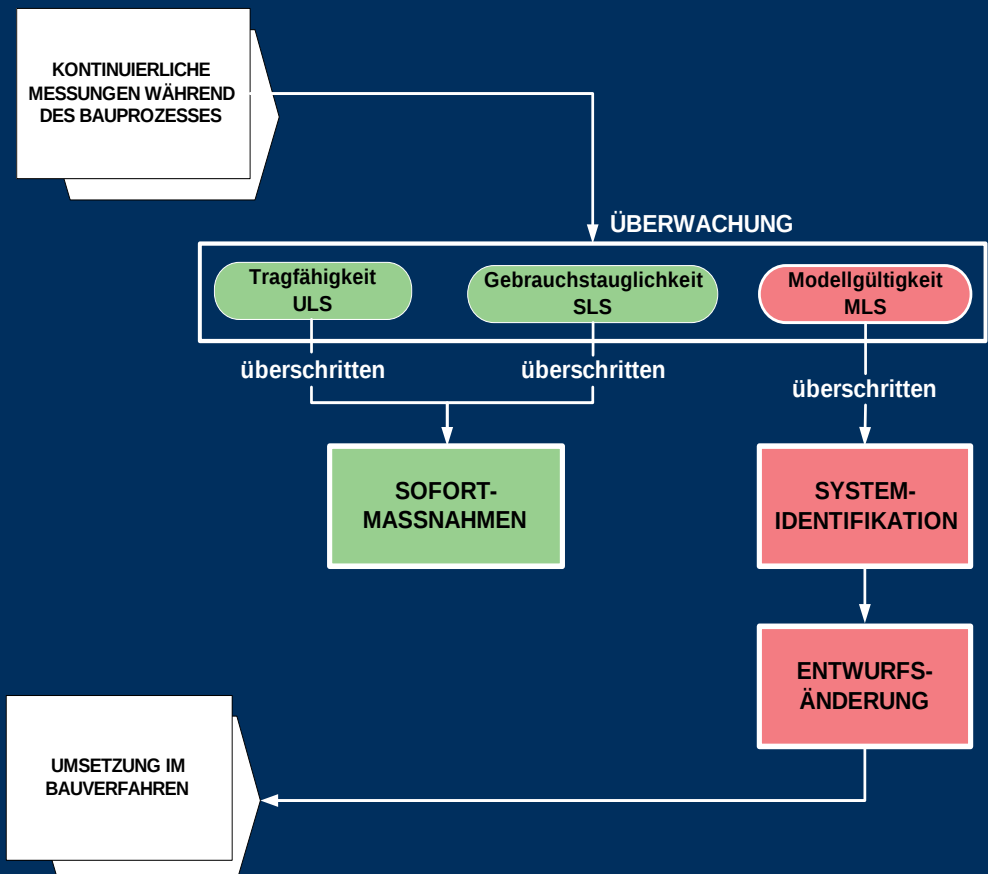




Gerald Faschingbauer

Simulationsbasierte Systemidentifikation im Rahmen der baubegleitenden geotechnischen Überwachung

DISSERTATION · FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN



Simulationsbasierte Systemidentifikation im Rahmen der baubegleitenden geotechnischen Überwachung

**Simulation-based system identification in construction-
simultaneous geotechnical monitoring**

Gerald Faschingbauer

Berichte des Instituts für Bauinformatik, Heft 8

Schriftenreihe des Instituts für Bauinformatik
Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. J. Scherer

© Institut für Bauinformatik,
Fakultät Bauingenieurwesen, TU Dresden, 2010

1. Auflage, Januar 2011
ISBN: 978-3-86780-205-5

Institut für Bauinformatik, TU Dresden

Postanschrift

Technische Universität Dresden
01062 Dresden

Besucheranschrift

Nürnberger Str. 31a
2. OG, Raum Nr. 204
01187 Dresden

Tel.: +49 351/463-32966
Fax: +49 351/463-33975
E-Mail: Raimar.Scherer@tu-dresden.de
www: <http://tu-dresden.de/biw/cib>

Diese Arbeit wurde unter dem Titel

Simulationsbasierte Systemidentifikation im Rahmen der baubegleitenden geotechnischen Überwachung

Simulation-based system identification in construction- simultaneous geotechnical monitoring

an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden als

DISSERTATION

von

Gerald Faschingbauer

geboren am 20. Dezember 1976 in Passau

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigt.

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Raimar J. Scherer, Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. Eugen Perau, Universität Duisburg Essen

Tag der öffentlichen Verteidigung: 21. Dezember 2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2003 bis 2010 während meiner Tätigkeit am Institut für Bauinformatik der TU Dresden. In dieser Zeit durfte ich mich in die vielfältigen Aspekte der Bauinformatik einarbeiten und mich an der Erarbeitung und Realisierung neuer Ideen beteiligen. Ich bin dabei vielen Personen begegnet, die mich bei meiner Arbeit unterstützt, ermutigt und zum Nachdenken angeregt haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Raimar J. Scherer vom Institut für Bauinformatik der TU Dresden danke ich an dieser Stelle sehr herzlich für die Unterstützung und wissenschaftliche Begleitung in den vergangenen Jahren. Er hat mir nicht nur die Chance zur Promotion eröffnet, sondern durch seinen Ideenreichtum, die Freiheiten bei der Ausgestaltung des Themas und durch viele konstruktive Diskussionen meine Entwicklung zum Wissenschaftler gefördert. Herrn Prof. Dr.-Ing. Eugen Perau vom Fachgebiet Geotechnik der Universität Duisburg-Essen vielen Dank für die Diskussionen zum gegenwärtigen Stand der Praxis bei der geotechnischen Überwachung sowie für die Anregungen bei der Bearbeitung des Themas und für die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dimitris Diamantidis von der Hochschule Regensburg sei herzlich gedankt für die Unterstützung in der Anfangsphase meiner Promotionszeit sowie sein stetiges Interesse an meiner Arbeit und für die Beteiligung am Promotionsverfahren. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle von der Professur für Bodenmechanik und Grundbau der TU Dresden möchte ich für die Beiträge zur Idee und für die vielen Diskussionen über den Einsatz und die Bedeutung fortgeschrittener Stoffgesetze im Rahmen der geotechnischen Überwachung sowie für die Beteiligung am Promotionsverfahren herzlich danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd W. Zastrau vom Institut für Mechanik und Flächentragwerke der TU Dresden danke ich für die bereitwillige Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission sowie für das Interesse an meiner Arbeit in den vergangenen Jahren.

Meinen Kollegen am Institut für Bauinformatik danke ich für die angenehme und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre sowie für die vielen aufmunternden Worte. Stellvertretend möchte ich hier Herrn Dr. Peter Katranuschkov danken, der mir während meiner Zeit am Institut immer ein guter und erfahrener Berater war und ist.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, vor allen meiner Frau Diane, für die Liebe, die Geduld, die Kraft und die willkommene Ablenkung, die ich durch sie immer wieder erfahren darf.

Ich hoffe, dass meine Arbeit ein klein wenig zur Erhöhung der Sicherheit im Grundbau, zumindest aber zu einem erhöhten Risikobewusstsein beitragen wird, und dass weitere darauf aufbauende Arbeiten entstehen. In diesem Sinne wünsche ich viel Spaß und Erfolg beim Lesen!

Dresden, im Dezember 2010

Gerald Faschingbauer

Für Diane

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 angetroffenen, 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. Dadurch ist letzten Endes die Abfrage komplexer Zusammenhänge durch einfache Abfragelogiken 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.

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 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-logistical 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.

Inhalt

1. Zielsetzung	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Lösungsansatz	6
1.3. Aufbau der Arbeit	10
2. Systemmodellierung und modellbasierte Bauverfahrenssteuerung	13
2.1. Systemtheorie	13
2.1.1. Objektsystem	13
2.1.2. Handlungssystem	14
2.1.3. Kopplung von Handlungs- und Objektsystem	17
2.2. Kontrolltheorie und Regeltechnik	19
3. Messdateninterpretation durch simulations-basierte Systemidentifikation	23
3.1. Verhalten von Böden - Geotechnische Modelle	23
3.2. Geotechnische Überwachungsmethoden	26
3.2.1. Beobachtungsmethode	26
3.2.2. Messsysteme	32
3.3. Systemidentifikation	40
3.3.1. Grundlagen der Systemidentifikation und ähnliche Arbeiten	40
3.3.2. Systemidentifikation im Rahmen der geotechnischen Beobachtungsmethode	44
4. Verteilte semantische Informationssysteme	51
4.1. Repräsentation von Informationen über Bauwerk und Bauprozess	51
4.1.1. Produktmodellierung	52
4.1.2. Prozessmodellierung	53
4.2. Grundlagen der Daten-, Informations- und Wissensrepräsentation	58
4.2.1. Relationales Modell	61
4.2.2. Entitäts-Beziehungs-Modell	63
4.2.3. Beschreibungslogiken und logisches Schlussfolgern	65
4.2.4. Ontologien und Semantic Web	72
4.3. Semantic Web Technologien	73
4.4. Komponentenbasierte verteilte Softwareentwicklung	79
4.4.1. Serviceorientierte Architekturen mit Webservices	80
4.4.2. Informationslogistik – Webservice-Orchestrierung	85

5.	IT-basierte Beobachtungsmethode für adaptive Bauverfahren	89
5.1.	Überwachungsprozess.....	90
5.2.	Architektur des Rahmeninformationssystems	98
5.3.	Wissensbasis	100
5.3.1.	Objektorientierte Modellierung von Objektzuständen.....	102
5.3.2.	Prozessmodelle der Bau- und Überwachungsprozesse	105
5.3.3.	Integration von Produkt- und Prozessmodell.....	109
5.3.4.	Beschreibungslogikbasiertes Metamodell und Deduktionskalkül.....	117
5.3.5.	Deduktionskalkül zur Inferenz vergleichbarer Sensor- und Prognosedaten	122
5.3.6.	Logikbasierte Modellkomposition	125
5.3.7.	Prototyp der OWL-DL-Wissensbasis.....	133
5.4.	SOA-System.....	139
5.4.1.	Managementservices	141
5.4.2.	Ingenieurservices	142
5.4.3.	Informationslogistikservices	145
6.	Schlussfolgerungen	147
6.1.	Zusammenfassung.....	147
6.2.	Ergebnis	149
6.3.	Ausblick.....	151
7.	Literaturverzeichnis	153

1. Zielsetzung

1.1. Problemstellung

Komplexe Baumaßnahmen im geotechnischen Ingenieurbau sind geprägt von hohen Modellunsicherheiten. Sie erfordern daher eine ständige baubegleitende Überwachung sowie ggf. die Anpassung des ursprünglichen geotechnischen Entwurfs an die vor Ort angetroffenen, durch Messungen festgestellten Zustände. Diese Anforderung kann bis heute nicht zufriedenstellend erfüllt werden.

Die zutreffende Modellierung des nichtlinearen mechanischen Bodenverhaltens ist vor Baubeginn durch die große Heterogenität des Bodens schwer möglich. Während der Bauphase wäre es daher bei komplexen Projekten grundsätzlich erforderlich, das Boden-Bauwerksverhalten durch kontinuierliche sensortechnische Überwachung zu erfassen und das mechanische Modell durch Systemidentifikation an die Messdaten anzupassen, zeitnah auszuwerten und ingenieurmäßig zu interpretieren. Diese Verfahrensweise würde es ermöglichen, realitätsnäher zu planen und so während der Bauphase durch Adaption des Bauverfahrens die Sicherheit für das Bauwerk und seine Umgebung zu erhöhen, Baukosten zu reduzieren, sowie den Kenntnisstand bezüglich des Baugrundverhaltens und damit auch den wissenschaftlichen Kenntnisstand zu erweitern. Aufgrund der hohen Nichtlinearität bodenmechanischer Modelle als auch der Unbestimmtheit des Systems ist die zur Anpassung des mechanischen Modells erforderliche Systemidentifikation auf analytischem Wege nicht möglich. Bei der Anwendung einer simulationsbasierten Systemidentifikation, die auf der Variation der Modellparameter basiert, besteht das Problem, dass die Zeit bis das geotechnische Ingenieurmodell als zuverlässig angesehen werden kann, die zur Verfügung stehende Zeit um Größenordnungen überschreitet. Der hohe manuelle Arbeitsanteil bei einer simulationsbasierten Systemidentifikation, angefangen von der Auswertung der Sensoren, über das Aufstellen der nichtlinearen Modellkandidaten, die nichtlineare Berechnung, iterative Neumodellierung und Neuberechnung sowie der Priorisierung und Auswertung der Simulationsergebnisse lässt eine zeitnahe Systemidentifikation, Systemdiagnose und damit die adaptive Anpassung des Bauverfahrens bisher nicht zu.

Wie wichtig die ingenieurmäßige Systemdiagnose anhand von Messdaten in Verbindung mit einer Systemanalyse vor allem für die Reduktion von Risiken ist, zeigt das Schadensbeispiel beim Bau des U-Bahn-Tunnels in Amsterdam im Juni 2008. Es wurde ein computergesteuertes Messsystem zur Überwachung von 1250 Gebäuden eingesetzt. 70 Instrumente haben ständig Setzungen an 5500 Messstellen überwacht. Trotzdem kam es an einigen Gebäuden an der Amsterdamer Vijzelgracht zu Schäden, die sogar die Einsturzgefahr einiger Gebäude zur Folge hatten. Dieses aktuelle Beispiel zeigt deutlich, dass alleine die Messung der Auswirkungen, in diesem Fall die Setzungen an der Geländeoberfläche, und der Vergleich mit Grenzwerten nicht ausreichend sind. Erst die Systemdiagnose auf Basis von physikalisch begründbaren Ingenieurmodellen kann den Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung zuverlässig herstellen, sodass eine verbesserte Prognose des Boden-Bauwerks-Verhaltens, und damit ein objektiver Blick in

die Zukunft als Basis für die rechtzeitige Adaption des Bauverfahrens möglich sind. Auch bei den derzeit noch nicht abschließend untersuchten Schadensfällen, wie dem Einsturz des Stadtarchivs und angrenzender Gebäude an der U-Bahn-Baustelle in Köln 2009 sowie dem Tunneleinsturz in Hangzhou, China 2008, wäre durch eine baubegleitende Systemidentifikation und Systemdiagnose zumindest das Potenzial vorhanden gewesen, Fehlentwicklungen früher zu erkennen und Schäden zu verhindern oder zumindest in Art und Umfang nennenswert zu begrenzen.

Von der Anpassung bzw. Systemidentifikation des mechanischen Modells während der Bauzeit wird wegen des hohen manuellen Aufwands heute nur in sehr begrenztem Rahmen Gebrauch gemacht. Änderungen bleiben, soweit sie überhaupt durchgeführt werden, trotz der durch baubegleitende Messungen und Versuche gewonnenen Informationen auf die Ebene der Parameteroptimierung beschränkt, d. h. das vereinfachte mechanische Entwurfsmodell wird meist beibehalten und in seiner Modellstruktur nicht geändert. Die in den letzten Jahren entwickelten komplexen Stoffgesetze, die durchaus in der Lage wären, das Bodenverhalten genauer zu repräsentieren (Herle, 2003), bleiben damit für den praktischen Einsatz ungenutzt. Anpassungen der gewählten Berechnungsannahmen und -modelle, die eine sichere Vorhersage des Bodenverhaltens, eine zunehmend wirklichkeitsnähere Simulation der Bauaufgabe und eine zunehmend sichere Auslegung der Bauwerke ermöglichen, finden – wenn überhaupt – nur im Rahmen der Ursachenfindung für bauzeitlich entstandene Schäden statt. Das Einsparpotential, das sich durch höhere Effektivität, reduzierte Schadensfälle und wirklichkeitsnähere Sicherheitsabstände ergibt, sowie die Erhöhung der Sicherheit von Leib und Leben, bleiben damit bisher ungenutzt.

Erfahrungen aus mehreren großen Baustellen wie z.B. das Großprojekt Alexa in Berlin (Baugrube: 260 x 110 m, Tiefe: 23 m), die Schleuse bei Uelzen (Baugrubentiefe über 30 m), die U-Bahn U4 am neuen Hamburger Hafen-City, Tunnel der Alpenmagistralen sowie die Gründung diverser Hochhäuser in Frankfurt, Köln und München haben gezeigt, dass insbesondere bei der Überwachung während des Bauablaufs auch die Verarbeitung, Nutzung und Verwaltung der Überwachungsdaten zu sehr anspruchsvollen Aufgaben werden.

Die Notwendigkeit, der Nutzen und der Wunsch nach IT-gestützten Verfahren für eine kontinuierliche Systemidentifikation werden durch abgewinkelte Projekte bestätigt. So beschreiben (Borchert, Deterding, & Trobisch, 2005) die Überwachungsmaßnahmen beim Bau einer großen (42000 m²) und tiefen (i.M. 10-22 m) Baugrube im Pilgerschrittverfahren am historischen Lehrter Bahnhof in Berlin. Die zur Bemessung der Konstruktionssohlen zugrundegelegten vertikalen Bettungsmoduli wurden auf der Basis von Setzungsmessungen bereits fertig gestellter Tunnelabschnitte während der Bauzeit verifiziert. Dies war hier insbesondere deswegen notwendig, um den sicheren Betrieb bereits fertig gestellter und in Betrieb genommener Bahnanlagen zu gewährleisten. Es wurden z.B. Nachstellmöglichkeiten für Brückenaufleger in Bezug auf die zu erwartenden Hebungen bzw. Setzungen vorgesehen, die je nach Hebung/Setzung eingestellt wurden. Die bereits in der Planungsphase erstellte analytische Prognose der Vorformungen wurde hierfür während der Herstellung der Baugruben und Bauwerke des Lehrter Bahnhofes in den Jahren 1997 bis 2004 fortlaufend aktualisiert und verbessert.

