psi = 0^\circ$  angenommen.

$$(8) \quad \tau_f = c + \sigma_f \cdot \tan \varphi$$

Nach einem einführenden Berechnungsschritt zur Initialisierung der Spannungen durch ein langsames Aufbringen der Erdbeschleunigung auf das zuvor spannungsfreie Modell (K0-Prozedur) wird in den fünf folgenden Berechnungsschritten je eine weitere Lage der Probeschüttung aufgebracht.

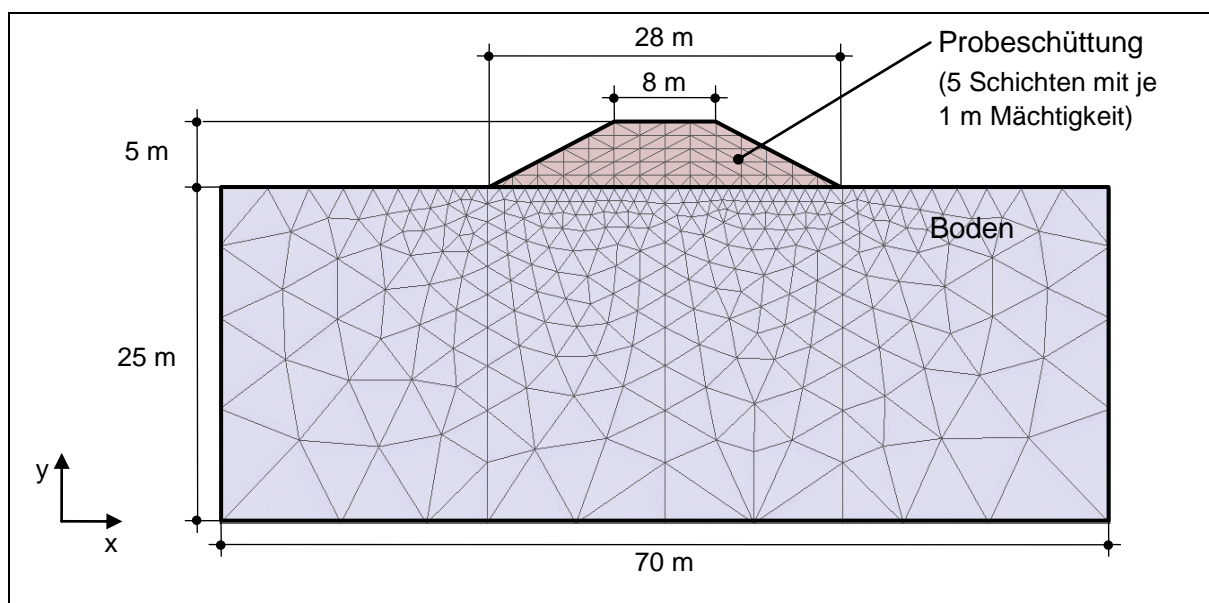
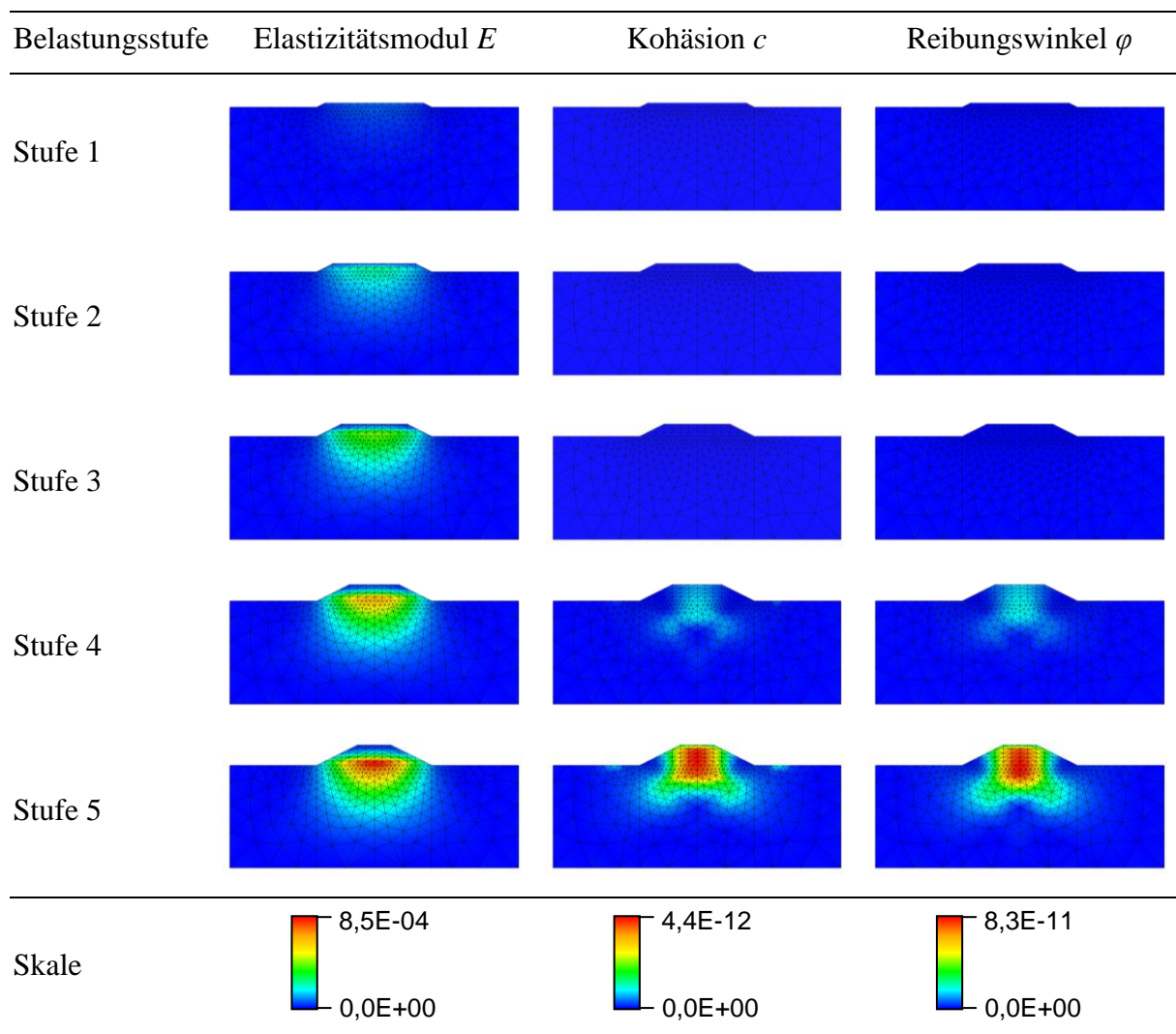


