

# Simulationsbasierte Systemidentifikation im Rahmen der baubegleitenden geotechnischen Überwachung

Simulation-based system identification  
in construction-simultaneous geotechnical monitoring

## **Kurzfassung und Thesen**

zur an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
eingereichten

## **Dissertationsschrift**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Gerald Faschingbauer  
geboren am 20. Dezember 1976 in Passau

Tag der öffentlichen Verteidigung: 21.12.2010

## Kurzfassung

Komplexe Baumaßnahmen im geotechnischen Ingenieurbau sind geprägt von hohen Modellunsicherheiten. Sie erfordern daher eine ständige baubegleitende Überwachung sowie die Anpassung des ursprünglichen geotechnischen Entwurfsmodells an die vor Ort angebotenen, durch Messungen und Beobachtungen festgestellten Zustände. Diese, auch in der Norm verankerte Anforderung der Beobachtungsmethode im Grundbau, kann bisher nicht zufriedenstellend erfüllt werden. Die Ursache hierfür ist, dass eine umfassende, modellbasierte Analyse der erfassten Messdaten von den derzeit verfügbaren Informationssystemen nicht unterstützt wird, da die methodischen Grundlagen zu ihrer Umsetzung fehlen. Insbesondere die Systemidentifikation, also die Anpassung des mechanischen Modells an erfasste Messwerte, ist bisher nicht innerhalb sinnvoller Zeitgrenzen realisierbar.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Realisierung einer kontinuierlichen Systemidentifikation, die logisch in den Gesamtprozess der Bauausführung und der Messdatenerfassung eingebettet ist und die über die übliche numerische Modelloptimierung hinaus die Nutzung der Vielfalt von Stoffgesetzen für Böden erlaubt.

Aufgrund der Nichtlinearität realitätsnaher bodenmechanischer Modelle als auch der Unbestimmtheit des Systems ist eine Systemidentifikation auf analytischem Wege nicht möglich. Daher wird eine simulationsbasierte Systemidentifikation vorgeschlagen, bei der durch gesteuerte Variation der Stoffgesetze und Stoffparameter Modellkandidaten erzeugt und Simulationsläufe durchgeführt werden. Zur Nutzung der bestehenden Vielfalt an Stoffgesetzen wird eine Methodik zur logikbasierten Modellkomposition eingeführt, die die semiautomatische Suche und informationslogistische Einbindung von Stoffgesetzen in das mechanische Modell ermöglicht. Die hohe Anzahl gleichzeitig zu untersuchender Modellkandidaten in der Größenordnung von  $10^5$  bis  $10^6$  erfordert sowohl die Einbindung verteilter Rechenressourcen als auch eine semiautomatische Bewertung der Simulationsergebnisse. Zur Einbindung verteilter Rechenressourcen wird ein webservicebasiertes Softwarekonzept vorgeschlagen, das insbesondere die notwendige Anbindung an Grid- und Cloud-Computing erlaubt und die parallele Simulation der Modellkandidaten ermöglicht. Die Datenflut der manuell nicht mehr auswertbaren Simulationsergebnisse wird anhand einer vorgeschlagenen Modellmetrik, die die Zuverlässigkeit und die Signifikanz der Mess- und Simulationsdaten berücksichtigt, automatisch vorpriorisiert, sodass eine überschaubare Selektion der unter physikalischen und zeitlichen Konsistenzkriterien besten Modellkandidaten als Entscheidungsgrundlage für den Ingenieur möglich ist.

Eine kontinuierliche Systemidentifikation ist innerhalb der erforderlichen engen Zeitgrenzen nur dann möglich, wenn neben der algorithmischen Umsetzung der Simulation durch die Integration der Informationen und Anwendungen in ein Gesamtinformationssystem der Datenfluss durchgängig abgebildet werden kann und der automatische Zugriff auf die Daten gegeben ist. Bei der Überwachung eines entstehenden Bauwerks bestehen zwischen den Informationsknoten hochkomplex vernetzte, örtliche und zeitliche Zusammenhänge. Die Veränderungen im entstehenden Boden-Bauwerk-System müssen bei der Zuordnung der Messdaten berücksichtigt werden. Es ist ein mit den Boden-, Bauwerks- und Sensorobjekten verknüpftes Prozessmodell notwendig, das einfach zu modellieren ist und trotzdem die Erschließung der komplexen Zusammenhänge ermöglicht. Dies ist mit üblichen relationalen Datenbankkonzepten zum einen nicht mehr abbildbar, und zum anderen würden Datenabfragen in nicht mehr überschaubaren Abfragelogiken resultieren. Als Kern des Informationssystems wird daher ein auf Beschreibungslogik basierendes Produkt-Prozess-Metamodell eingeführt, das die 4D-Modellierung komplexer Bauwerke ermöglicht. Die Modellierungsmethode ist dabei so modularisiert, dass der Modellersteller nicht mit der hohen Komplexität der hochvernetzten transitiven Zusammenhänge belastet wird. Die Schlussfolgerungsfähigkeit des Beschreibungslogikansatzes ermöglicht die Deduktion komplexer Zusammenhänge und damit deren Vereinfachung durch automatische Explikation direkter Beziehungen. Da-

durch ist letzten Endes die Abfrage komplexer Zusammenhänge durch einfache Abfragemöglichkeiten möglich.