Die bei derartigen Überwachungsprojekten entstehenden großen Datenmengen sind nur schwer oder überhaupt nicht mehr manuell handhabbar und müssen zur Auswertung je nach den zeitlichen Randbedingungen evtl. sogar auf mehrere Rechner verteilt werden. Hierzu ist es notwendig, den gezielten und geregelten Zugriff auf Daten zu ermöglichen, Schnittstellen zwischen Softwareanwendungen anzupassen und die Informationslogistik zwischen mehreren involvierten Softwareanwendungen und beteiligten Parteien zu steuern. Die Softwareanforderungen gehen also über die bisher an automatische Messanlagen gestellten Anforderungen hinaus.

(Thut, 2001) stellt aus praktischer Sicht folgende Mindestanforderungen an eine automatische Messanlage:

- Permanente messtechnische Erfassung online mit frei wählbarer Registrierungsrate
- Online Berechnung von Mittelwerten, Maxima, Minima
- Online Messwertkompensation und online Berechnung um von den Messwerten auf relevante Messresultate zu schließen
- Einrichtung und Einstellung zur Grenzwertüberwachung der Messwerte und der ausgewerteten Messungen /(Resultate) auf obere und untere Grenzwerte
- Stufenweise Alarmeinrichtung bei Überschreiten der Grenzwerte
- Triggerfunktion, d.h. Erhöhung der Messrate bei Grenzwertüberschreitung
- Alarmierung mit Blinkleuchte, Fax-Benachrichtigung auf verschiedene Stellen und Mobiltelefone

Diese Anforderungen, die in praktischen Messsystemen bereits weitgehend umgesetzt sind, beschränken sich weitestgehend auf die Erfassung der Daten und auf die Überwachung von Grenzwertüberschreitungen.

Mit der Bauwerksüberwachung im Sinne dieser Arbeit ist jedoch neben den dafür notwendigen Messungen und Versuchen und einfachen Soll-ist-Vergleichen noch eine Vielzahl an Analyseaufgaben verbunden, die höhere Anforderungen vor allem an das Datenmanagement und die Datenverarbeitung stellen. Die Messungen an sich werden erst durch die ingenieurmäßige Interpretation der Messdaten zu einer angemessenen Ausgangsbasis für Entscheidungen, die den weiteren Umgang mit dem zu erstellenden oder fertigen Bauwerk bestimmen. Das heißt, es sind kontinuierlich Dateninformationen über den material-, energie- und informationstransformierenden Bauprozess zu erfassen und in einem Monitoringprozess auszuwerten und zu interpretieren. Daraus abgeleitete Entscheidungen sind schließlich als Befehlsinformation wieder in den Bauprozess zurückzuführen (Abbildung 1).

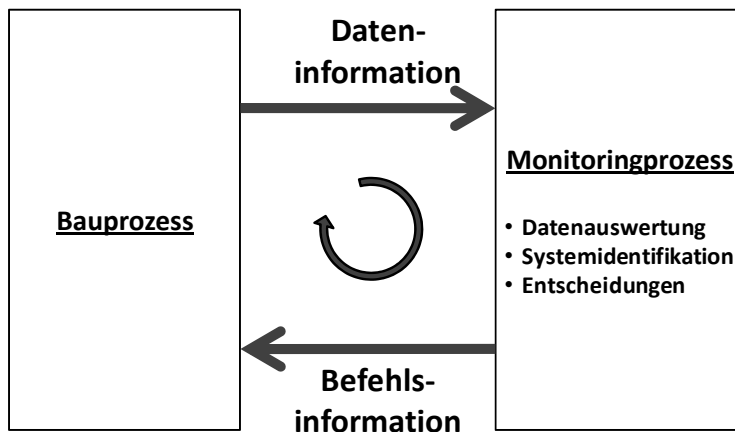


Abbildung 1: Wechselwirkung zwischen Bau- und Monitoringprozess

Um die ingenieurmäßige Interpretation der Daten effektiv zu ermöglichen, müssen diese dem Ingenieur in einer Art zugänglich gemacht werden, die ihm die Weiterverarbeitung mit dem geringsten möglichen Aufwand ermöglichen. Durch die für die Systemidentifikation erforderliche hohe Anzahl an Mess- und Versuchsinstrumenten und damit auch den wachsenden Anforderungen an die Überwachung von Bauwerken, insbesondere während des Bauablaufs, wird auch die Verarbeitung und Nutzung der Überwachungsdaten zu einer anspruchsvolleren Aufgabe.

Die effektive Nutzung sowohl der Daten als auch der zur Verfügung stehenden mechanischen Modellansätze ist nur dann möglich, wenn es gelingt, durch innovativere Softwaresysteme den Tätigkeitsschwerpunkt des Ingenieurs bei der Bedienung der Software von administrativen Tätigkeiten auf die Beurteilung von Ergebnissen und auf Entscheidungen zu verschieben. Hierzu ist es notwendig, den automatischen Zugriff auf die Daten zu ermöglichen, Schnittstellen zwischen Softwareanwendungen anzupassen und die Informationslogistik zwischen mehreren involvierten Experten sowie zwischen den verwendeten Softwareanwendungen durch ein Informationssystem zu steuern. Auch die Verfügbarkeit von Softwareanwendungen für spezielle Ingenieurprobleme, die bei der Überwachung von geotechnischen Ingenieurbauwerken während der Ausführungsphase auftreten können, ist nicht in jedem Fall gegeben. Demzufolge ist nicht nur der Zugriff auf Daten, sondern auch der Zugriff auf Spezialsoftware von Bedeutung. Auch hierfür bieten neuere Entwicklungen der Informatik Möglichkeiten, den Ingenieur durch schnelle Versorgung mit Spezialsoftware von administrativen Nebentätigkeiten zu entlasten.

Die begrenzte Kapazität des Bearbeiters ist allerdings nicht die einzige Engstelle, die die Geschwindigkeit der Auswertung von Messdaten maßgeblich bestimmt. Auch durch die eingeschränkte Rechenkapazität der zur Verfügung stehenden Hardware sind den Möglichkeiten der Datenauswertung für die Bauwerksüberwachung Grenzen gesetzt. Die Auswertung von komplexen mechanischen Modellen ist auf modernen High-End-Geräten zwar grundsätzlich möglich, im Zusammenhang mit der Bauwerksüberwachung ist es jedoch mitunter erforderlich (oder zumindest hilfreich) eine hohe Anzahl an Modellen zu untersuchen, deren Parameter zum großen Teil auch noch durch Versuchsrech-

nung bestimmt werden müssen. Will man dies mit einem für die Bauwerksüberwachung zielführenden Iterationszyklus erreichen, ist hierfür der parallele Einsatz von mehreren Rechnern erforderlich. Neue Methoden zur Parallelisierung und Verteilung von Rechenprozessen stellen eine Möglichkeit dar, die Nachrechnung von Überwachungsdaten auch mit komplexen mechanischen Modellen im Rahmen der für die Bauwerksüberwachung notwendigen Zeitgrenzen zur realisieren.

Die Anforderungen nach (Thut, 2001) sind also im Hinblick auf die Nutzung der Überwachungsdaten zur Systemidentifikation und zur Adaption des Bauverfahrens um folgende Punkte zu erweitern:

- Semiautomatische Systemidentifikation,
- Umfangreichere, schnellere, zuverlässigere und kostengünstigere Datenauswertung durch Reduzierung des manuellen Anteils,
- Gezielter Zugriff auf Daten und Erzeugung bedarfsgemäßer Datensichten durch fortgeschrittene Abfrage- und Filtermethoden,
- Integration der Anwendungsprogramme und bedarfsgemäße Nutzung von Hochleistungsrechnen bei logischen Entscheidungen und Simulationen,
- Gezielte logische Modellauswahl und Verbesserung der Vorauswertung von Daten als fundierte Entscheidungsgrundlage für den Ingenieur,
- Formalisierte Kriterien zur Priorisierung untersuchter Modellkandidaten,
- Kontinuierliche Erweiterung und Management des Wissens über Baugrundeigenschaften, Einwirkungen und Zustand des Bauwerks,
- Genauere Abbildung des Bodenverhaltens durch Nutzbarmachung der Vielfalt komplexerer Stoffgesetze,
- Unterstützung bei der ingenieurmäßigen Interpretation der Daten und Erzeugung von Entscheidungsgrundlagen zur Erhöhung von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit,
- Einsatz unter zeitkritischen Bedingungen.

1.2. Lösungsansatz

Zur Realisierung eines adaptiven Bauverfahrens, bei dem kontinuierlich erfasste Messdaten zum Erkenntnisgewinn und als Entscheidungsgrundlage für die Bauverfahrenssteuerung eingesetzt werden, ist die Integration von Bau- und Monitoringprozess erforderlich. Bau- und Monitoringprozess können hierbei nicht als unabhängige Prozesse betrachtet werden, sondern beide Prozesse müssen interagieren, um einerseits einen kontinuierlichen Wissensgewinn zu ermöglichen, der nur durch eine umfangreiche modellbasierte Analyse der während des Bauprozesses an Bauwerk und Boden erfassten Messdaten erreicht werden kann und andererseits die Rückführung der dadurch gewonnenen Erkenntnisse in den Bauprozess durch adaptive Bauverfahrenssteuerung zu ermöglichen. Da der derzeitige, auf reine Schwellwertüberwachung beschränkte, Stand der baubegleitenden Überwachung lediglich schwache Indizien für die Ursachen ungeplanten Systemverhaltens liefert, und daher zur Stellung einer Systemdiagnose unzureichend ist, wird in dieser Arbeit die Ergänzung einer simulationsbasierten Systemidentifikation vorgeschlagen, die durch kontinuierliche Simulation, Modellvalidierung und Modellanpassung realisiert wird. Die durch Systemidentifikation ermittelten Modelle ermöglichen eine ingenieurmäßige Interpretation und damit eine physikalisch begründbare Diagnose des Boden-Bauwerk-Verhaltens. Die hierdurch gewonnen Erkenntnisse werden bei maschinellen Bauverfahren durch automatische Regelung und bei manuellen Bauverfahren durch verifizierte Entwurfsentscheidungen in den Bauprozess zurückgeführt. Aus den vorgenannten Überlegungen ergibt sich der in Abbildung 2 grob dargestellte, gekoppelte und kontinuierlich durchlaufende Bau- und Monitoringprozess, für dessen Realisierung in dieser Arbeit die methodischen Grundlagen gelegt werden.

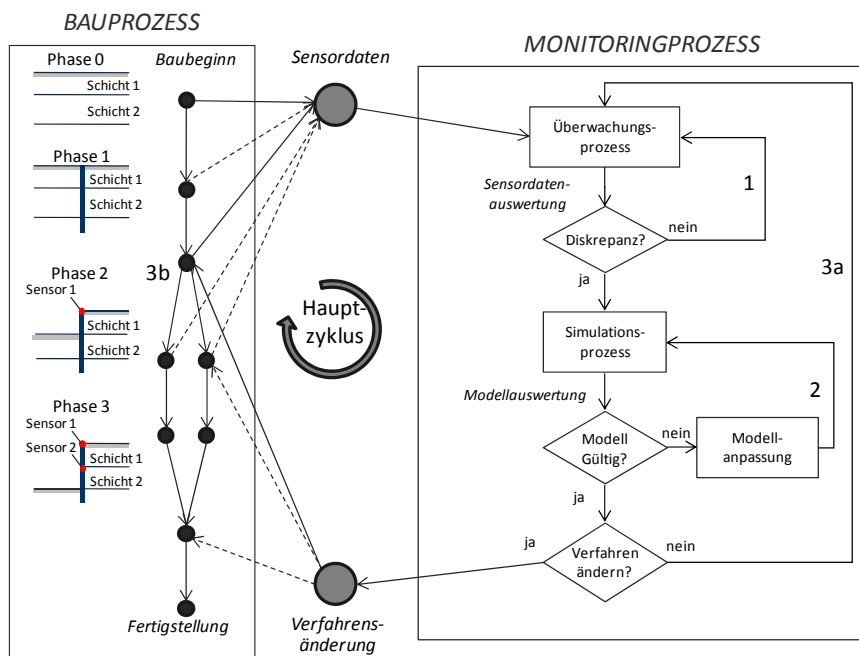


Abbildung 2: Kontinuierlich durchlaufender, gekoppelter Bau- und Monitoringprozess

Der Bauprozess wird dabei begleitet durch einen nebenläufigen, kontinuierlichen Monitoringprozess, der ständig Sensordaten mit definierten Grenzwerten vergleicht (Zyklus 1) und bei Überschreitung den Simulationsprozess triggert. Der Simulationsprozess besteht aus der Untersuchung und Auswertung mehrerer geotechnischer Modellkandidaten, aufgrund deren Ergebnisse entschieden wird, ob eine Modellanpassung notwendig ist. Ist das aktuelle geotechnische Modell ungültig, wird der Simulationsprozess (Zyklus 2) so oft wiederholt, bis ein verbessertes, gültiges Modell gefunden wird. Dies könnte noch um eine Optimierung erweitert werden. Auf der Basis der Modellanpassung kann schließlich darüber entschieden werden, wie Baumaschinen und Bauverfahren zu steuern sind, oder ob eine gänzlich neue Situation eingetreten ist und gegebenenfalls eine Änderung des Bauverfahrens bzw. des Bauwerksentwurfs aus sicherheitstechnischen oder wirtschaftlichen Erwägungen notwendig oder möglich ist. Ist keine Verfahrensänderung notwendig, wird der Überwachungsprozess planmäßig fortgesetzt (Zyklus 3a). Ist hingegen eine Verfahrensänderung aus wirtschaftlichen oder sicherheitstechnischen Gründen angezeigt, wird im Hauptzyklus aktiv durch Maßnahmen in den Bauprozess eingegriffen (Zyklus 3b) und das Bauverfahren entsprechend geändert.

Kern des Konzeptes ist ein Informations-Management-System, das die wesentlichen Aspekte der Datenverarbeitung im Rahmen der Überwachung von geotechnischen Ingenieurbauwerken insbesondere während der Ausführungsphase unterstützt. Ein wesentlicher Aspekt ist es dabei, bestehende Software über eine serviceorientierte Architektur mit weiteren Services zur logikbasierten Datenaufbereitung, zur Datenauswertung und zur wissens- und simulationsbasierten Systemidentifikation zu integrieren und somit zu einer messbaren Erhöhung der Effizienz und der Sicherheit im geotechnischen Ingenieurbau beizutragen. Hierzu wird ein Rahmeninformationssystem konzipiert, das die Integration von existierenden Modellen, Methoden und Softwarewerkzeugen zu einem ganzheitlichen Monitoringsystem ermöglicht. Die Arbeit zielt dabei insbesondere auf die Unterstützung der Informationsverarbeitung und der Anpassung des Entwurfs während der Bauausführung. Eine wesentliche Anforderung an dieses Rahmensystem ist dabei das Management von Sensordaten und Prognosedaten. Die Organisation und Vorbereitung der Daten für die eigentliche Systemidentifikation ist ein nicht zu unterschätzender Faktor. Eine kontinuierliche Systemidentifikation ist nur dann möglich, wenn der Datenfluss durchgängig abgebildet werden kann und der automatische Zugriff auf die Daten gegeben ist. Bei der Überwachung eines entstehenden Bauwerks, also eines prozessinstationären Systems, bestehen zwischen den Informationen hochkomplexe Zusammenhänge, die – insbesondere durch den Unikatcharakter der Bauvorhaben – mit den üblichen relationalen Datenbankkonzepten alleine nicht ausreichend abgebildet werden können. Als Kern des Informationssystems wird daher eine Wissensbasis auf Grundlage einer Beschreibungslogik entwickelt, die ein schlussfolgerungsfähiges Metamodell zur 4D-Modellierung des entstehenden geotechnischen Ingenieurbauwerks und des Messsystems umsetzt, sodass Mess- und Simulationsdaten in den Kontext der Ausführungsphasen als auch in direkten Bezug zu den Bauwerksobjekten gesetzt werden können. Dies ermöglicht schließlich die eindeutige topologische Zuordnung von Messdaten zu den jeweiligen Bauwerken / Bauwerksteilen und auch die Zuordnung zu den jeweiligen Prognosemodellen. Das Rahmensystem ermöglicht es, abhängig von der jeweiligen Überwachungsaufgabe für jedes Überwachungsprojekt ein Monitoringsystem flexibel zu konfigurieren, und die zur Verfügung stehenden Modelle, Methoden und Softwarewerkzeuge zu integrieren.