Abbildung 2: Diskretisierung des synthetischen Beispiels „Probeschüttung auf bindigem Boden“ – Numerical model of the synthetic example „test embankment on soft soil“

Im Rahmen dieses Beispiels sollen auf der Basis von unterschiedlich umfangreichen Typen von Verschiebungsmessungen die Steifigkeits- und Scherfestigkeitsparameter des Baugrunds bestimmt werden. Es sind Bereiche abzuschätzen, deren Deformationsverlauf eine entsprechende Parameterrückrechnung ermöglicht. Tabelle 1 zeigt eine solche Abschätzung,

die auf der Grundlage des Feldes der vollständigen Verschiebungsvektoren (horizontale und vertikale Komponente) aufbaut. Die spaltenweise gültige Farbcodierung visualisiert für jeden Punkt die Breite des jeweiligen Schwankungsbereiches der lokalisierten Zielfunktionswerte, die als mittlere quadratische Abweichung zwischen dem Modellzeit-Verschiebungsverhaltens der Referenzrechnung und der aktuellen Vorwärtsrechnung errechnet werden. Die Zeilen der Tabelle zeigen jeweils das Ergebnis für das Aufbringen der zugehörigen Schicht der Probelastung, die Spalten enthalten die Resultate für die Betrachtung der einzelnen Parameter: des Elastizitätsmodul, der Kohäsion und des Reibungswinkel.

Tabelle 1: Visualisierung repräsentativer Bereiche des Modells zur Probeschüttung auf der Basis des Feldes der vollständigen Verschiebungsvektoren (horizontal und vertikal) - visualization of representative areas of the numerical model based on analysis of total deformation vectors (horizontal and vertical component)



Die Auswertung von Tabelle 1 führt zu folgenden Beobachtungen und Aussagen:

- *Abweichende Schwankungsbereiche:* Beachtenswert sind die zwischen Steifigkeits- und Scherfestigkeitsparameter stark voneinander abweichenden Maximalwerte der Schwankungsbereiche der lokalisierten Zielfunktionswerte: Eine Variation des Elastizitätsmoduls erzeugt betragsmäßig weitaus größere Änderungen in der Systemantwort als das bei der Kohäsion oder dem Reibungswinkel der Fall ist. Bei einer gleichzeitigen Untersuchung aller drei Parameter würde der Einfluss der Scherfestigkeitsgrößen vollständig überdeckt werden. Dieser Effekt ist ein Ausdruck unterschiedlicher Sensitivitäten der Parameter für den untersuchten Parametersatz. Geotechnisch spiegelt sich darin das moderate Maß der Mobilisierung der Scherfestigkeit wieder.
- *Phasenabhängigkeit:* Weiterhin auffällig ist, dass bereits mit Aufbringen der ersten Schicht der Probelastung geringe Einflüsse für den Elastizitätsmodul beobachtbar sind, die sich mit jeder Schicht weiter verstärken. Im Gegensatz hierzu zeigen die Untersuchungen für die Scherfestigkeitsparameter bis zur dritten Schicht der Probelastung keinerlei Einflüsse. Erst mit dem Aufbringen der vierten Schicht können hier Effekte beobachtet werden. Diese deutliche Phasenabhängigkeit kann für dieses Modell auf das Erreichen der für eine Plastifizierung nötigen Belastung zurück geführt werden, welche bis zur dritten Schicht nicht gegeben ist.
- *Form und Lage der ausgewiesenen Bereiche:* Für den Steifigkeitsparameter wird als günstiger Bereich für eine messtechnische Instrumentierung eine Region möglichst zentral unter der Probeschüttung ausgewiesen, die gute Ergebnisse für Messpunkte bis zu einer Tiefe von ca. 5 m unter der ehemaligen Geländeoberkante ermöglicht. Für die Scherfestigkeitsparameter sind darüber hinaus unter den Flanken der Probeschüttung Regionen markiert, die für eine Bestimmung instrumentiert werden können. Ebenfalls unterschiedlich sind die innerhalb der Probeschüttung ausgewiesenen repräsentativen Bereiche, die für Schicht 5 für die Scherfestigkeitsparameter nahezu den gesamten zentralen Teil der Schüttung einnehmen, jedoch für den Elastizitätsmodul nur den unteren Teil der Schüttung als günstig markieren. Resultierend ist somit auch eine Rückrechnung der Bodenparameter auf der Basis von Messungen in der Probeschüttung möglich, da das Verschiebungsfeld der Schüttung stark durch die Eigenschaften des Untergrundes beeinflusst wird.

Die Anlage enthält die analog ausgeführten Betrachtungen getrennt für die horizontalen und die vertikalen Verschiebungsvektoren. Für beide Fälle treten deutlich wiederum die abweichenden Schwankungsbereiche der lokalisierten Zielfunktionswerte und die Phasen-



abhängigkeit für die Scherfestigkeitsparameter hervor. Gegenüber Tabelle 1 als auch untereinander zum Teil stark abweichend sind die ausgewiesenen repräsentativen Bereiche. Diese sind somit zwischen verschiedenen physikalischen Messgrößen nicht übertragbar und sollten jeweils explizit bestimmt werden.

Abbildung 3 zeigt die lokalisierte Zielfunktion für zwei ausgewählte Netzknoten. Der in Abbildung 3a) genutzte Knoten befindet sich in ca. 2 m Teufe unterhalb der ehemaligen Geländeoberkante zentral unter der Probeschüttung, wogegen der Knoten in Abbildung 3b) unterhalb des Randes der Schüttung in ca. 10 m Teufe angeordnet ist. In die lokalisierten Zielfunktionen gehen jeweils die vollständigen Verschiebungsfelder aller fünf Belastungsschritte ein. Durch die vorangegangenen Betrachtungen wird der Netzknoten von a) als günstig für eine Parameterrückrechnung eingestuft, der Knoten von b) hingegen nicht. Ein Vergleich der Zielfunktionstopologien von Abbildung 3 bestätigt dieses Ergebnis: Zwar weisen beide Topologien an der Position des Referenzparametersatzes einen innerhalb des Untersuchungsgebietes globalen Extremwert auf, jedoch sind die Zielfunktionswerte von b) gegenüber a) um ca. vier Zehnerpotenzen kleiner. Vor dem Hintergrund, dass nachfolgend eine Bestimmung auf der Basis von realen Messwerten erfolgen soll, die eine begrenzte Genauigkeiten und ein Messwertrauschen aufweisen, sind diese geringen Abweichungswertdifferenzen – die sich ja direkt aus den Verschiebungsdifferenzen berechnen – als kritisch zu bewerten.