Die vorgeschlagene Methodik liefert einen ersten Ansatz, der die notwendige wissenschaftliche Basis zur softwaretechnischen Umsetzung von Informationssystemen für die baubegleitende Überwachung komplexer geotechnischer Projekte mit kontinuierlicher simulationsbasierter Systemidentifikation darstellt. Es ist damit möglich, Veränderungen im Systemverhalten zeitnah festzustellen, deren Ursachen zu diagnostizieren, sie physikalisch zu begründen und steuernd in das Bauverfahren einzugreifen.

## Thesen

1. Sowohl Prognosedaten aus modellbasierter Simulation als auch Messdaten erfassen jeweils das reale Boden- und Bauwerksverhalten nur näherungsweise. Der Umfang des Wissens über die Realität kann durch die kombinierte, baubegleitende Auswertung von modellbasierter Simulation und Beobachtungsdaten kontinuierlich erhöht werden.
2. Ein steuernder Eingriff in das Bauverfahren ist nur durch eine umfängliche Interpretation von Messdaten durch eine Systemdiagnose auf der Basis physikalisch begründbarer Modelle möglich. Hierfür ist eine kontinuierliche Systemidentifikation erforderlich.
3. Die bauzeitliche Verbesserung der Realitätsnähe von Prognosen des Systemverhaltens geotechnischer Ingenieurbauwerke scheidet nicht am Mangel an geotechnischen Modellansätzen und numerischen Software-Anwendungen, sondern an fehlenden Methoden zur automatisierten modellbasierten Messdatenanalyse und zeitnahen Systemidentifikation.
4. Eine simulationsbasierte Systemidentifikation mittels Nutzung mehrerer Stoffgesetze und Variation der Stoffparameter hat für jeden Auswertezyklus eine sehr hohe Anzahl an Modellkandidaten zur Folge. Eine zeitnahe Simulation und Auswertung ist durch parallelen Einsatz verteilter Ressourcen mit einer durchgängigen Anwendungs- und Informationsintegration realisierbar.
5. Die Qualität der simulationsbasierten Systemidentifikation hängt in hohem Maß von der Priorisierung der Modellkandidaten ab. Distanzmaße, die die Zuverlässigkeit der Mess- und Simulationsgrößen, sowie die physikalischen Abhängigkeiten der Messgrößen untereinander berücksichtigen, erlauben eine effiziente Priorisierung der Modellkandidaten.
6. Zur Systemidentifikation im Rahmen der Beobachtungsmethode ist es weniger erforderlich, das Prognosemodell numerisch exakt an die Messdaten anzupassen. Vielmehr sollen unerwartete Veränderungen im Systemzustand durch die Veränderungen im Modell rechtzeitig erkannt, physikalisch erklärt und Schlussfolgerungen für erforderliche Maßnahmen gezogen werden können.
7. Durch die miteinander in einem systematischen Zusammenhang stehenden Aktivitäten des Bauprozesses wird der Zustand eines Objektsystems über die Zeit durch Aktivitäten verändert. Mit dem Zustand eines Objektsystems ändert sich auch dessen Systemverhalten. Messdaten sind daher nur im Kontext des Bauprozesses auswertbar.
8. Die Abbildung von Zustandsänderungen der zu erstellenden und zu überwachenden Boden-Bauwerk-Systeme in einem kombinierten Produkt-Prozess-Modell ermöglicht die logische Nachvollziehbarkeit von Systemänderungen und ist daher eine wesentliche Voraussetzung zur Realisierung eines adaptiven Bauverfahrens.
9. Ein logikbasiertes, schlussfolgerungsfähiges und modular aufgebautes 4D-Metamodell zur integrierten Produkt-Prozess-Modellierung erlaubt die Verlagerung der Erschließung komplex vernetzter transitiver Zusammenhänge zwischen Bauprodukt und Bauprozess sowie Messsystem und Überwachungsprozess vom Menschen auf die Maschine.
10. Eine Beschreibungslogikrepräsentation des Wissens über Stoffgesetze und Stoffparameter ermöglicht die deduktive Ermittlung von Stoffgesetzen und -parametern, die nach logischen Kriterien für die anstehenden Böden und für die durch Beobachtung festgestellten physikalischen Effekte an Boden und Bauwerk anwendbar sind.
11. Webservices ermöglichen durch die Realisierung des komponentenbasierten Ansatzes und durch ihre Fernaufruffähigkeit die Komposition von Softwarekomponenten zu integrierten, bauprojektspezifischen Softwaresystemen, die Verteilung der Rechenlast und damit erst die Durchführung der simulationsbasierten Systemidentifikation in vertretbarer Rechenzeit.