Ziel der Arbeit ist es, die Möglichkeit zu schaffen, bereits bestehende Softwarewerkzeuge flexibel zu einem Gesamtsystem für die Bauwerksüberwachung in einer IT-Infrastruktur zusammenzuschließen und für die spezielle Überwachungsaufgabe zu konfigurieren. Die Informationen in den während der Bauausführung kontinuierlich erfassten Messdaten werden letztlich durch Systemidentifikation nutzbar gemacht, um das Wissen über den Boden, das Bauwerk, dessen Umfeld und deren Wechselwirkung während des Bauprojektes zu erhöhen. Durch die hohe Heterogenität des Bodens und durch die Nichtlinearität der bodenmechanischen Modelle ist eine geschlossene analytische Systemidentifikation nicht möglich. Daher wird eine simulationsbasierte Systemidentifikation vorgeschlagen, die nur durch ein Softwarekonzept mit Nutzung verteilter Rechenressourcen realisierbar ist. Hierbei werden durch gesteuerte Variation der Modellparameter, als auch von Modellansätzen Modellkandidaten erzeugt, mit denen Simulationsläufe durchgeführt werden. Um ein Modell zu erhalten, das das mechanische Verhalten des Bodens und des Bauwerks möglichst realitätsnah abbildet, soll auch der Einsatz komplexer Stoffgesetze ermöglicht werden.

Zur Nutzung der bestehenden Vielfalt an Stoffgesetzen und zur gezielten Variation der Stoffparameter wird eine Methodik zur logikbasierten Modellkomposition eingeführt, die die semiautomatische Suche und Einbindung von Stoffgesetzen in das mechanische Modell ermöglicht. Diese Kombination des Simulationsverfahrens mit wissensbasierten Methoden gewährleistet einen gezielten Einsatz der Simulation, insbesondere jedoch eine sinnvolle Auswahl der bodenmechanischen Simulationsmodelle. Die Realwelt des Bauwerks, des Sensorsystems und der Prozesse wird durch eine Beschreibungslogik abgebildet. Durch logisches Schlussfolgern wird über die Aufbereitung und Verarbeitung der Sensordaten entschieden und mögliche Modellkandidaten werden mit ihren Parametern unter Berücksichtigung logischer Randbedingungen für die anschließende numerische simulationsbasierte Systemidentifikation ausgewählt. Die Anwendung der Beschreibungslogik und des automatischen logischen Schlussfolgerns ist hier deswegen von großer Bedeutung, weil damit komplexe Zusammenhänge durch einfache Beziehungen in Kombination mit Regeln dargestellt werden können und so eine hohe Komplexität der logischen Beziehungen gehandhabt werden kann.

Die Realisierung der simulationsbasierten Systemidentifikation ist mit zwei Geschwindigkeitsproblemen verbunden:

1. Der Aufbau der erforderlichen hohen Anzahl an Modellkandidaten mit Nutzung der Vielfalt an Stoffgesetzen und die Identifikation der realitätsnahen Modelle durch Priorisierung der Simulationsergebnisse sind manuell nicht zu bewerkstelligen und erfordern daher sowohl eine Automatisierung der Variantenbildung und der Modellkomposition als auch eine semiautomatische Bewertung der Simulationsergebnisse und Modellpriorisierung, um eine schnelle, zeitnahe Systemidentifikation zu erreichen.
2. Die Simulation der sehr hohen Anzahl an Modellkandidaten mit nichtlinearen Modellen ist nur durch hochparallele Simulation der Modellkandidaten durchführbar. Das Informationssystem muss daher so konzipiert werden, dass einerseits die Nutzung externer paralleler Rechenressourcen und andererseits die flexible Konfigurierbarkeit des Systems für die Vielfalt geotechnischer Problemstellungen ermöglicht wird.

Die Identifikation eines realitätsnahen Modells ist die Grundvoraussetzung, um objektive Aussagen über den Boden- und Bauwerkszustand treffen zu können und damit alle weiteren Entscheidungen über das Bauverfahren auf eine solide Grundlage zu stellen. Dies eröffnet die Möglichkeit, durch ingenieurmäßige Interpretation zu erklären, ob es sich bei festgestellten Diskrepanzen zwischen Prognose und Messung um eine Fehlentwicklung handelt, wo die Ursache liegt und ob eine Adaption des Planungsentwurfs und des Bauverfahrens notwendig ist. Dadurch ist im Bedarfsfall eine rechtzeitige, vorausschauende, auf objektiven Entscheidungskriterien basierende Reaktion auf Fehlentwicklungen möglich. Die zur Datenauswertung und Simulation erforderlichen Methoden und Algorithmen werden als Webservices implementiert. Die Informationslogistik wird durch ein flexibel konfigurierbares Prozessmodell abgebildet und durch Orchestrierung der Webservices realisiert. Die Dekomposition von bodenmechanischen Modellen (vgl. Metamodell) und Simulationsalgorithmen in möglichst generische Komponenten und ihre Implementierung als Webservices auf verteilten Servern sowie deren flexible Rekombinierbarkeit durch die Orchestrierung ermöglichen die Parallelisierung von Simulationsläufen für mehrere Modellkandidaten und die Ausführbarkeit der Simulation auf beliebigen Webservern. Damit wird die Basis geschaffen, um verteilte Rechenressourcen mit hoher Kapazität, wie Cloud-Computing oder Grid-Computing für die parallele Ausführung aufwendiger numerischer Simulationen nutzen zu können. Die Simulationsergebnisse werden anhand einer Modellmetrik hinsichtlich ihrer Abweichung von den Messungen automatisch vorpriorisiert, sodass eine Reduzierung des Informationsraums als Entscheidungsgrundlage zur Identifikation des Modellkandidaten, der unter physikalischen und zeitlichen Konsistenzkriterien die höchste Qualität aufweist, möglich ist. Die Semi-Automatisierung der Datenaufbereitung, Systemidentifikation und Diagnose ermöglicht es, Maßnahmen schon dann einzuleiten, wenn noch hohe Handlungsmöglichkeiten bestehen. Die geforderte Zeitnähe ist nicht nur ein betriebswirtschaftlicher, sondern vor allem auch ein Sicherheitsaspekt, da die meisten geotechnischen Versagensmechanismen ohne sichtbare Vorankündigung erfolgen und nur durch theoretische Modellbetrachtungen vorhersagbar sind. Risiken für Bauausführende, Bauherren, Planer und für die Nachbarschaft können so erheblich reduziert werden.

1.3. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit legt die notwendigen methodischen Grundlagen zur baubegleitenden messtechnischen Überwachung mit semiautomatischer, simulationsbasierter Systemidentifikation mit dem Ziel eines adaptiven Bauverfahrens. Die Schwerpunkte der Arbeit liegen ausschließlich auf dem IKT-System, der Wissensrepräsentation, auf den Prozessabläufen und den Datenstrukturen. Auf numerische Lösungsverfahren für geotechnische Probleme wird nicht näher eingegangen. Die Beispiele aus der Geotechnik wurden bewusst einfach gehalten, da hier die Komplexität des Informationssystems im Vordergrund stehen soll.

In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen der Systemmodellierung und der modellbasierten Bauverfahrenssteuerung eingeführt und eine Kopplung der sich ergänzenden Systemsichten des Handlungs- und Objektsystems vorgenommen. Damit wird die Grundlage für die Modellierung von Boden-Bauwerks-Systemen, die sich durch den Bauprozess entwickeln gelegt. Desweiteren wird eine kurze Einführung in die Regeltechnik, insbesondere in die Regelung nach dem Modellvergleichsverfahren gegeben. Dieses Regelverfahren wird an die Anforderungen der Regelung maschineller und manueller Bauverfahren angepasst und die Rolle der Systemidentifikation bei beiden Arten von adaptiven Bauverfahren wird aufgezeigt.

Kapitel 3 geht auf das Verhalten von Böden und auf die Anforderungen zur bodenmechanischen Modellierung im Rahmen der Systemidentifikation ein. Eine Einführung in den Stand der Überwachungsmethoden im Grundbau wird gegeben. Die Beobachtungsmethode wird diskutiert, grob formalisiert und der Informationsfluss herausgearbeitet und erweitert. Ein Überblick über derzeit verfügbare Messsysteme wird gegeben und auf seine Informationslogistischen Lücken hin untersucht. Abschließend wird eine Systemidentifikationsmethode basierend auf Simulationen vorgeschlagen und im Vergleich mit schon bestehenden Methoden diskutiert.

In Kapitel 4 wird auf die Grundlagen verteilter semantischer Informationssysteme eingegangen. Zunächst werden Modellierungsmethoden der Produkt- und Prozessmodellierung diskutiert und damit die prinzipiellen Möglichkeiten zur Modellierung von Informationen im Zusammenhang mit Bauwerken und Bauprozessen aufgezeigt. Desweiteren werden fachneutral die Grundlagen der Daten-, Informations- und Wissensrepräsentation eingeführt. Es wird insbesondere gezeigt, wie die Modellierung von Beziehungen und logischen Abhängigkeiten über die reine Speicherung von Daten hinaus die Erschließung logischer Zusammenhänge von hoher Komplexität ermöglicht. Ein Einblick in die informationstechnische Umsetzung durch Semantic Web Technologien wird gegeben. Als wesentliche Voraussetzung zur Realisierung des Gesamtinformationssystems und zur Verteilung von Simulationen auf mehrere Rechner wird eine Einführung in die komponentenbasierte verteilte Softwareentwicklung gegeben.

In Kapitel 5 werden die systemtheoretischen Grundlagen des Kapitels 2, die fachspezifischen Methoden der Geotechnik, der Messtechnik und der Systemidentifikation aus Kapitel 3 und die Methoden der Informationsverarbeitung des Kapitels 4 zu einer IT-basierten Beobachtungsmethode für adaptive Bauverfahren entwickelt. Der Überwachungsprozess wird als Prozessmodell ausgearbeitet und damit die notwendigen Komponenten und die Informationsflüsse spezifiziert. Eine beschreibungslogikbasierte Wis-

sensbasis, deren Kern ein Metamodell zur integrierten Produkt-Prozessmodellierung mit Deduktionskalkül zur Wissensexplikation ist, wird eingeführt. Diese Komponente ermöglicht die Erschließung hochkomplexer transitiver Zusammenhänge und ist damit eine wesentliche Voraussetzung zur Nutzbarmachung von Messdaten. Eine logikbasierte Modellkomposition zur Integration komplexer Stoffgesetze wird eingeführt und der Prototyp der Wissensbasis wird vorgestellt. Desweiteren wird das Informationssystem auf Webservicebasis als Grundlage für die Nutzung externer Rechenressourcen konzipiert und prototypisch umgesetzt.

Die Zusammenfassung, die Diskussion der Ergebnisse und der Ausblick auf weitere Forschungsmöglichkeiten in Kapitel 6 schließen die Arbeit ab.

2. Systemmodellierung und modellbasierte Bauverfahrenssteuerung

Der wesentliche Mehrwert, der sich durch die kontinuierliche Systemidentifikation ergibt, ist die Möglichkeit auf Basis des damit verbesserten Prognosemodells das Bauverfahren gezielt so zu steuern, dass Sicherheit und Wirtschaftlichkeit jederzeit auf dem höchstmöglichen Niveau sind. Die Systemidentifikation muss dafür je nach Bauverfahren in den Steuerungs- bzw. Regelungsprozess des Bauverfahrens integriert werden.

Die System- und die Kontrolltheorie stellen die grundlegenden Methoden für die Modellierung und die Regelung von Systemen zur Verfügung. In der Literatur wird die Systemtheorie überwiegend aus einer der zwei unterschiedlichen Sichten, Objektsicht oder Prozesssicht, betrachtet. Zur Realisierung eines adaptiven Bauverfahrens werden diese beiden Sichten in dieser Arbeit kombiniert und als Grundlage für die Konzeption des integrierten Produkt-Prozess-Metamodells und des darauf aufbauenden logischen Systems zur Repräsentation des 4D-Wissens über Bauwerk, Boden und Sensornetz sowie der dazugehörigen Bau-, Überwachungs- und Analyseprozesse genutzt. Aufbauend auf der Systemtheorie wird die Kontrolltheorie als Grundlage der Steuerungstechnik für die Adaption des Bauverfahrens genutzt. Auf Basis der vorgenannten Grundlagen werden sowohl ein Regelkreis für die modellbasierte Regelung eines maschinellen Bauverfahrens als auch ein Steuerkreis für die modellbasierte Steuerung eines manuellen Bauverfahrens, jeweils mit integrierter Systemidentifikation, vorgeschlagen.

2.1. Systemtheorie

Die Modellierung der zu erstellenden und zu überwachenden Systeme ist eine wesentliche Voraussetzung zur Realisierung eines adaptiven Bauverfahrens. Die Systemtheorie liefert grundlegende Konstrukte und Strukturen, zur Systemmodellierung von Bauwerks- und Sensorsystemobjekten sowie Bau- und Überwachungsprozessen.

2.1.1. Objektsystem

Nach (Bossel, 2004) ist ein Objekt ein System, wenn (a) sich ein Systemzweck definieren lässt, (b) es aus einer bestimmten Konstellation von Systemelementen und Wirkungsverknüpfungen (Relationen, Struktur) besteht, die seine Funktionen bestimmen und (c) es durch Zerstörung seiner Systemintegrität seine Identität verliert, wenn es also nicht teilbar ist. Ein System interagiert durch seine Systemgrenze mit der Systemumgebung (Umwelt), d.h. es wird durch Einwirkungen aus der Systemumgebung beeinflusst und erzeugt seinerseits wieder Auswirkungen auf die Systemumgebung. Die Systemelemente sind durch Relationen miteinander verbunden und können ebenfalls interagieren (Abbildung 3).

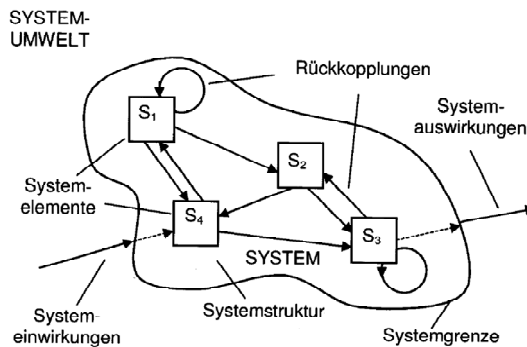


Abbildung 3: Bestandteile von Systemen nach (Bossel, 2004)

Diese insbesondere in der Signaltheorie genutzte Definition bezieht sich auf Objekte, die Systeme sein können und in denen Variablen unterschiedlicher Art interagieren und ein beobachtbares Signal (Output) erzeugen (Ljung, 1999). Ein System aus dem Bauwesen, das dieser Definition entspricht, kann jedes beliebige Tragwerk, z.B. ein Boden-Bauwerks-System wie etwa eine Baugrube mit Schlitzwandverbau, sein.

2.1.2. Handlungssystem

Darüber hinaus gibt es jedoch auch Systeme, die Prozesse darstellen. Eine Systemdefinition, die diese Möglichkeit betrachtet, ist die nach (Ropohl, 2009). Danach ist ein System eine „... Ganzheit, die (a) Beziehungen zwischen Attributen (Inputs, Outputs, Zustände etc.) aufweist, die (b) aus miteinander verknüpften Teilen bzw. Subsystemen besteht, und die (c) von ihrer Umgebung bzw. von einem Supersystem abgegrenzt wird.“ Ein System nach dieser Definition wird vollständig durch Funktion, Struktur und Hierarchie beschrieben.

Diese drei Konzepte sind in Abbildung 4 dargestellt.

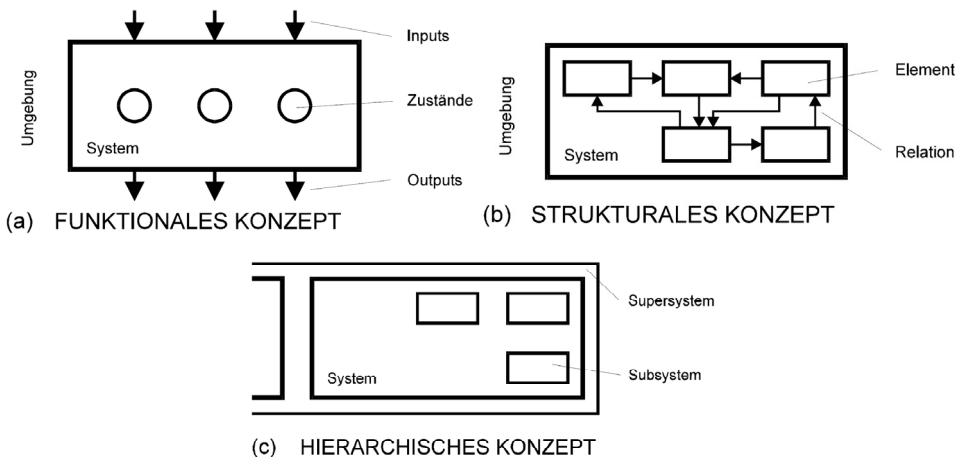


Abbildung 4: Konzepte der Systemtheorie nach (Ropohl, 2009)

Das *funktionale Konzept* basiert darauf, dass ein Input durch eine Funktion transformiert wird und der Output ein Produkt dieser Transformation ist. Dies ist ein gängiges Konzept bei der Modellierung dynamischer Systeme. Der Output-Vektor $\mathbf{y}$ ist dabei eine Funktion des Inputvektors $\mathbf{u}$, des Systemzustandsvektors $\mathbf{x}$ und des Systemparametervektors $\mathbf{p}$.