Die Tabellen 2 und 3 enthalten die analog ausgeführten Betrachtungen getrennt für die horizontalen und die vertikalen Verschiebungsvektoren. Für beide Fälle treten deutlich wiederum die abweichenden Schwankungsbereiche der lokalisierten Zielfunktionswerte und die Phasenabhängigkeit für die Scherfestigkeitsparameter hervor. Gegenüber Tabelle 1 als auch untereinander zum Teil stark abweichend sind die ausgewiesenen repräsentativen Bereiche. Diese sind somit zwischen verschiedenen physikalischen Messgrößen nicht übertragbar und sollten jeweils explizit bestimmt werden. Deutlich erkennbar in Tabelle A1 ist des Weiteren, dass auf der Symmetrieachse, durch das Verschwinden der horizontalen Verschiebungen, keine Parameter bestimmt werden können. Dies hat unmittelbaren Einfluss auf die benachbarten Sensitivitäten im Zentrum unter der Schüttung.

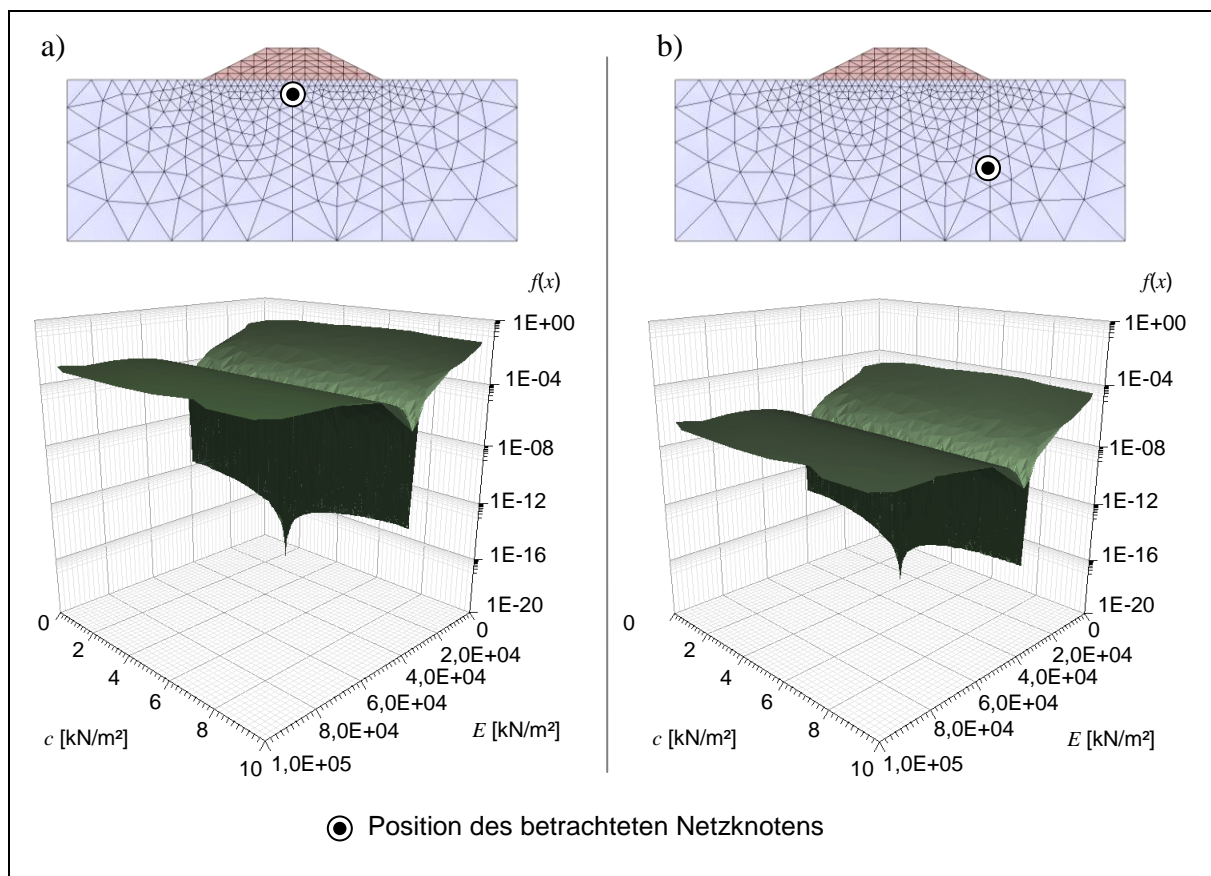


Abbildung 3: Lokalisierte Zielfunktionstopologie für verschiedene Netzknotten der Vorwärtsrechnung - local topology of the objective function for two different nodes of the forward simulation