## Abstract

Complex construction projects in geotechnical engineering are affected by high model uncertainties. They require continuous monitoring during the construction process and the adaptation of the original geotechnical design model to the site conditions, as perceived by measurements and observations. This requirement, which is also demanded by the observational method in ground engineering and is introduced in European and German standardization, can currently not be met satisfactorily. The reason for this is that a comprehensive, model-based analysis of the recorded data is not supported by information systems currently available because of the lack of the methodological basis for their implementation. In particular, system identification, i.e. the adaptation of the mechanical model to recorded sensor data is currently not capable of being realized within a reasonable time limit.

The objective of this work is a methodology for the realization of a continuous system identification that is logically embedded in the overall process of construction and data acquisition and which allows the use of the diversity of constitutive soil laws beyond the usual numerical model optimization.

Due to the nonlinearity of realistic soil models and the indeterminacy of geotechnical systems an analytical system identification is not possible. Therefore, an approach for simulation-based system identification is proposed, which produces model candidates by controlled variation of the constitutive laws and soil parameters and runs simulations. To use the existing variety of soil laws, a methodology for logic-based model composition is introduced which allows the semi automatic search and information-logical integration of constitutive laws in the mechanical model. The high number of concurrent model candidates to be examined in the order of  $10^5$  to  $10^6$  requires both the integration of distributed computing resources as well as the semi-automatic evaluation of the simulation results. For the integration of distributed computing resources a webservice-based software concept is proposed that allows connection to Grid and Cloud computing and enables the parallel simulation of the model candidates.

The flood of data from the simulation results that cannot be evaluated manually will be prioritized with a model metric introduced in this work. The model metric takes into account the reliability and significance of the measurement and simulation data. It provides a limited selection of best-fitting model candidates which fulfill physical and temporal consistency criteria and therefore provides a sound decision base for the engineer.

A continuous system identification will only be possible within the required tight time limits if, in addition to the algorithmic implementation of the simulation by the integration of information and applications into an overall information system, the data flow can be represented integratively and automatic access is given to the data. When monitoring a developing structure highly complex networked, spatial and temporal relationships exist between the information nodes. The changes in a soil-structure system need to be considered by assignment of the data. What is needed is a process model linked with the soil, structure and sensor objects, which is simple to model and nevertheless allows the deduction of complex relationships. With common relational database concepts on one hand this is not possible to be represented and on the other hand data queries would result in query logics that are not manageable. As the core of the information system, therefore, a product process meta-model based on description logics is introduced that allows the 4D modelling of complex engineering structures. The modelling method is modular, so that the Model Builder is not burdened with the high complexity of the highly cross-transitive relations. The reasoning ability of the description logic approach allows the deduction of complex relationships, and thus the simplification by automatic explication of direct relationships. Therewith the query of complex relationships through simple query logics is possible.

The proposed methodology provides a first approach, which is the necessary scientific basis for the implementation of information systems for monitoring complex geotechnical projects

during construction with continuous simulation-based system identification. It is thus possible to detect changes in system behaviour promptly, to diagnose its causes or possible physical reasons as a pre-requisite for the control of the construction process.

## Theses

1. Both prognosis data from model-based simulation and measured data capture the real behaviour of soil and structure only approximately. The amount of knowledge about reality can be increased continuously during construction by combined model-based simulation and analysis of observational data.
2. A controlled intervention in the construction process is only possible through extensive interpretation of measurement data by system diagnosis based on physically reasonable models. Therefore continuous application of system identification is required.
3. The construction-simultaneous improvement of realism of predictions of the system behaviour of geotechnical engineering structures fails neither due to lack of numerical modelling approaches in geotechnical engineering nor due to the lack of software applications, but because of a lack of methods for automatic model-based data analysis and short-time system identification.
4. Simulation-based system identification using multiple material models and variation of material parameters for each evaluation cycle results in a very large number of model candidates. A timely analysis and simulation can be realized by parallel use of distributed resources with integration of both software applications and information resources.
5. The quality of simulation-based system identification depends to a large extent on the prioritization of the model candidates. Distance measures that take into account the reliability of measurement and simulation as well as the physical inter-dependencies of the measured variables allow the efficient prioritization of model candidates.
6. System identification in the context of the observational method less requires the exact numerical match of the prognosis model to the measured data. It is rather important that unexpected changes in the system state can be identified and physically explained in due time by the changes in the model and that conclusions for the necessary measures can be drawn.
7. The state of an object system is changing over time by systematically related activities of the construction process. With the state of an object system also its system behaviour changes. Data can therefore only be evaluated in the context of the construction process.
8. Modelling the state changes of an emerging, monitored soil-structure-system in a combined product-process model allows the logical comprehensibility of system changes and is therefore an essential prerequisite for the realization of an adaptive construction method.
9. A logic-based, inference-capable and modular 4D meta model for integrated product-process modelling allows the transfer of complexity from the engineer to the machine using automated deduction of complex networked transitive relationships between engineering structure and construction process and measurement system and monitoring process.
10. A description logic representation of knowledge about material laws and material parameters allows the deductive determination of constitutive laws and parameters that are applicable according to logical criteria for the upcoming soils and physical effects on soil and structure, identified through observation.
11. Web services enable the realization of a component-based approach. Their ability to be accessed by remote calls and the composition of the components to integrated, domain-specific software systems enable the distribution of computational load and therewith the realization of simulation-based system identification in passable computing time.