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (1)$$

Das *strukturele Konzept* bildet die Systemelemente und ihre Beziehungen untereinander ab. Es findet im Ingenieurwesen insbesondere in der Produkt- und Prozessmodellierung Anwendung.

Das *hierarchische Konzept* führt eine Strukturierung des Systems zur Dekomposition in untergeordnete Subsysteme und zur Komposition in übergeordnete Supersysteme zur Reduktion der Komplexität ein.

Diese drei Konzepte der Systemmodellierung stellen die Grundlage für die Entwicklung des Produkt-Prozess-Metamodells in Kap. 5.3.4 dar. Sie finden sich auch in diversen Modellierungssprachen, wie IDEF0 (IEEE, 1998) oder in der ARIS-Methodologie (Scheer, 2001) wieder.

Obwohl die Zielrichtungen der Systemdefinitionen von (Bossel, 2004) und (Ropohl, 2009) unterschiedlich sind, widersprechen sie sich nicht. Vielmehr ergänzen sie einander. Der wesentliche Unterschied liegt im Systemzweck. Während Bossel das System als Objekt sieht, das mit seiner Umwelt über Einwirkungen und Auswirkungen interagiert, sieht Ropohl das System als Prozess, der Inputs in Outputs transformiert. Der Begriff der Transformation ist nach (Wiener, 1963) definiert als „irgendeine Veränderung, bei der jedes Element in ein anderes übergeht.“ Ebenso geht auf Wiener die bekannte Dreiteilung, der zu transformierenden Elemente in Materie, Energie und Information zurück, die auch (Ropohl, 2009) bei der Modellierung des in Abbildung 5 schematisch dargestellten Handlungssystems als Kategorienschema für die Systemattribute nutzt und die er um die Unterscheidung der Information in Daten- und Befehlsinformation erweitert.

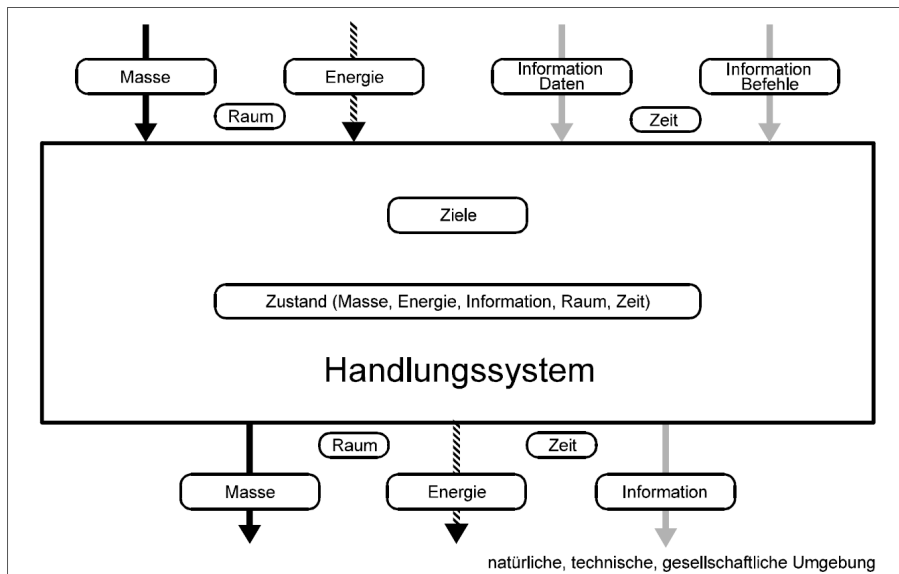


Abbildung 5: Blockschema des Handlungssystems (Ropohl, 2009)

Die Einführung dieses Klassifikationsschemas mag zunächst sehr philosophisch erscheinen. Es ist jedoch ein sehr hilfreiches Konzept bei der Umsetzung von Informationsmodellen, insbesondere bei der Zuordnung der jeweils einsetzbaren Verfahren zu material-, energie- und informationstransformierenden Aktivitäten. Die Grobstruktur eines Handlungssystems ist in Abbildung 6 gegeben.

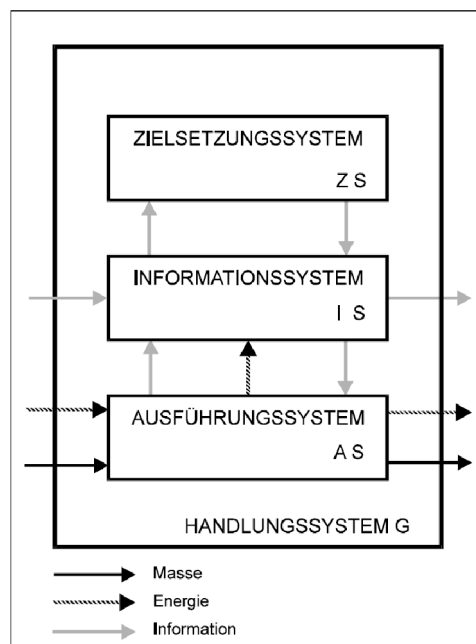


Abbildung 6: Grobstruktur eines Handlungssystems (Ropohl, 2009)

Das Handlungssystem umfasst drei Subsysteme:

- Das *Ausführungssystem AS* verarbeitet die stofflichen und energetischen Attribute, transformiert also Materie und Energie. Ein Ausführungssystem im Bauwesen kann sowohl ein System aus Personal als auch Maschinen sein. Maschinen sind hierbei ferner in manuell (durch Personal) als auch automatisch gesteuerte Maschinen zu unterscheiden.
- Das *Informationssystem IS* nimmt Informationen auf, verarbeitet sie und gibt sie als Daten- oder Befehlsinformation weiter. Dies betrifft sowohl die systeminterne Kommunikation als auch die externe Kommunikation über die Grenzen des Handlungssystems hinaus. Als Informationssysteme im Bauwesen kommen insbesondere Werkzeuge zur Projektsteuerung in Betracht, sowie das in dieser Arbeit entwickelte Informationsmanagementsystem.
- Das *Zielsetzungssystem ZS* erzeugt systemintern die Ziele des Handelns. In diesem Schema wird mit den Pfeilen angedeutet, dass Ziele nicht immer willkürlich gesetzt werden, sondern auch von Informationen abhängen, die das Handlungssystem über äußere Umgebungsbedingungen und eigene Handlungsmöglichkeiten gewonnen hat. Ein Zielsetzungssystem im Bauwesen sind üblicherweise die Vertragspartner, die die Ausführungsziele den sich ändernden Gegebenheiten und neuen Informationsständen anpassen.

2.1.3. Kopplung von Handlungs- und Objektsystem

Wie bereits weiter oben angeführt, ergänzen Objektsystem und Handlungssystem einander. Die in Abbildung 7 dargestellte Kopplung von Handlungs- und Objektsystem bildet eine wesentliche Grundlage für die holistische Modellierung von Bauwerk, Bauwerksverhalten und Bauprozess.

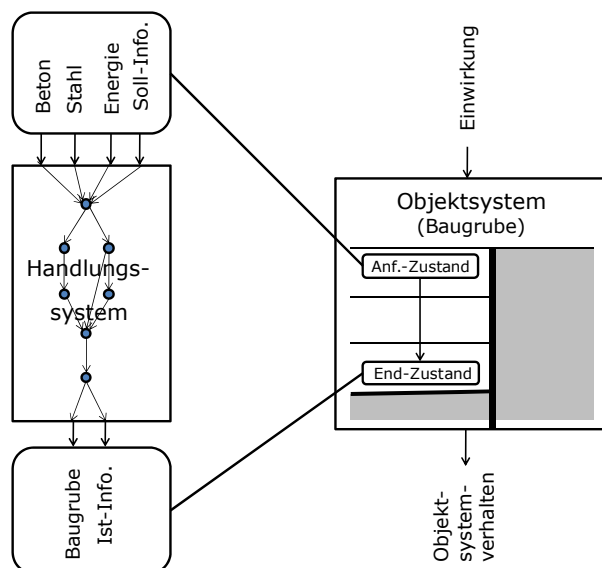


Abbildung 7: Kopplung von Handlungs- und Objektsystem

Ein Bauprozess ist ein Handlungssystem, das ein Objektsystem, also ein System aus Materie, Energie und Information von einem Anfangs- in einen Endzustand transformiert. Geht man von dem in Abbildung 7 dargestellten Beispiel aus, wäre der Anfangszustand des Objektsystems der Baugrund, ggf. mit bereits gelagerten Baumaterial, Kraftstoffen, Maschinen und Informationsressourcen (z.B. Ausführungsplanung). Durch das Handlungssystem, d.h. die miteinander in einem systematischen Zusammenhang stehenden Aktivitäten des Bauprozesses wird der Zustand des Objektsystems über die Zeit durch Aktivitäten verändert. Mit dem Zustand des Objektsystems ändert sich auch das Systemverhalten, also die Auswirkungen, die sich bei einer bestimmten Einwirkung auf das Objektsystem ergeben.

Bauen ist nichts anderes als der *Transport* und die *Transformation* von Materie (Material) und Energie. Bei steigender Komplexität der Vorhaben, sowohl aus der Sicht der Bauwerke (Objektsystem) als auch aus Sicht der Bauprozesse (Handlungssystem), steigen neben den Anforderungen an den Transport und die Transformation von Materie und Energie auch die Anforderungen an den Transport und die Transformation von *Information*.

Selbstverständlich war die Verarbeitung von Information bei der Bauausführung schon immer allgegenwärtig. Im „Kommunikationszeitalter“ können nun Art und Umfang der Datenverarbeitung auf eine neue Stufe gehoben werden, die es erlaubt, hochkomplexe Systeme, mit einem großen Grad an Nebenläufigkeit von Prozessen und der Möglichkeit der Optimierung der einzusetzenden Ressourcen zu betrachten. Die hochgradige Vernetzung von Bauaufgaben und Ressourcennutzung führt zu einem erhöhten Kommunikations- und Informationsbedarf. Der Informationsbedarf besteht hierbei nicht nur für die Koordination der Bauausführung sondern auch für die Überwachung. Information wird durch *Beobachtung* erzeugt, durch *Transport* weitergegeben (Datenaustausch) und durch *Transformation* weiterverarbeitet. Durch die Fortschritte in der elektronischen Datenverarbeitung sind dabei neben vielen neuen Möglichkeiten auch neue Problemstellungen entstanden.

Fortschritte in der konzeptuellen Modellierung, insbesondere in der maschinenlesbaren Repräsentation von Logiken und Ontologien ermöglichen eine realitätsnahe Abbildung von Bauwerken und Bauprozessen als System mit Repräsentation der Relationen zwischen den Systemelementen (Bauwerkselemente und Prozesselemente) und eröffnen damit auch eine engere Verknüpfung zwischen material-/energietransformierenden Aktivitäten und informationstransformierenden Aktivitäten.

Fortschritte bei der Realisierung verteilter Systeme, z.B. durch Serviceorientierte Architekturen oder die Grid-Technologie, ermöglichen die Integration von Analysewerkzeugen zur Ermittlung des Verhaltens von Objektsystemen.

Der ganzheitliche Ansatz der Systembetrachtung kann also durch die technologischen Innovationen der letzten Jahre aufgegriffen und umgesetzt werden. Diese Umsetzung ist insbesondere bei der Realisierung eines adaptiven Bauverfahrens von großer Wichtigkeit, da hier die Verarbeitung von Materie, Energie und Information besonders eng miteinander verknüpft ist und die notwendige zeitnahe Auswertung von aus Beobachtung entstandenen Informationen, ihr Transport, ihre Transformation und ihre Rückführung in den material-/energieverarbeitenden Bauprozess als „Befehlsinformation“ eine Notwendigkeit darstellen.

2.2. Kontrolltheorie und Regeltechnik

Die Vorgehensweise, Dateninformationen aus Beobachtungen zu transformieren und als Befehlsinformationen wieder in den Bauprozess zurückzuführen, wird in der Steuerungs- und Regeltechnik bereits alltäglich umgesetzt. Ein einfaches Beispiel ist die mittlerweile in vielen Kraftfahrzeugen eingesetzte Geschwindigkeitsregelungsanlage (Tempomat).

Die aus der Regelungstechnik hervorgegangene Kontrolltheorie beschäftigt sich als Teilgebiet der angewandten Mathematik damit, Einwirkungen $x(t)$ auf ein System so zu regeln, dass der Systemoutput $y(t)$ einen vorgegebenen Sollwert $w(t)$ erreicht. Der erzielte Istwert des Systemoutputs $y_r(t)$ wird durch Beobachtung (Messung) festgestellt und mit dem Sollwert $w(t)$ verglichen. Aus der damit festgestellten Regelabweichung $e(t)$ wird über einen Regler ein Reglersignal $u(t)$ erzeugt, das durch das Stellglied in die Stellgröße $x(t)$ transformiert und dem System als Input zugeführt wird. Die Wirkungskette einer derartigen Regelung ist in Abbildung 8 dargestellt.

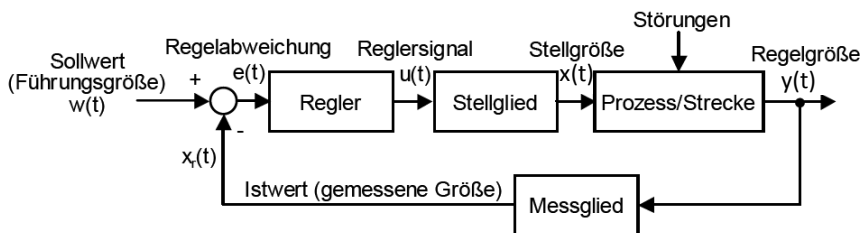


Abbildung 8: Wirkungskette einer Regelung aus (Wörn & Brinkschulte, 2009)

Darüber hinaus existieren mehrere Variationen dieser Wirkungskette (VDI/VDE 3685 B. 1., 1990), die in der Regelungstechnik des Maschinenbaus und in der Elektrotechnik Stand der Technik sind, jedoch im Bauwesen bisher nur wenig Beachtung finden. Herausgehoben werden soll hieraus das direkte, deterministische, parameteradaptive Regelsystem mit geregelter Adaption zur Minimierung des Modellfehlers e^* (Abbildung 9).

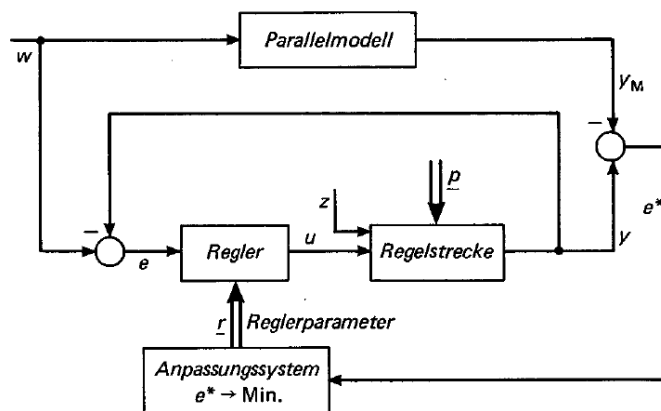


Abbildung 9: Regler nach dem Modellvergleichsverfahren (VDI/VDE 3685 B. 2., 1992)

Bei der Regelung nach diesem Modellvergleichsverfahren werden die Regelparameter durch ein Adaptionsgesetz so verändert, dass die Ausgangsgröße $y(t)$ einem Referenzmodell (Parallelmodell) angeglichen wird, welches das gewünschte Systemverhalten beschreibt (Wörn & Brinkschulte, 2009). Die Anwendung dieses Verfahrens ist auch zur automatischen Regelung maschineller Bauverfahren prinzipiell denkbar, jedoch wird nicht ein genau determiniertes Systemverhalten angestrebt, sondern eher die Einhaltung von Grenzwerten bzw. die Minimierung von Auswirkungen des Bauverfahrens auf die Systemumwelt, z.B. die Minimierung von Setzungen an der Erdoberfläche infolge eines Tunnelvortriebs. Der Einfluss von Vortriebsparametern auf oberflächennahe Setzungen beim maschinellen Tunnelbau ist nachgewiesen, die Auswirkungen des Vortriebs auf die Erdoberfläche wird auch im Vorfeld durch Simulation untersucht (Nagel, Stascheit, & Meschke, 2008). Auch die Möglichkeiten der vortriebsynchronen Prognose von Setzungen mit Neuro-Fuzzy-Systemen wurden untersucht (Nellessen, 2005). Diese Arbeiten stellen Teillösungen für eine mögliche automatische Regelung des Tunnelvortriebs dar. Ein modellbasierter Regler für den maschinellen Tunnelvortrieb kann wie in Abbildung 10 dargestellt aussehen.