Abbildung 3 zeigt die lokale Zielfunktion für zwei ausgewählte Netzknotten. Dargestellt ist vereinfacht der Wert der Zielfunktion über den Parametern Steifigkeit und Kohäsion. Der in Abbildung 3a) genutzte Knoten befindet sich in ca. 2 m Tiefe unterhalb der ehemaligen Geländeoberkante zentral unter der Probeschüttung, wogegen der Knoten in Abbildung 3b) unterhalb des Randes der Schüttung in ca. 10 m Tiefe angeordnet ist. In die lokalisierten Zielfunktionen gehen jeweils die vollständigen Verschiebungsfelder aller fünf Belastungsschritte ein. Durch die vorangegangenen Betrachtungen wird der Netzknotten von a) als günstig für eine Parameterrückrechnung eingestuft, der Knoten von b) hingegen nicht. Ein Vergleich der Zielfunktionstopologien von

Abbildung 3 bestätigt dieses Ergebnis: Zwar weisen beide Topologien an der Position des Referenzparametersatzes einen innerhalb des Untersuchungsgebietes globalen Extremwert auf, jedoch sind die Zielfunktionswerte von b) gegenüber a) um ca. vier Zehnerpotenzen kleiner. Vor dem Hintergrund, dass nachfolgend eine Bestimmung auf der Basis von realen Messwerten erfolgen soll, die begrenzte Genauigkeiten und ein unvermeidliches Messwert-

rauschen aufweisen, sind diese geringen Abweichungswertdifferenzen – die sich ja direkt aus den Verschiebungsdifferenzen berechnen – als für die eindeutige Identifizierung kritisch zu bewerten.

Tabelle 2: Visualisierung repräsentativer Bereiche des Modells zur Probeschüttung auf der Basis des Feldes der horizontalen Verschiebungsvektoren - visualization of representative areas of the numerical model based on analysis of horizontal component of the deformation vectors