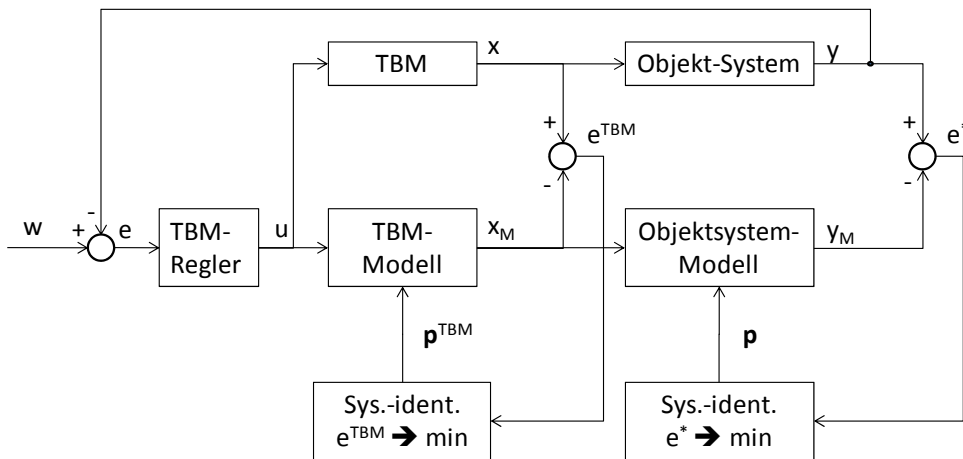


Abbildung 10: Modellbasierter Regler für eine Tunnelvortriebsmaschine

Das Referenzmodell hat hierbei jedoch nicht die Aufgabe, eine Zielvorgabe für dynamisches, zeitabhängiges Verhalten vorzugeben, sondern das Systemverhalten, das sich bei einer bestimmten Einstellung ergeben wird zu prognostizieren. Durch diese vortriebs-synchrone Prognose wird der Einfluss der Regelung der TBM auf die Regelgröße am Modell simuliert, d.h. die Ermittlung der Stellgrößen erfolgt nicht ausschließlich reaktiv auf Basis von Messgrößen. Vielmehr werden die Erfahrungen aus den Messungen genutzt, um Simulationsmodelle sowohl für die Übertragungsfunktionen der Regelung, als auch für die Übertragungsfunktion des Bodenverhaltens kontinuierlich durch Systemidentifikation zu verbessern und eine verbesserte Prognose des zu erwartenden Systemverhaltens bei einer bestimmten Stellgröße zu erzeugen. Ähnliche Verfahren werden auch bei anderen automatisierbaren Bauverfahren, wie z.B. bei der Regelung von Hebungsinjektionen, eingesetzt (Bücker, Assenmacher, Köster, & Otten, 2006). Hierzu ist auch entsprechende Software im Einsatz, wie z.B. die von der Ed. Züblin AG entwickelte

Software SOFIA, die eine semiautomatische Regelung (Datenauswertung und –visualisierung durch Software, Steuerung der Kompensationsinjektionen durch Anwender) ermöglicht (Meier & Maier, 2006)

Bei manuellen, nicht automatisierbaren, Bauverfahren, z.B. Aushub von tiefen Baugruben, ist zum Erreichen eines Zielverhaltens eine Regelung nach den oben beschriebenen Verfahren nicht möglich. Zudem kann die Steuerung manueller Bauverfahren überwiegend nicht durch die Variation der Systeminputs, sondern nur durch die Variation des Systems an sich erfolgen. Es ist zwar bekannt, dass z.B. der zeitliche Bauablauf den Spannungsverformungszustand einer Baugrube beeinflusst (Becker, 2009), jedoch ist die Regelung des Spannungsverformungszustands durch Anpassung der Aushubgeschwindigkeit praktisch kaum möglich und mit Blick auf die während der Standzeit der Baugrube maßgeblichen Bedingungen im Endaushubzustand eher von untergeordneter Bedeutung. Vielmehr kann es notwendig sein, bei einem festgestellten ungünstigen Verhalten des Verbaus zusätzliche Maßnahmen zu dessen Verstärkung, z.B. durch Verankerung, zu treffen. Dies entspricht dann jedoch nicht der Anpassung des Inputs, sondern des Systems an sich und ist daher ein erheblicher Unterschied zu den in der Kontrolltheorie behandelten Fällen. Der „Steuerungszyklus“ ergibt sich bei manueller Steuerung wie folgt:

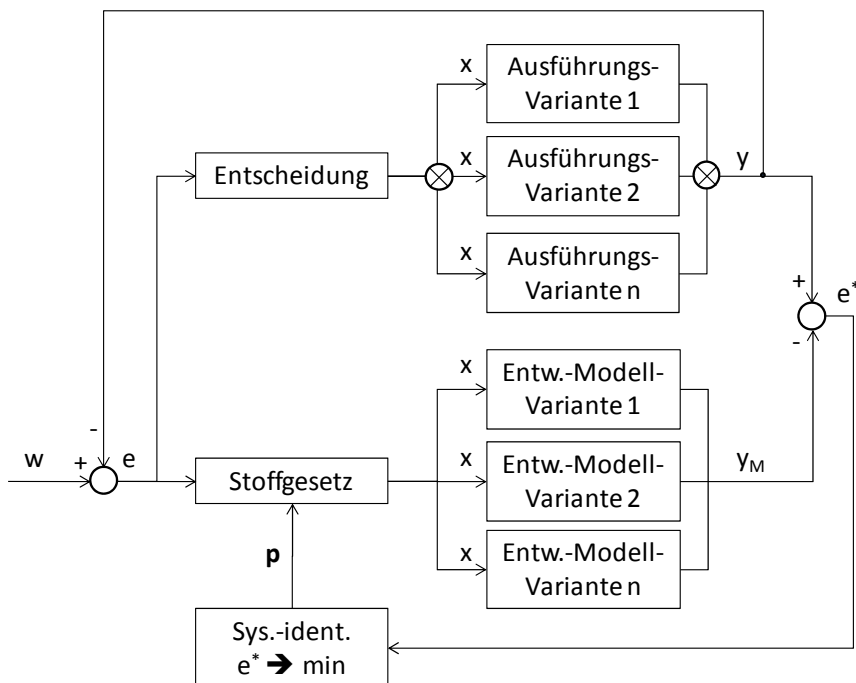


Abbildung 11: Steuerung manueller Bauverfahren

Die Ermittlung von Soll-Ist-Differenzen und die Minimierung der Abweichung zwischen Modellprognose und Sensordaten sind hierbei nicht mehr ausreichend. Das durch Systemidentifikation identifizierte Modell muss nicht nur eine gute Prognose liefern, sondern auch die Ursachen für Abweichungen erklären und daher physikalisch abgesichert

sein, da die Anpassung des Bauverfahrens durch Systemänderungen aktive Ingenieurentscheidungen erfordert, die in jedem Fall stichhaltig begründet werden müssen. Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Regelung von Bauverfahren ist, dass das entstehende Bauwerk ein zeitvariantes System darstellt, d.h. das System an sich verändert sich in Abhängigkeit der Zeit und erreicht dabei unterschiedliche Bauzustände, deren unterschiedliches Systemverhalten jeweils analysiert und bei der Steuerung des Bauverfahrens berücksichtigt werden muss.

3. Messdateninterpretation durch simulations-basierte Systemidentifikation

Dieses Kapitel gibt eine Einführung in den derzeitigen Stand der Überwachungsmethoden im Grundbau, insbesondere in die Beobachtungsmethode. Die Beobachtungsmethode wird zunächst grob formalisiert und der Informationsfluss herausgearbeitet. Es wird die Rolle der bodenmechanischen Modellierung und Prognose des Boden-Bauwerks-Verhaltens sowie die derzeitigen Anforderungen und Möglichkeiten der Aktualisierung von Prognosemodellen im Rahmen der Beobachtungsmethode dargestellt und auf ihre informationstechnischen Probleme und Lücken hin untersucht und Erweiterungen vorgeschlagen. Zwei Themenbereiche werden hinsichtlich ihres derzeitigen Entwicklungsstandes sowie der notwendigen Weiterentwicklung zur Realisierung adaptiver Bauverfahren vertieft diskutiert: (1) die Integrationsaspekte von Prognose- und Messdaten sowie (2) von Analysewerkzeugen, insbesondere aktueller Messerfassungs- und Auswertesoftware. Abschließend wird eine neue Systemidentifikationsmethode basierend auf Simulationen vorgeschlagen, die im Rahmen der Beobachtungsmethode sowie im Vergleich mit schon bestehenden Methoden diskutiert wird.

3.1. Verhalten von Böden - Geotechnische Modelle

Boden wird sowohl als Baugrund als auch als Baustoff genutzt. Für beide Verwendungszwecke sind vor der Bauausführung die Untersuchung des Bodenverhaltens, sowie die Untersuchung der Wechselwirkung des Bodens mit angrenzenden Bauwerken erforderlich. Die durch Einwirkungen auf den Boden auftretenden Effekte, insbesondere die Veränderung des Spannungsverformungszustandes sowie das volumetrische Verhalten des Bodens, sind dabei von Interesse. Die Prognose des Bodenverhaltens ist jedoch schwierig.

Zum Einen ist es schwierig, die Homogenbereiche der in der Natur vorliegenden Böden vollständig und eindeutig zu identifizieren und für jeden Homogenbereich die Stoffparameter zu bestimmen. Die durch Labor- und Feldversuche ermittelten Stoffparameter unterliegen bei einer endlichen (geringen) Anzahl an Probenahmen starken räumlichen Streuungen, was dazu führt, dass das durch die Versuche gewonnene Wissen über die Bodeneigenschaften im Allgemeinen nicht repräsentativ für den kompletten Einflussbereich der Baumaßnahme ist.

Zum Anderen kann sich ein und derselbe Boden in unzähligen Zuständen befinden (Herle & Masin, 2005). Spannung und Verformung, Porenzahl und Wassergehalt hängen in der Regel von der Be- und Entlastungsgeschichte des Bodens ab und sind damit keine zeitinvarianten Bodenkenngrößen, sondern Zustandsvariablen. Ähnliches gilt durch die nichtlinear-plastische Beziehung zwischen Spannungs- und Dehnungskomponenten auch für die Steifigkeit von Böden. Die Steifigkeit ist abhängig von der Kompression und damit vom Spannungs-Dehnungszustand. Sie ist daher für Böden kein adäquater Stoffparameter, wie dies z.B. bei Stahl bis zum Erreichen der Fließgrenze der Fall ist. Böden weisen damit auch bei gleicher stofflicher Zusammensetzung unterschiedliches, zu-

standsabhängiges Verhalten auf, wobei die Zustände jedoch häufig nicht feststellbar sind.

Die numerische Analyse von geotechnischen Bauwerken erfordert also nicht nur eine räumliche Betrachtung, sondern auch die Erfassung von zeitlichen Veränderungen vieler Zustandsgrößen (effektive Spannungen, Porenwasserdrücke, Verschiebungen, Dichte- und Sättigungsänderungen u. ä.), die für maßgebende Bauzustände und dementsprechend Rechenschritte auszuwerten sind.

Ein weiterer Faktor, der aufgrund seines erheblichen Einflusses zu berücksichtigen ist, und meist ein hohes Risiko darstellt, ist das Grundwasser. Veränderungen des Grundwasserspiegels (z.B. durch Hochwasser baustellennaher Flüsse oder durch Grundwasserabsenkung zur Wasserhaltung) erzeugen Grundwasserströmungen im Boden und verursachen Belastungen von Boden und Bauwerk. Das heißt, auch die mögliche Veränderung des Grundwasserspiegels sowie die daraus resultierenden Strömungskräfte im Baugrund sind in Prognosen zu berücksichtigen. Bei gering durchlässigen Böden bzw. schnellen Laständerungen können auch undrainierte Verhältnisse im Boden maßgebend werden, bei denen es zu einer volumenkonstanten Verformung des Bodens und einer Entwicklung von Porenwasserüber- bzw. Porenwasserunterdrücken kommt.

Die Qualität einer Prognose ist grundsätzlich stark vom gewählten Stoffgesetz abhängig, also von der Frage ob und wie ein Stoffgesetz die in der Realität auftretenden Effekte abbilden kann (Herle, 2003). In der Bodenmechanik existiert eine große Anzahl an Stoffgesetzen, die das komplexe Materialverhalten von Lockergestein beschreiben. In der Praxis werden jedoch bisher zu 90 % - 95 % einfache elastisch-ideal-plastische Stoffgesetze eingesetzt, die das Bodenverhalten stark idealisieren. Die daraus erzielten Prognoseergebnisse weichen üblicherweise von den späteren Messergebnissen ab (von Wolffersdorff, 1997). Die Entscheidung für ein einfaches idealisierendes Stoffgesetz bei der Planung wird üblicherweise mit der vor Baubeginn ohnehin schwachen Datengrundlage begründet. Für die Bemessung von Stützbauwerken und dgl. sind einfache Stoffgesetze in der überwiegenden Anzahl der Fälle auch durchaus ausreichend. Standsicherheitsprobleme ergeben sich durch entsprechende Wahl des Sicherheitsabstandes kaum. Ist jedoch eine genaue, deterministische Vorhersage des erwarteten Bodenverhaltens erforderlich, ist der Einsatz fortgeschrittener Stoffgesetze erforderlich.

Stoffgesetze wie elastoplastische Modelle mit kinematischer Verfestigung, z. B. (Manzari & Dafalissas, 1997), (Gajo & Muir Wood, 1999), (Pestana & Whittle, 1999), oder hypoplastische Modelle mit intergranularer Dehnung, z. B. (Gudehus G. , 1996), (Niemunis & Herle, 1997), (Masin, 2005) oder (Masin & Khalili, 2008) können das zustandsabhängige Bodenverhalten mit größerer Realitätsnähe wiedergeben. Sie sind jedoch mathematisch anspruchsvoll, was sich auch in ihrer numerischen Einbettung in bestehende Finite-Elemente-Software zeigt. In der Praxis werden hochwertige Stoffgesetze bisher nur für besondere Projekte eingesetzt, da die aufwendige Datenvor- bzw. -nachbereitung und die langen Rechenzeiten ihren regelmäßigen Einsatz in der Praxis nicht erlauben. Im Rahmen der Systemidentifikation ist die Nutzung realitätsnaher Stoffgesetze unbedingt erforderlich. Die Suche nach einer physikalisch begründbaren Ursache für ein bestimmtes Boden-Bauwerks-Verhalten erfordert, dass die beobachteten (gemessenen) Effekte auch durch das Modell abgebildet werden können. Ist die Berücksichtigung der physikalischen Effekte im Stoffgesetz nicht möglich, erbringt auch die

beste Annäherung der Simulationskurve an die Messdaten keinen Erkenntnisgewinn. Eine gute Übersicht über Stoffgesetze für Böden mit Diskussion der darstellbaren physikalischen Effekte ist in (Kolymbas & Herle, 2008) gegeben.

Die für diese Arbeit wesentliche Schlussfolgerung aus diesen Ausführungen ist, dass die Sicherheit des Wissens über das mögliche Verhalten eines bestimmten Baugrunds durch folgende Faktoren beeinflusst wird:

- Repräsentativität der Aufschlüsse für den gesamten Baukörper,
- Zustandsabhängigkeit der Baugrundeigenschaften,
- Realitätsnähe der eingesetzten Stoffgesetze.

Da bei jedem dieser Punkte Abstriche hingenommen werden müssen, ist bei komplexen Bauvorhaben im Rahmen der Beobachtungsmethode schon im Vorfeld der Ausführung die Untersuchung mehrerer Entwurfsvarianten erforderlich, um im Bedarfsfall unverzüglich Maßnahmen ergreifen zu können. Entwurfsvarianten beschreiben die unterschiedlichen Möglichkeiten, das Bauwerk zu gestalten. Sie unterscheiden sich insbesondere in der Konstruktion des Bauwerks und erheblich in der Menge des einzusetzenden Materials (Anzahl von Ankern, Dimensionen von Stützbauwerken, etc.). Die Frage, wie ein geotechnisches Bauwerk zu gestalten ist, ist jedoch in der Planungsphase noch nicht so einfach zu beantworten. Die Annahmen der Bodeneigenschaften und Bodenzustände sowie das daraus prognostizierte Verhalten des Baugrunds und des zu erstellenden Bauwerks sind aus den oben beschriebenen Gründen extrem unsicher. Wie das Realverhalten von Boden und Bauwerk sein wird, sieht man erst bei der Bauausführung. Diese Unsicherheiten werden durch Überdimensionierung und empirische Erfahrung ersetzt, was mit höheren Kosten verbunden ist und trotzdem in zahlreichen Fällen zu Bauschäden führt, da die entscheidenden Versagensmechanismen durch die vereinfachte numerische Analyse nicht entdeckt werden, wie z.B. bei dem tragischen Versagen einer Schlitzwand in Singapur 2004 (Katzmann, 2006).

Die Entscheidung für eine der untersuchten Entwurfsvarianten wird letztendlich so getroffen, dass die Sicherheitsnachweise (Standicherheit und Gebrauchstauglichkeit) entsprechend der geltenden Normen erfüllt und die Baukosten möglichst gering sind. Die Realitätsnähe der eingesetzten Stoffgesetze wird dabei in der Praxis nachrangig behandelt. Die Quintessenz ist: Es gibt weder eine eindeutige Lösung für den optimalen Tragwerksentwurf noch ist die eindeutige Bestimmung des Boden-Bauwerk-Verhaltens im Vorfeld der Bauausführung möglich.

Es wird also lediglich eine Menge von Thesen über

- Bodenkenngrößen
- Zustandsvariablen
- Materialgesetzen
- Entwurfsvarianten

aufgestellt, die ein Gesamtbild der Realität wiedergeben können. Dieses Gesamtbild muss jedoch in der Praxis häufig auf das einfachste Niveau reduziert werden.

Prognosen, die eine wirtschaftliche und sichere Auslegung von geotechnischen Ingenieurbauwerken ermöglichen scheitern dabei nicht am Mangel an geotechnischen Modellansätzen und entsprechenden Software-Anwendungen, sondern an der Tatsache,

dass sie praktisch mit der gängigen Ausstattung an Soft- und Hardware nicht zeitnah ausgewertet werden können. Der Einsatz verteilter Ressourcen mit einer durchgängigen Anwendungs- und Informationsintegration kann hierbei entscheidende Abhilfe schaffen.

3.2. Geotechnische Überwachungsmethoden

3.2.1. Beobachtungsmethode

Dem Umstand, dass eine Vorhersage des Baugrundverhaltens allein mit vorab durchgeführten Baugrunduntersuchungen und rechnerischen Nachweisen bei schwierigen geotechnischen Bauvorhaben nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit möglich ist, wurde auch durch die Einführung der Beobachtungsmethode in die neue DIN 1054 Rechnung getragen. Nach dieser Norm ist die Beobachtungsmethode „eine Kombination der üblichen geotechnischen Untersuchungen und Berechnungen (Prognosen) mit der laufenden messtechnischen Kontrolle des Bauwerks und des Baugrundes während dessen Herstellung und gegebenenfalls auch während dessen Nutzung, wobei kritische Situationen durch die Anwendung geeigneter technischer Maßnahmen beherrscht werden müssen.“ In Abschnitt 4.5.3 (2) fordert DIN 1054: „... bei maßgebenden Bauzuständen sind die Messergebnisse und die Ergebnisse der rechnerischen Prognose miteinander zu vergleichen. Dabei ist zu überprüfen, inwieweit die in der Prognose verwendeten geometrischen Vorgaben, Bodenkenngößen und sonstige Berechnungsannahmen noch zutreffen. Ergeben sich aufgrund der während des Baufortschritts erlangten Erkenntnisse über das Bauwerk, den Baugrund sowie über die hydrogeologischen Verhältnisse Abweichungen von den ursprünglichen Annahmen, dann ist die rechnerische Prognose zu überarbeiten. Die jeweils neuesten Berechnungen sind als Prognose für die weitere Beurteilung zu verwenden.“ DIN 1054 fordert im Falle eines unerwartet ungünstigen Verhaltens Gegenmaßnahmen einzuleiten. Desweiteren lässt sie aber auch die Optimierung der Bemessung und des weiteren Bauablaufs zu, wenn sich günstigere Verhältnisse als erwartet anzeigen.

Die Beobachtungsmethode geht auf Terzaghi und Peck zurück (Peck, 1969). Peck sieht in den Ergebnissen von Berechnungen nicht mehr als Arbeitshypothesen, die sich während des Bauens entweder bestätigen oder die zu modifizieren sind. Die Entwicklung von Stoffgesetzen, die die tatsächlich auftretenden Effekte besser berücksichtigen, ermöglicht mittlerweile zwar auch bessere Prognosen, dennoch ist die Kernaussage von Peck nach wie vor richtig und die Beobachtungsmethode als Ergänzung zu Entwurfsberechnungen ein erheblicher Sicherheitsfaktor. Peck weist ebenfalls darauf hin, dass die Beobachtungsmethode nur dann genutzt werden sollte, wenn bereits im Vorfeld für jede ungünstige Situation, die durch die Beobachtungen festgestellt wird, Reaktionspläne ausgearbeitet wurden. Auch, wenn dies vielleicht nicht im Einzelnen für jedes mögliche Ereignis realisierbar sein sollte, ist der Gedanke von Maßnahmenplänen grundsätzlich richtig und wurde auch in DIN 1054, 4.5.2 (1) übernommen.

Die Anwendung der Beobachtungsmethode bietet einige Vorteile. Sie ermöglicht es während der Bauphase (Dunnicliff, 1988)

- die Sicherheit des Bauwerks zu gewährleisten,
- Baukosten zu verringern,
- Bauverfahren und -termine zu überwachen und ggf. anzupassen,
- rechtlich relevante Daten den Bau und die angrenzende Bebauung betreffend zu dokumentieren,
- den Kenntnisstand bezüglich des Baugrundverhaltens zu erweitern.

Neben ihrem Einsatz als fester Bestandteil des Sicherheitskonzeptes dient die Beobachtungsmethode zudem der Qualitätssicherung und der Beweissicherung (Arslan, Quick, Moormann, & Reul, 1999). (Katzenbach & Bachmann, 2006) berichten beispielsweise vom Einsatz von Messungen zur Systemoptimierung bei der Ankerherstellung bei einer tiefen Baugrube, indem durch permanente Überwachung der angrenzenden Bebauung mit einem digitalen Lasernivellier die Wartezeiten zwischen Bohr- und Spannvorgängen und auch zwischen den Verpressvorgängen durch Nutzung der Messdaten so gesteuert wurden, dass eine Schadensprävention sichergestellt werden konnte.

Der Informationsfluss der Beobachtungsmethode, wie sie bisher in der Praxis überwiegend ausgeführt wird, ist in (Abbildung 12) dargestellt:

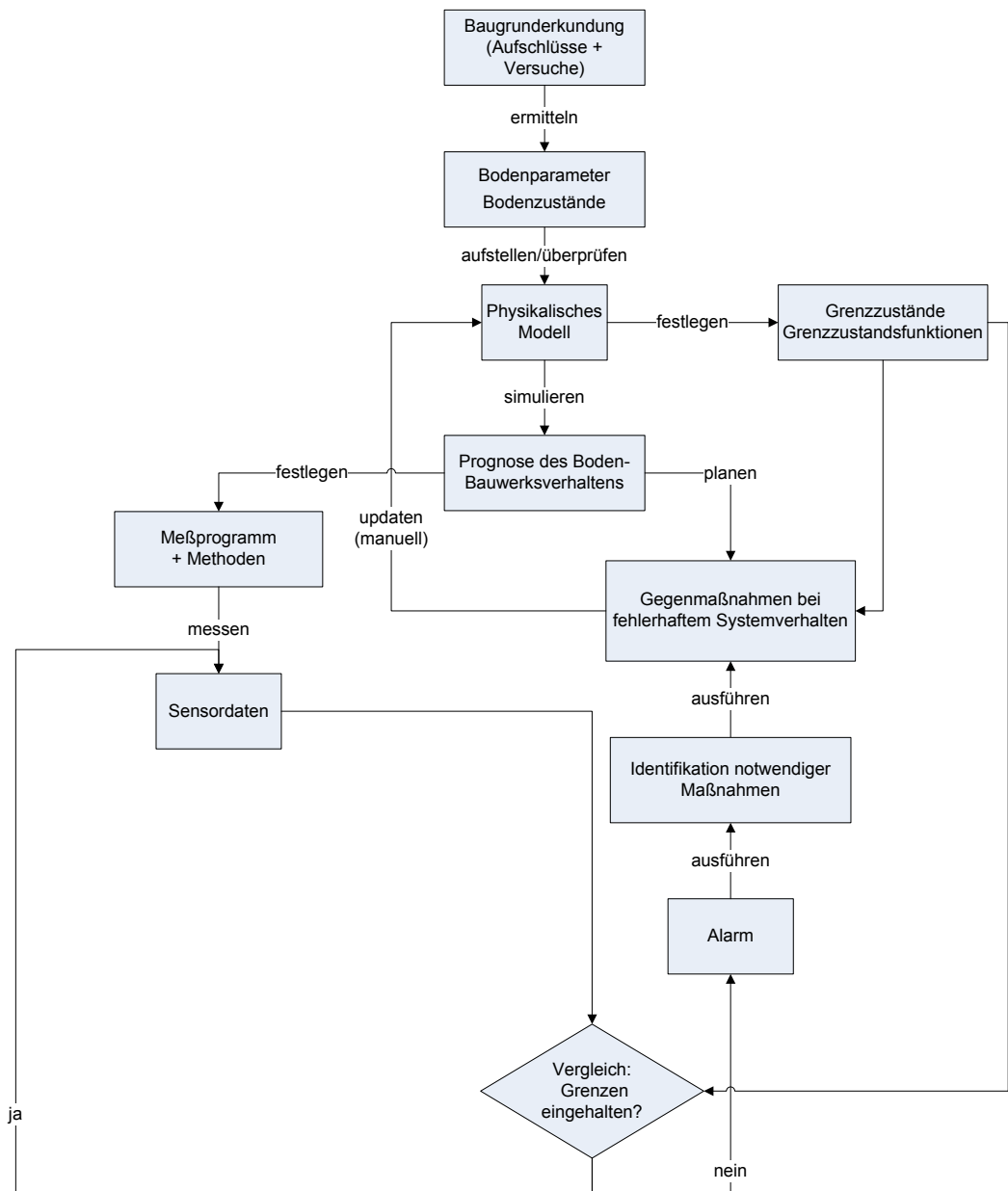


Abbildung 12: Informationsfluss der Beobachtungsmethode nach derzeitigem Praxisstand

Bei der Beobachtungsmethode in Abbildung 12 soll insbesondere das reale Boden-Bauwerk-Verhalten durch Beobachtung festgestellt werden. Dieser Prozess beginnt schon vor der Erstellung des Bauentwurfs mit der Baugrunderkundung. Durch Labor- und Feldversuche werden Art, Zustand und Kennwerte von Böden festgestellt, um auf

dieser Basis physikalische Modelle zur Erfassung des Bodenverhaltens aufzustellen und Prognosen des Boden-Bauwerk-Verhaltens durchzuführen.

Auf Basis dieser Prognosen ist bereits in der Planungsphase eines Projektes ein geeignetes, auf die projektspezifischen Anforderungen und die einzelnen Bauphasen abgestimmtes Messprogramm zu entwerfen, das detaillierte Informationen bezüglich der folgenden Angaben enthalten soll (Arslan, Zimmer, Quick, & Meissner, 2006):

- Art, Anzahl und Anordnung der einzusetzenden Messgeber,
- Anforderungen und Spezifikationen (Messbereich, Auflösung etc.) bezüglich der einzusetzenden Messgeber,
- Spezifikation einer an den Bauablauf gekoppelten Messabfolge,
- Nennung von Kontroll- und Grenzwerten, bei deren Überschreiten ergänzende Messungen oder konstruktive Gegenmaßnahmen zu ergreifen sind.

Messpunkte und Messzeitpunkte können nur dann gezielt gesetzt werden, wenn zuvor das Systemverhalten prognostiziert wird. Ebenfalls auf Basis der Prognose des Boden-Bauwerk-Verhaltens werden Gegenmaßnahmen bei fehlerhaftem Systemverhalten festgelegt. Das „fehlerhafte Systemverhalten“ wird dabei durch Grenzzustände (Toleranzgrenzen, Grenzzustandsfunktionen) auf der Grundlage des physikalischen Modells festgelegt.

Die bei der Durchführung des Messprogramms gewonnenen Messergebnisse werden bisher herangezogen, um sie mit den zuvor festgelegten Grenzwerten zu vergleichen, und bei Bedarf einen Alarmzustand auszulösen, notwendige Maßnahmen zu identifizieren und die vordefinierten Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Der Einsatz der Beobachtungsmethode wird in Expertenkreisen unterschiedlich bewertet. Die Befürworter sehen z.B. insbesondere bei tiefen Baugruben im innerstädtischen Bereich mit komplexer Wechselwirkung zwischen Baugrubensicherung, Baugrund und Nachbarbebauung eine zwingende Voraussetzung für die Anwendung der Beobachtungsmethode, deren Verzicht gegen die allgemein anerkannten Regeln der Technik verstoßen würde (Katzenbach & Bachmann, 2006). Die messtechnische Begleitung nach den Prinzipien der Beobachtungsmethode wird als fester Bestandteil des Sicherheitskonzeptes gesehen (Arslan, Quick, Moormann, & Reul, 1999). Neben der Gewährleistung von Sicherheitsaspekten ist die Einsparung von Zeit und Ressourcen ein weiterer Grund für den Einsatz der Beobachtungsmethode. Die Beobachtungsmethode mit fortschrittssynchroner Anpassung von Bauverfahren wurde bereits bei mehreren Projekten, z.B. bei der Tunnelunterfahrung von Mansion House in London oder der Herstellung des Cut-and-Cover Tunnels Limehouse Link erfolgreich eingesetzt (Powderham, 2002). Insbesondere wurde dabei die endgültige Entscheidung über bereits geplante Sicherheitsmaßnahmen vom tatsächlichen Systemverhalten beim Bau abhängig gemacht. Desweiteren konnte der Baufortschritt beschleunigt werden.

Gleichwohl gibt es auch kritische Sichtweisen auf die Beobachtungsmethode. (Gudehus G., 2004) legt dar, dass die Beobachtungsmethode in der neuen DIN 1054 „keineswegs ein Allheilmittel“ ist und bezieht sich dabei auf ihre Anwendungsgrenzen. Insbesondere ist hierbei die geforderte Duktilität des Gesamtsystems beim Nachweis des Grenzzustands des Versagens von Bauwerken und Bauteilen und des Grenzzustands des Verlustes der Gesamtstandsicherheit zu nennen. Damit ist die Beobachtungsmethode gemäß

DIN 1054, 4.5.1 (3) als Sicherheitsnachweis nicht ausreichend, wenn das Versagen vorab nicht erkennbar ist, bzw. sich nicht rechtzeitig ankündigt. Es sollte angemerkt werden, dass sich die Kritik Gudehus nicht gegen die Beobachtungsmethode an sich richtet, sondern gegen ihre Anwendung zum Nachweis der Standsicherheit. Die Anwendung zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit sowie als ergänzende Maßnahme zur Sicherstellung der Standsicherheit in Kombination mit validierten Prognosemethoden bleibt hiervon unberührt.

So schlägt (Gudehus G. , 2004) in Anlehnung an (Peck, 1969) folgende Beobachtungsmethode mit Prognosen auf Basis des hypoplastischen Stoffgesetzes vor:

- (a) Erkundung von Stoffbestand und –zustand des Baugrunds, ggf. auch der Bauteile und Bauwerke in und an ihm, und vereinfachte Darstellung derselben
- (b) Abschätzung geologisch – und ggf. bautechnisch – bedingter möglicher Abweichungen von (a)
- (c) Ausarbeitung eines Entwurfs mit (a) für zu erwartende Einwirkungen und Versagensmechanismen
- (d) Auswahl relevanter Beobachtungsgrößen, Festlegung zugehöriger Toleranzgrenzen und Prognose der Messgrößen
- (e) Prognose der Größen nach (d) für Szenarios gemäß (b) und (c)
- (f) Vorbereitung modifizierter Bauweisen sowie ergänzender Erkundungen und Messungen für Überschreitungen gemäß (d) und (e)
- (g) Messung der Größen nach (d) und Aktualisierung der Prognosen gemäß (e) und (f)
- (h) Anpassung von Entwurf und Baudurchführung gemäß (g).

Bei der Umsetzung der Beobachtungsmethode in der Praxis sind jedoch insbesondere bei den Punkten (g) und (h) die Möglichkeiten eingeschränkt. Dies liegt insbesondere an der fehlenden IT-Unterstützung bei der Anpassung der geotechnischen Modelle zur Überarbeitung der rechnerischen Prognose.

Der derzeitige Stand der Beobachtungsmethode wird in dieser Arbeit um einen IKT-basierten Ansatz ergänzt, der eine kontinuierliche Systemidentifikation mit semiautomatischer Aktualisierung des physikalischen Modells und des Entwurfs, die Aktualisierung der Prognoseberechnungen und die Anpassung des Messprogramms ermöglicht (Abbildung 13). Diese Erweiterung bedeutet eine wesentlich verbesserte, intensivere Nutzung von Messdaten. Messdaten werden damit herangezogen, um das der Prognose zugrundeliegende Modell zu verifizieren und gegebenenfalls durch Kalibrierung zu aktualisieren, sodass eine genauere Prognose des Systemverhaltens, insbesondere für die Vorhersage noch auszuführender Bauphasen, erstellt werden kann. Ergibt der Vergleich der Messergebnisse mit den Prognosedaten eine signifikante Abweichung, werden durch Systemidentifikation verbesserte Bodenparameter ermittelt und eine Neusimulation des Boden-Bauwerk-Verhaltens durchgeführt. Eine aktualisierte Prognose kann neben dem direkten Eingriff in das Bauverfahren (Änderungen am Bauwerk) mitunter zur Modifizierung des Sensornetzes (z.B. Anpassung der Platzierung von Sensoren entsprechend der tatsächlich auftretenden Effekte) genutzt werden.