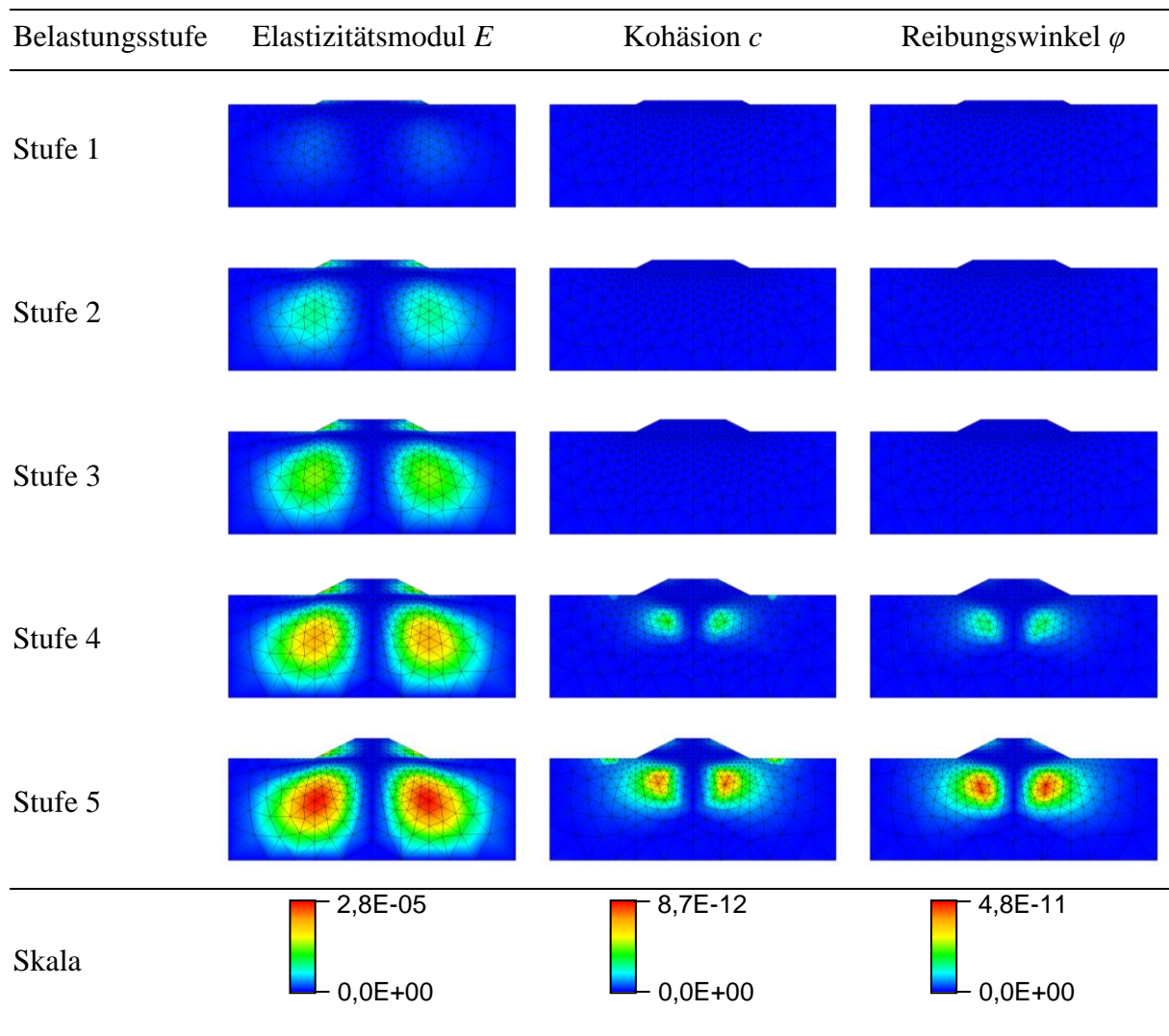
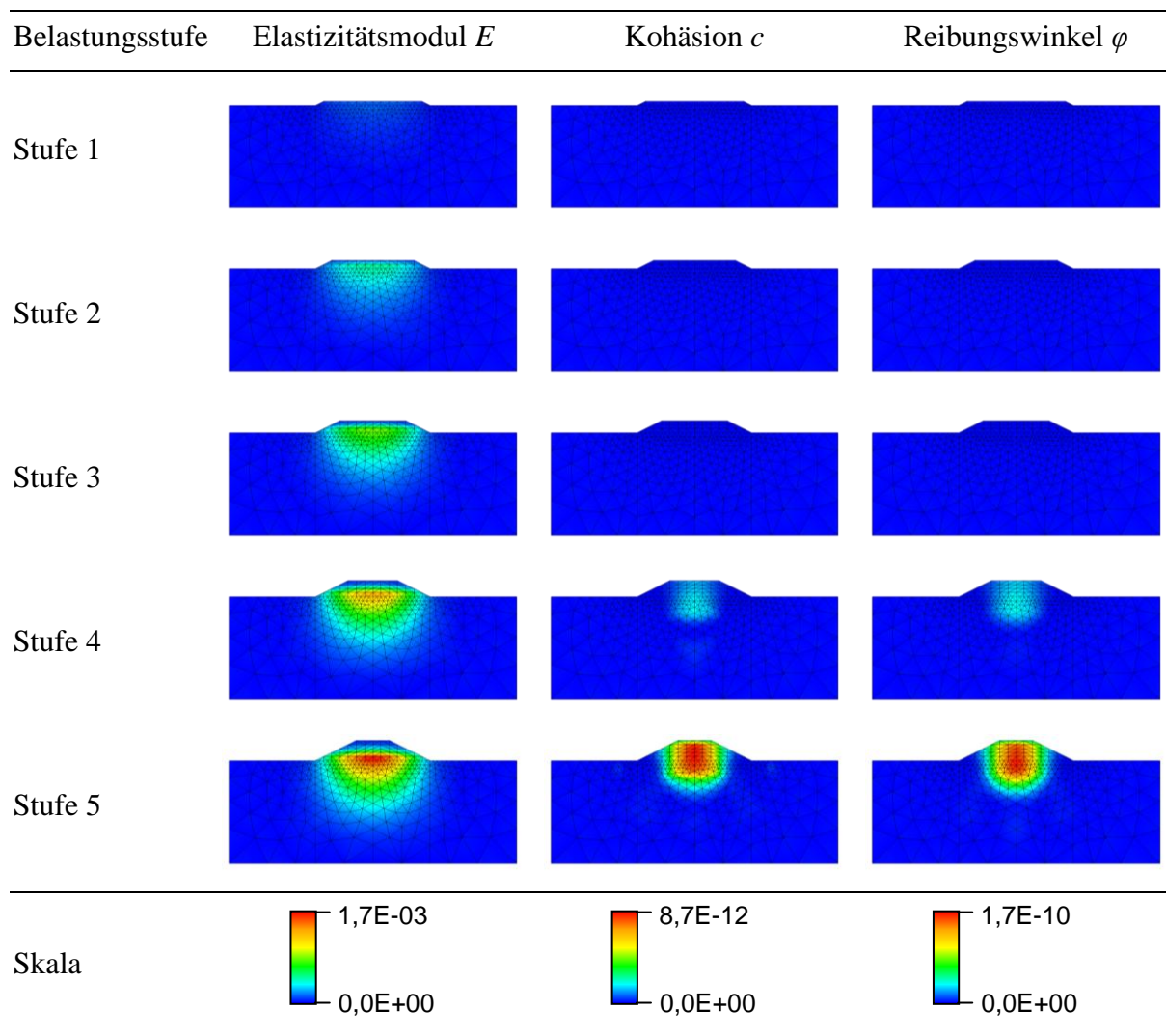