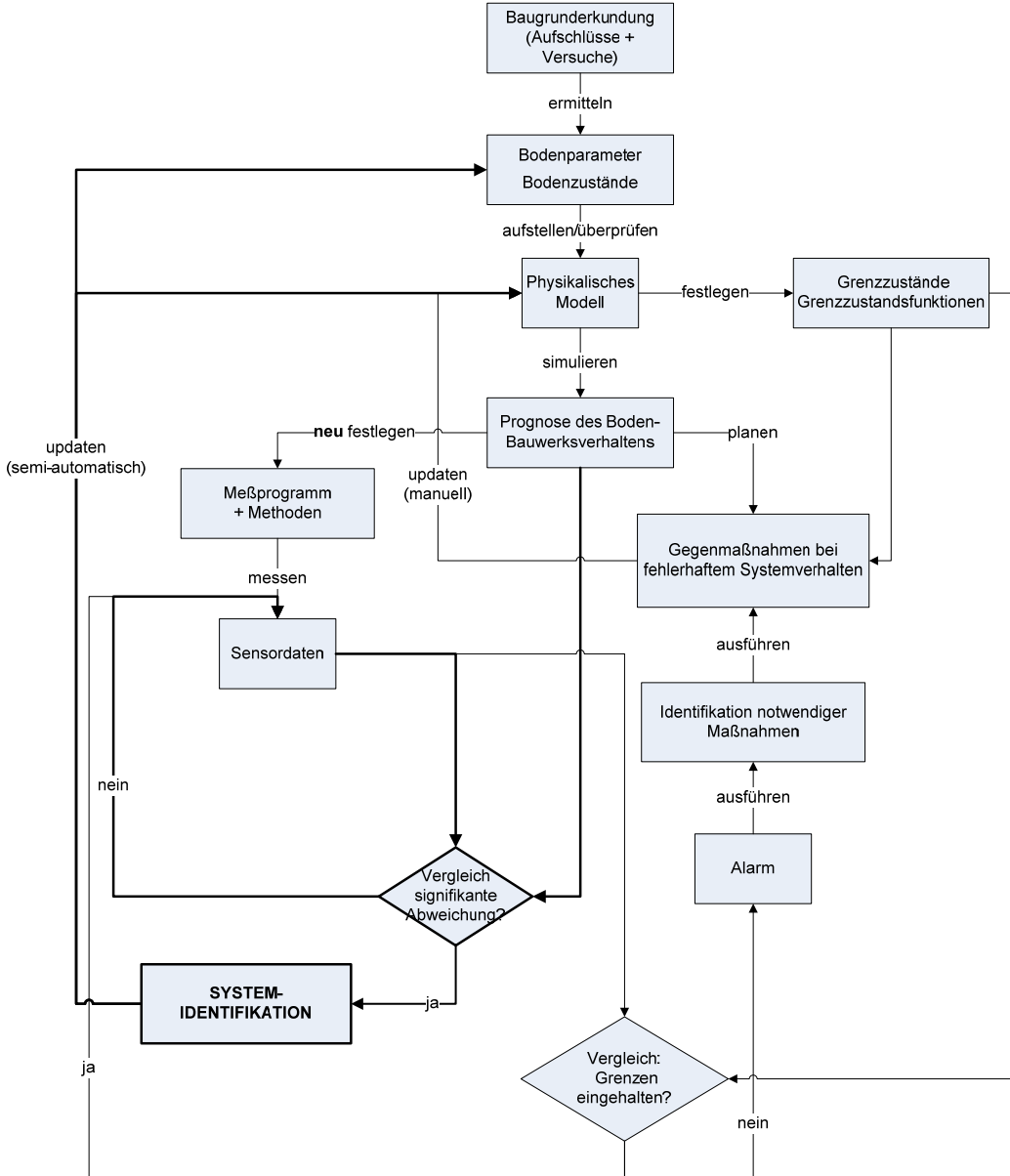


Abbildung 13: Informationsfluss der Beobachtungsmethode nach Abbildung 12, erweitert um Systemidentifikation (fett)

Mit dieser Ausweitung der Messdatennutzung werden Anforderungen erfüllt, die in der geotechnischen Praxis schon seit einiger Zeit gestellt werden. (Katzenbach & Waberseck, 2003) weisen z.B. darauf hin, dass gerade im Tunnelbau die Tatsache, dass zwar Messungen vorliegen, aber nicht konsequent ingenieurtechnisch ausgewertet und bewertet werden, ein immer wiederkehrendes Problem darstellt. Die Reaktionszeiten bei der bisher überwiegend manuellen Arbeitsweise zur ingenieurmäßigen Interpretation

der Messdaten sind zu lang, um die Forderungen der Beobachtungsmethoden laut Norm in der Praxis tatsächlich erfüllen zu können.

Insbesondere bei der Überwachung während der Bauausführung, die ja bei der Beobachtungsmethode naturgemäß gegeben ist, ist die Erfassung, Auswertung und Interpretation der Daten stark mit dem Bauablauf verknüpft. Die Durchführung der Beobachtungsmethode, die nur mit baubegleitender Systemidentifikation und Prognose auf der Basis physikalisch begründbarer Modelle einen Sinn ergibt, stellt daher hohe Anforderungen an die Informationslogistik, das Informationsmanagement und an die Rechenleistung.

Da die informationsverarbeitenden Aufgaben der Bauwerksüberwachung eng mit der Bauausführung verknüpft und logisch in den Gesamtprozess integriert sind, ist es auch bei der informationstechnischen Unterstützung sinnvoll, die komplexe Interaktion zwischen Bauen und Überwachen in Modellen abzubilden. Dies gilt umso mehr, wenn, wie im Fall der Beobachtungsmethode, Bauwerke während der Bauausführung beobachtet werden, da hier die Messungen selbstverständlich unter Berücksichtigung des sich verändernden Bauzustands interpretiert werden müssen. Bei dieser Interpretation ist eine hohe Anzahl von Modellkandidaten mit Variation der Stoffgesetze und der Stoffparameter zu untersuchen, die ebenso wie die Messdaten dokumentiert und verwaltet werden müssen. Diese Modellkandidaten in den Kontext der Herkunft und Bedeutung der Daten zu stellen, ist unbedingt erforderlich, um auch bei großen Datenmengen und komplexen Prozessen die Zuordenbarkeit zwischen Mess- und Prognosedaten und damit deren Handhabbarkeit zu gewährleisten.

Es ist unschwer erkennbar, dass das Problem der Informationsverarbeitung bei vollständiger Umsetzung der Beobachtungsmethode sehr komplex werden kann. Dies gilt umso mehr, da jedes Bauwerk – besonders im Grundbau – ein Unikat ist und die dazugehörigen Bauabläufe damit sehr spezifisch und komplex sein können. Dass die, wenigstens teilweise, Automatisierung der Bauwerksüberwachung eine erhebliche Effizienzsteigerung bringt, ist unbestritten. Die damit verbundenen Anforderungen an das Daten- und Informationsmanagement haben (Bolle & Berndt, 2003) im Rahmen der Langzeitüberwachung diskutiert. Sie stellen als Ergebnis die Notwendigkeit eines objektspezifischen Analyseprogramms heraus, das „je nach Zielstellung aus einem modularen System von Softwareelementen zur Datenverknüpfung, Datenanalyse, Signalverarbeitung, Grenzwertüberwachung usw. zusammengestellt werden kann.“

3.2.2. Messsysteme

Die messtechnischen Möglichkeiten zur Bauwerksüberwachung sind mittlerweile auf einem fortschrittlichen Stand. Auch die Dauerbeobachtung durch Sensoren ist heute technisch für viele Messgrößen gegeben. Es ist davon auszugehen, dass sowohl Umfang als auch Einsatzhäufigkeit der Instrumentierung komplexer Ingenieursysteme zur baubegleitenden Überwachung künftig zunehmen werden. Insbesondere die Realisierung einer simulationsbasierten Systemidentifikation erfordert eine hohe Anzahl von Messpunkten. Damit nehmen auch die Anforderungen an die Verwertung von Monitoringdaten eine noch größere Dimension an.

Im Grundbau kommen zur Überwachung sowohl geodätische Messmethoden als auch geotechnische Messungen sowie Labor- und Feldversuche zum Einsatz. Die Wahl der Messmethode hängt von der anvisierten Messgröße, dem Messort sowie von wirtschaftlichen Überlegungen ab. Die derzeit überwiegend verfügbaren Messinstrumente wurden im Rahmen dieser Arbeit aus dem aktuellen Angebot der Messgerätehersteller recherchiert. Sie sind in Abhängigkeit des Messortes und der zu erfassenden Messgrößen in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Messgeräte in Abhängigkeit von Messgröße und Messort

	Baugrund		Tragteile
	Oberfläche	Boden	
Verschiebungen	Digitale Nivelliergeräte Theodolite	Bohrlochinklinometer Stangenextensometer	Digitale Nivelliergeräte Theodolite Extensometer
Setzungen	Digitale Nivelliergeräte Theodolite Schlauchwaage Drucksensoren	Magnetsetzungslot Mechanisches Setzungslot Relativdruckaufnehmer Hydrostatisches Setzungsmesssystem Extensometer	Digitale Nivelliergeräte Theodolite Schlauchwaage Extensometer
Distanzen	Elektronische Distanzmessung Messband Invardraht (Distometer)		Elektronische Distanzmessung Messband Invardraht (Distometer) Riss-, Fugenmessgerät
Dehnung		Extensometer Messanker Dehnmessstreifen (DMS) Schwingsaitenverfahren Induktive Wegaufnehmer	Extensometer Messanker Stahldehnungsaufnehmer Dehnmessstreifen (DMS) Schwingsaitenverfahren Induktive Wegaufnehmer Fissurmeter
Neigungs- änderung	Digitale Nivelliergeräte Theodolite Schlauchwaage Hydrostat. Setzungsmesssystem	Fest installierte Bohrlochinklinometer Portable Bohrlochinklinometer Pendel	Gebäudeinklinometer
Spannung		Erddruckgeber	Kraftmessgeber
Porenwasser- spannung		Elektrische Porenwasserdruckgeber Pneumatische Porenwasserdruckgeber	

Prinzipiell basieren alle hier aufgeführten Messinstrumente auf den Messprinzipien Distanz- oder Druckmessungen. Diese Größen werden auf der Basis physikalischer Zusammenhänge in die jeweiligen Zielmessgrößen transformiert.

Wesentlich für die Anwendung von Messgrößen zur Systemidentifikation ist die Konfidenz der Messungen, wobei grundsätzlich die Aussage getroffen werden kann, dass Messungen am Bauwerk zuverlässiger sind, als Messungen im Boden. Desweiteren ist

die Konfidenz von Distanzmessungen in der Regel höher einzuschätzen, als die Konfidenz von Messungen, die auf dem Prinzip der Druckmessung basieren.

Neben der Qualität der Messwerte ist der Arbeitsaufwand bei der Messwerterfassung ein wesentlicher Faktor bei der Realisierung der kontinuierlichen Systemidentifikation. In der Praxis stehen bereits Messsysteme zur Verfügung, die teilweise sogar automatische Messungen und eine zentrale Datenverwaltung ermöglichen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Produktpalette der folgenden internationalen Messsystemhersteller untersucht.

- GeoKon, USA
- Glöttl, Deutschland
- Interfels, Deutschland
- Marton Geotechnical Services (MGS), UK
- RST Instruments Ltd., Canada
- Sisgeo, Italien
- Slope Indicator, USA

Diese Hersteller bieten neben anderen die in Tabelle 1 genannte Palette von Messgeräten an. Desweiteren hat jeder dieser Messgerätehersteller Softwareprodukte zur Verarbeitung der Messdaten im Angebot.

Jedes dieser Softwareprodukte bietet die Möglichkeit,

- Daten aus den Sensoren auszulesen,
- die Daten in einer zentralen SQL-Datenbank abzuspeichern,
- mehrere Schwellwerte für Alarmniveaus festzulegen,
- die Messdaten mit diesen Schwellwerten zu vergleichen,
- Messdaten grafisch zu repräsentieren sowie
- Bilder mit abzuspeichern und bestimmten Datensätzen zuzuordnen.

In nachfolgender Abbildung 14 ist als Beispiel die Softwarearchitektur der Auswertesoftware GLA des deutschen Herstellers Glötzl gegeben, die im Wesentlichen repräsentativ für die Software aller Hersteller ist.

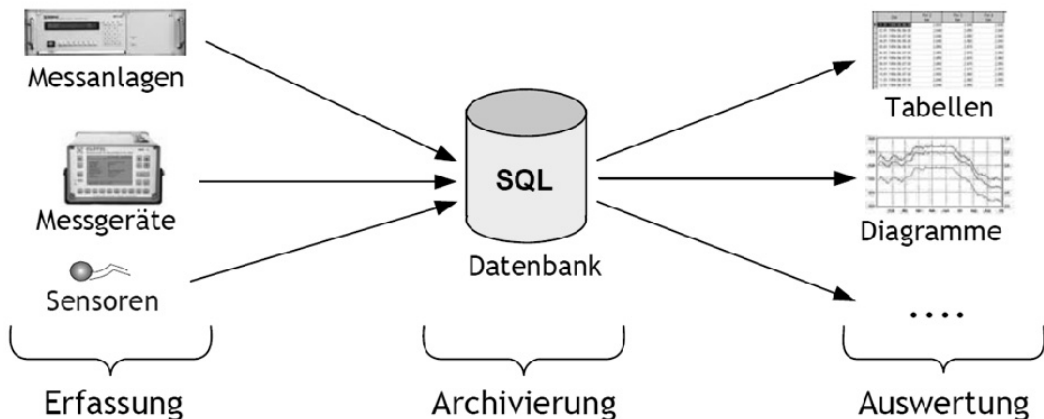
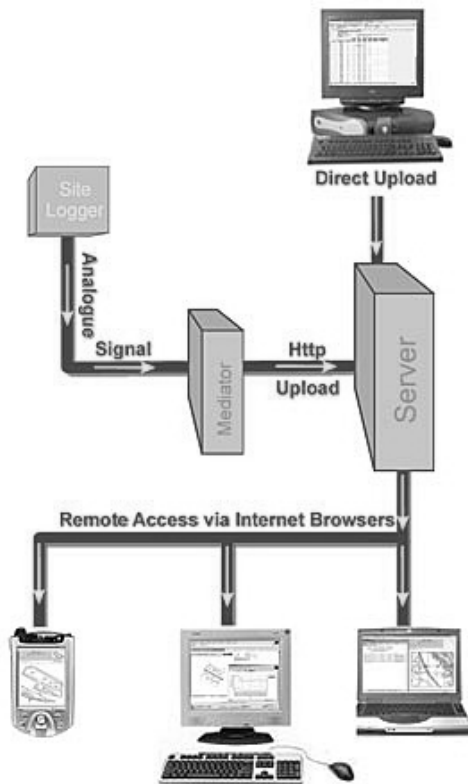


Abbildung 14: Architektur der Auswertesoftware GLA (Glötzl, 2010)

Zentrales Element ist eine relationale Datenbank, die die durch Messanlagen, Messgeräte und Sensoren erfassten Daten archiviert. Auswertungsmodule dienen der Messwertkorrektur, statistischen Auswertung und letztlich der Repräsentation der Daten in Tabellen- und Diagrammform.

Der aktuelle Stand der Technik ermöglicht überwiegend verwaltungstechnische Funktionen zur Organisation der Datenhaltung und zur Kommunikation mit aktiven und passiven Messanlagen, sowie deren Programmierung und Steuerung. Daten werden von Messanlagen, Messgeräten und Sensoren erfasst, in relationalen Datenbanken gespeichert. Die Datenbanken ermöglichen eine hierarchische Strukturierung nach Projekten, Messanlagen, Messstellen usw. Die Daten können anhand von SQL-Abfragen zusammengestellt, ausgewertet und tabellarisch und/oder grafisch dargestellt werden.

Unter „Auswertung“ der Daten wird beim gegenwärtigen Stand der Technik hauptsächlich die Durchführung einfacher Transformationsfunktionen, Fehlerkorrektur sowie die organisierte Darstellung der Daten verstanden. Auch der Vergleich mit zuvor definierten Schwellwerten und das Auslösen von Alarmfunktionen sind möglich. Dies entspricht auch dem Stand der Beobachtungsmethode in Abbildung 12, Kap. 3.2.1. Einige Hersteller, wie z.B. die Firma MGS bieten sogar bereits webbasierte Auswertesoftware an, vgl. Abbildung 15.



**Abbildung 15: GeoSense Viewer Web-based Software
(Marton Geotechnical Services Ltd, 2009)**

Die Daten werden sowohl bei automatischer Messwerterfassung als auch bei manuellen Messverfahren direkt auf einen Webserver hochgeladen und können dort mit den oben beschriebenen Funktionalitäten direkt verarbeitet werden. Die Bedienung erfolgt dabei über einen Internetbrowser.

Die neuen Möglichkeiten, die sich aus diesen Fortschritten in der Sensortechnologie und der Messwerterfassung ergeben und die durch jüngste Schadensereignisse gestiegenen Anforderungen an die Überwachung führen zu erheblichen Datenmengen, die mit den derzeit zur Verfügung stehenden Analyse-Softwaresystemen nicht mehr vollständig auswertbar sind.