Tabelle 3: Visualisierung repräsentativer Bereiche des Modells zur Probeschüttung auf der Basis des Feldes der vertikalen Verschiebungsvektoren - visualization of representative areas of the numerical model based on analysis of vertical component of the deformation vectors



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Validierung und Optimierung von Messprogrammen gewinnt angesichts der immer stärkeren Nutzung der gewonnenen und zu gewinnenden Messdaten zunehmend an Bedeutung. Die Nutzung von objektiven Bewertungskriterien erscheint nicht zuletzt aus diesem Grund als zwingend notwendig. Dieser Beitrag beschreibt mit der Nutzung des aus dem Bereich der inversen Parameterbestimmung bekannten Paradigma des Zielfunktionswertes und den auf dieser Strategie aufbauenden Auswertemethoden ein solches objektives Kriterium, welches zusätzlich eine weitgehende Automatisierung der Messprogrammvalidierung, -optimierung und -planung erlaubt. Aufbauend auf einer zusammenfassenden Beschreibung der genutzten Ansätze und theoretischen Grundlagen wurde in diesem Beitrag

das Vorgehen für die Verifikation bestehender Messprogramme dargestellt. Weiterhin wurde das Vorgehen für die Nutzung dieser Methoden zur Unterstützung der Planung von Messprogrammen aufgezeigt und mit einem illustrativen Beispiel demonstriert.

Aufbauende Arbeiten auf diesem Gebiet sollten in die Bewertung der jeweiligen Messprogramme – zusätzlich zu den vorgestellten Kriterien – Informationen zu der Eindeutigkeit der Parameterbestimmungsaufgabe einfließen lassen um so eine zu einem späteren Zeitpunkt anschließende Modellidentifizierung, d.h. unter Nutzung realer Messwerte, zu unterstützen.

## Danksagung

Der zweite Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die anteilige Unterstützung seiner Arbeiten im Rahmen der Forschungsvorhaben SCHA 675/7-2 und SCHA 675/11-2 (“Geomechanische Modellierung großer alpiner Böschungen”).

## Literatur

- [1] *Ahuja, R. K.; Magnanti, T. L.; Orlin, J. B.* (1993): Network Flows – Theory, Algorithms, and Applications. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- [2] *Beck, J. V.; Arnold, K. J.* (1977): Parameter Estimation in Engineering and Science. John Wiley & Sons. 501 S.
- [3] *Calvello, M. ; Finno, R. J.* (2004): Selecting parameters to optimization model calibration by inverse analysis. Computers and Geotechnics 31, S. 411 - 425.
- [4] *Calvello, M.; Finno, R. J.* (2002): Calibration of soil models by inverse analysis. In Pande & Pietruszczak (Eds.): Numerical Models in Geomechanics NUMOG VIII, S. 107 - 116. Rotterdam: Balkema.
- [5] *Cui, L.; Sheng, D.* (2006): Genetic algorithms in probabilistic finite element analysis of geotechnical problems. Computers and Geotechnics 32, S. 555 - 563.
- [6] *Evers, A. H.* (1980): Sensitivity Analysis in Dynamic Optimization. Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 32, No. 1, S. 17 - 37.

- [7] *Feng, X.-T.; Chenb, B.-R.; Yangb, C.; Zhoua, H.; Dingc, X.* (2005): Identification of visco-elastic models for rocks using genetic programming coupled with the modified particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Elsevier-Verlag, 13 S.
- [8] *Finsterle, S.* (2000): Demonstration of Optimization Techniques for Groundwater Plume Remediation. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley.
- [9] *Frey, H. C.; Patil, S. R.* (2002): Identification and review of sensitivity analysis methods. *Risk analysis*, Vol. 22, No. 3, S. 553 – 578.
- [10] *Gens, A.; Ledesma, A.; Alonso, E. E.* (1996): Estimation of Parameters in Geotechnical Backanalysis – II. Application to a Tunnel Excavation Problem. *Elsevier Science, Computers and Geotechnics*, Vol. 18, No. 1, S. 29 – 46.
- [11] *Hill, M. C.* (1998): Methods and guidelines for effective model calibration. U. S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 98-4005, 90 S.
- [12] *Hill, M.C.* (1992): A computer program (MODFLOWP) for estimating parameters of a transient, three-dimensional, ground-water flow model using nonlinear regression. U. S. Geological Survey, Open-File Report 91-484, 358 S.
- [13] *Jing, L.* (2003): A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(3), 283–353.
- [14] *Ledesma, A.; Gens, A.; Alonso, E. E.* (1996a): Estimation of Parameters in Geotechnical Backanalysis – I. Maximum Likelihood Approach. *Elsevier Science, Computers and Geotechnics*, Vol. 18, No. 1, S. 1 – 27.
- [15] *Ledesma, A.; Gens, A.; Alonso, E. E.* (1996b): Parameter and Variance Estimation in Geotechnical Backanalysis using Prior Information. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 20, S. 119 – 141.
- [16] *Lee, S. L.; Hovland, P. D.* (2000): Sensitivity analysis using parallel ODE solvers and automatic differentiation in C: SensPVODE and ADIC. *Automatic differentiation of algorithms: from simulation to optimization*, Springer-Verlag, New York.
- [17] *Magnus, J. R.; Vasnev, A. L.* (2007): Local sensitivity and diagnostic tests. *The Econometrics Journal*, Vol. 10, S. 166 – 192.

- [18] *Malecot, Y.; Flavigny, E.; Boulon, M.* (2004): Inverse Analysis of Soil Parameters for Finite Element Simulation of Geotechnical Structures: Pressuremeter Test and Excavation Problem. In: Brinkgreve, Schad, Schweiger & Willand (eds.) Proc. Symp. Geotechnical Innovations, S. 659 - 675. Essen: Verlag Glückauf, 2004.
- [19] *Manly, B. F. J.* (1944): Multivariate statistical methods – a primer. 3rd Edition, Chapman & Hall / CRC.
- [20] *Meier, J.; Datcheva, M.; Schanz, T.* (2007): Identification of Constitutive and Geometrical Parameters of Numerical Models with Application in Tunnelling. ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling (EURO:TUN 2007), Wien.
- [21] *Meier, J.; Schädler, W.; Borgatti, L.; Corsini, A.; Schanz, T.* (2008): Inverse Parameter Identification technique using PSO Algorithm applied to Geotechnical Modeling. Journal of Artificial Evolution and Applications, <http://www.hindawi.com>, in print.
- [22] *Montgomery, D. C.* (2001): Design and Analysis of Experiments. 5. Auflage, Wiley, New York.
- [23] *Myers, R. H.; Montgomery, D. C.* (1995): Response Surface Methodology – Process and Product Optimization Using Designed Experiments. John Wiley & Sons.
- [24] *Schanz, T.; Zimmerer, M.; Datcheva, M.; Meier, J.* (2006): Identification of constitutive parameters for numerical models via inverse approach, Felsbau - Rock and Soil Engineering - Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling 2/2006, S. 11 – 21.
- [25] *Schmidt, S. R.; Launsby, R. G.* (1998): Understanding Industrial Designed Experiments. 4. Auflage, Air Academy Press, Colorado Springs.
- [26] *Schwarz, S.* (2001): Sensitivitätsanalyse und Optimierung bei nichtlinearem Strukturverhalten. Institut für Baustatik der Universität Stuttgart, Bericht Nr. 34.
- [27] *Will, J.; Roos, D.; Riedel, J.; Bucher, C.* (2003): Robustness Analysis in Stochastic Structural Mechanics. NAFEMS Seminar - Use of Stochastics in FEM Analyses, Wiesbaden.
- [28] *Zhang, Z. F.; Ward, A. L.; Gee, G. W.* (2003): Estimating Soil Hydraulic Parameters of a Field Drainage Experiment Using Inverse Techniques. Vadose Zone Journal 2, S. 201 - 211.