Die Automatisierung von der Messung bis hin zur Darstellung korrigierter Daten ist zwar schon ein erheblicher Fortschritt im Vergleich zur manuellen Messung und Datenerfassung, jedoch ist er für eine zeitnahe und umfängliche Nutzung der Daten zur Bauwerksüberwachung und insbesondere für die Realisierung eines adaptiven Bauverfahrens im Sinne der Beobachtungsmethode, wie sie eigentlich gedacht ist, nicht ausreichend.

Um eine hinreichende Entscheidungsgrundlage für die Regelung des Bauverfahrens, bzw. für die Änderung des Entwurfs während der Bauausführung zu haben, müssen die Messdaten anhand nachvollziehbarer Methoden durch Berechnung mit physikalischen Modellen interpretiert und zur Stellung einer Systemdiagnose genutzt werden. Erst auf der Basis einer Ursachen-Diagnose von Soll-Ist-Differenzen ist es möglich, Varianten möglicher Korrektur-Maßnahmen zu untersuchen und sich für eine Änderung des Bauwerksentwurfs oder ggf. des Bauverfahrens zu entscheiden.

Die direkte Verknüpfung der Messdaten mit der modellbasierten ingenieurmäßigen Prognose und die damit mögliche Diagnose der Ursachen für Fehlverhalten sowie eine entsprechende Einwirkung auf das Bauverfahren werden durch bisher verfügbare Monitoringsoftware nicht unterstützt. Die Gegenüberstellung der Messergebnisse mit dem geotechnischen Ingenieurmodell erfolgt in den sehr wenigen Ausnahmefällen, wo sie angewandt wird, manuell und ist mit einem sehr hohen Aufwand an hoch qualifizierter Arbeitskraft für die Aufbereitung von Daten sowie die Erstellung und Anpassung von Modellen verbunden. Bei den erheblichen Datenmengen bleibt damit nur wenig Zeit für die eigentliche Analyse übrig. Die Daten können manuell nur selektiv ausgewertet werden und die Anpassung des bodenmechanischen Modells an die Realsituation muss sich dabei auf sehr wenige Einzelfälle beschränken.

Eine Verbesserung dieser Situation erfordert klar definierte Schnittstellen zwischen dem geotechnischen Ingenieurmodell und den Messsystemen, sowie die Möglichkeit einer projektabhängigen, flexiblen Definition der Informationslogistik, die den Vergleich der Messdaten mit den Berechnungswerten erleichtern und damit den Weg zur Automatisierung der Überwachungsaufgabe öffnen würde. Die bestehenden Analysesysteme sind stark auf ihre zum Teil sehr speziellen Anwendungsfälle beschränkt und erlauben kaum flexible Anpassungen geschweige denn die Nutzung verteilter Softwareressourcen und Rechenkapazitäten. Es fehlt ein Gesamtsystem, das durch geringen Konfigurationsaufwand an jedes Projekt flexibel anpassbar ist und den automatischen Informationsfluss vom Sensor, über Services zur Datenauswertung bis hin zur Adaption des Bauverfahrens unterstützt und dabei den Ingenieur angemessen in die Entscheidungsprozesse mit einbezieht. Der Prozess, erfasste Daten zu interpretieren, eine Ursachen-Diagnose durchzuführen und Adaptionalternativen des Bauverfahrens zu untersuchen, zu entscheiden und umzusetzen erfordert also eine direkte prozessgesteuerte Verknüpfung von Überwachung und Prognose.

Neben den Entwicklungen in der Messpraxis gibt es auch wissenschaftliche Arbeiten, die verschiedene Aspekte der Bauwerksüberwachung behandeln. (Akinci & al., 2006) entwickelten ein Framework zur Qualitätskontrolle bei der Bauausführung, mit dem Ziel, den Ist-Zustand des ausgeführten Bauwerks mit dem im Bauwerksmodell definierten Sollzustand zu vergleichen. Der Einsatz der Überwachung erfolgt hier mit dem Ziel der Informationserhebung für die Bauabnahme. Insbesondere wurde in diesem Framework die Einhaltung geometrischer Toleranzen durch Laserscanner anvisiert, sowie Rückschlüsse auf die Betongüte aus Temperaturüberwachung gezogen. Das Framework ist in Abbildung 16 wiedergegeben.

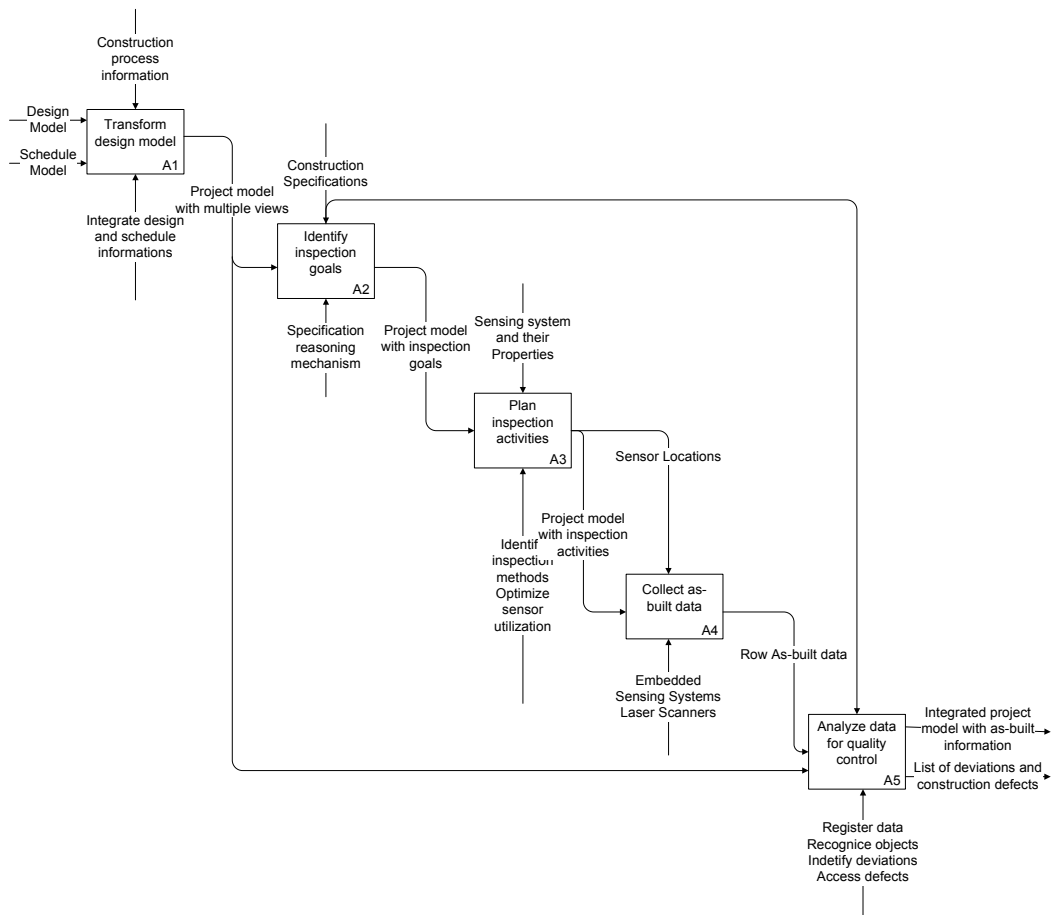


Abbildung 16: Sensorbasiertes Qualitätsüberwachungs-Framework nach (Akinci & al., 2006)

(Gordon, Akinci, & Garrett, 2008) entwickelten im Rahmen dieser Methode einen Ansatz zur automatisierten Planung von Inspektionszielen und Inspektionsplänen. Der Ansatz basiert auf der Repräsentation von Klassifikationen verschiedener Messmethoden und deren Zuordnung zu Bauwerkselementen sowie auf der Nutzung von Inferenzmechanismen und ermöglicht die Ableitung detaillierter Inspektionspläne auf der Basis grober Vorgaben.

Inspektionsziele, deren Anwendungskriterien klar definiert sind, werden auf der Basis eines Projektmodells gezielt ausgewählt und anwendbare Methoden werden durch Domain Analysis Reasoning identifiziert und zu einem Inspektionsplan-Raum zusammengestellt. Diese Methoden können schließlich instanziiert werden und ergeben dann den Inspektionsplan. Besonderes Gewicht liegt auf der Reduktion des Inspektionsplan-Raumes durch Reasoning, als deren wesentliche Basis Projektmodelle, einschließlich Prozess- und Produktmodelle, angeführt werden. Auf Basis des Inspektionsplans ist es möglich, die anwendbare Sensortechnologie zu identifizieren. Die Basis für diese Arbeit ist ein Datenmodell (Gordon, Akinci, & Garrett, 2004), das generische Inspektionsziele,

generische Constraints und Inspektionsmethoden, die zusammen die projektspezifischen Inspektionsziele ergeben, sowie die Anwendbarkeit beschreiben. Der Ansatz unterscheidet sich von dem in dieser Arbeit beschriebenen insofern, dass er die Planung des Messsystems nach Spezifikation der Anforderungen und Randbedingungen mit gegebenem Projektmodell automatisieren will. Er liest dazu eine IFC-Datei ein, filtert die Elemente der Klasse „BuildingElement“ heraus und sucht dazu passende Inspektionsmethoden. Die hier eingeführte Methodik zielt jedoch nicht auf die vollständige Automatisierung der Festlegung des Messprogramms, sondern auf die Semi-Automatisierung der gesamten Beobachtungsmethode mit Fokus auf die Unterstützung des Ingenieurs während des gesamten Prozesses der Bauwerksüberwachung, insbesondere durch Modellierung von Bau- und Überwachungsprozess, sowie von Bauwerk, Boden und Sensorsystem als logisches System, Nutzbarmachung verteilter Hard- und Softwareressourcen, sowie Einführung von Methoden zur Beschreibung und Ausführung der Informationslogistik. Zur Unterstützung des Ingenieurs wurde auch von (Schröder, Savidis, & Holz, 2007) ein modellbasiertes Informationssystem für den Spezialtiefbau entwickelt, das die Verwaltung von Projektinformationen auf Basis objektorientierter Modelle sowie das Management projektrelevanter Dokumente ermöglicht. Der Fokus lag dort darauf, durch schnelle Erfassung des Istzustandes sowie der Unterstützung bei der Suche nach Dokumenten mit ingenieurgerechter graphischer Darstellung des aktuellen Informationsstandes eine schnelle Reaktion auf eintretende Risiken zu ermöglichen. Eine wesentliche Erkenntnis bei der Evaluierung war, dass „Funktionalitäten, wie z.B. die direkte Einbindung von Elementen des Monitorings nachgefragt wurden.“ Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik sowie die Softwarearchitektur und die Komponenten sind komplementär zur aktuellen Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet.

Der in dieser Arbeit entwickelte Überwachungs- und Simulationsprozess zielt auf die kontinuierliche Validierung des zur Prognose verwendeten mechanischen Modells, die Evaluierung des Bauwerksentwurfs sowie letzten Endes auf die Adaption des Bauverfahrens ab. Der Wissensstand über das Systemverhalten von Bauwerk und Umfeld soll durch die kontinuierliche Auswertung und Bewertung der Sensordaten erweitert und für eine sichere und wirtschaftliche Bauweise genutzt werden. Um dies zu ermöglichen wird nachfolgend eine Erweiterung der derzeit üblichen Überwachungsprozesse vorgeschlagen. Die Schwellwerte zum Sensordatenvergleich sind hierbei nicht konstant, sondern sind für jeden Sensor über die Bauzeit hinweg entsprechend des Bauzustandes und des aktuellen Entwurfsmodells durch Einsatz von Simulation zu prognostizieren. Desweiteren wird nicht nur ein Schwellwert je Sensor festgelegt. Die Möglichkeiten, die sich durch die Semi-Automatisierung des Überwachungs- und Prognoseprozesses ergeben, gestatten die Erweiterung der Überwachungsaufgaben dahingehend, auch mehrere Schwellwerte in Kombination zu untersuchen und komplexe Kontroll- und Grenzwerte festzulegen.

3.3. Systemidentifikation

Die hier vorgeschlagene Methode zur Realisierung adaptiver Bauverfahren zielt darauf ab, durch die IT-Unterstützung des gekoppelten Bau- und Monitoringzyklus unter Nutzung verteilter Ressourcen und der expliziten Abbildung der Informationslogistik, das geotechnische Ingenieurmodell durch simulationsbasierte Systemidentifikation an die Monitoringdaten und damit an die Realität anzupassen, um objektive Diagnosen über den aktuellen Bauwerkszustand und bessere Vorhersagen für die noch auszuführenden Bauarbeiten treffen zu können und somit das Bauverfahren gezielt zu steuern. Das Ergebnis der Systemidentifikation soll genutzt werden um (1) das Parallelmodell für die in Kap. 2.2, Abbildung 9 dargestellte Regelung nach dem Modellvergleichsverfahren für automatisierte, maschinelle Bauverfahren realitätsnah zu bestimmen, sowie (2) Entscheidungen bei manuell gesteuerten Bauverfahren objektiv zu begründen.

3.3.1. Grundlagen der Systemidentifikation und ähnliche Arbeiten

Die Systemidentifikation wird bisher bevorzugt im Zusammenhang mit dynamischen Systemen genutzt. (Ljung, 1999) definiert Sytemidentifikation wie folgt: „System identification deals with the problem of building mathematical models of dynamical systems based on observed data from the system.“ Diese Definition ist konform mit der weitläufigen Anwendung der Systemidentifikation für die Modellierung dynamischer Systeme, überwiegend in Zusammenhang mit der Systemregelung. Im Bauwesen findet der Begriff Systemidentifikation insbesondere bei der Schadensdiagnose bestehender Brückenbauwerke Anwendung, wiederum assoziiert mit der Dynamik. Den Begriff der Systemidentifikation auf dynamische Systeme zu beschränken beruht letztendlich nur darauf, dass der Großteil systemtheoretischer Arbeiten sich mit dynamischen Systemen befasst und diese Begriffsdefinition sich so etabliert hat. Legt man jedoch die in Kap. 2.1 eingeführten Definitionen von Systemen zugrunde, die nicht auf dynamische Systeme beschränkt sind, so ist auch die Identifikation des Systems nicht mehr auf dynamische Systeme beschränkt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Systemidentifikation so interpretiert, dass ein gültiges physikalisches Modell identifiziert werden soll, das den Zusammenhang zwischen Input $u(t)$ und Output $y(t)$ eines Systems abbildet.

Der Systemoutput y ist eine Funktion

$$y(t) = f(\underline{u}(t, \underline{x}, \underline{p}, m))$$

des Systeminputs $\underline{u}$, des Systemzustands $\underline{x}$, der Systemparameter $\underline{p}$ und des Systemmodells m . Die Identifikation einer gültigen Formfunktion f mit den entsprechenden Parametern ist das Ziel der Systemidentifikation.

Im einfachsten Fall, wenn das aktuelle Modell die Messwerte erklären kann, jedoch Differenzen zwischen Mess- und Prognosewert auftreten, ist die Anpassung der Modellparameter zur Systemidentifikation ausreichend (Abbildung 17).

Messung und Simulation
stimmen nicht überein,
die Form der Verschiebung von
Messung und Simulation
scheint jedoch ähnlich zu sein

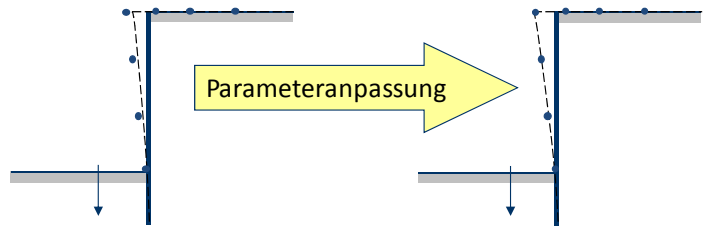


Abbildung 17: Systemidentifikation durch Parameteranpassung

Ziel ist in diesem einfachen Fall die Identifikation der Modellparameter θ derart, dass für einen vergangenen Zeitpunkt $t-1$ der mit einem Modell m prognostizierte Systemoutput $y_s(t-1, \theta, u)$ bestmöglich mit den ebenfalls zum Zeitpunkt $t-1$ beobachteten Systemoutputs $y_M(t-1)$ in Übereinstimmung gebracht wird, um damit eine Verbesserung der Prognose für einen in der Zukunft liegenden Zeitpunkt $t+i$ zu erreichen.

Die übliche Methode hierfür ist, den Prognosefehler

$$\varepsilon(t-1, \theta) = y_M(t-1) - y_s(t-1|\theta) \quad (2)$$

durch entsprechende Bestimmung der Parameter θ zu minimieren.

Zur Bestimmung der Parameter θ werden in der Praxis überwiegend zwei Methoden genutzt (Ljung, 1999):

- a) Minimierungsansatz, der ein Kleinstes-Fehler-Kriterium erfüllt, also eine Funktion der Art

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l(\varepsilon(i, \theta)) \quad (3)$$

minimiert und somit den Parametervektor

$$\hat{\theta}_N = \operatorname{argmin}_{\theta} V_N(\theta, Z^N) \quad (4)$$

erzeugt, wobei Z^N der Vektor der Beobachtungsdaten ist. Desweiteren wird üblicherweise im Kleinst-Fehler-Kriterium die Quadratische Norm

$$l(\varepsilon(i)) = \frac{1}{2} \varepsilon^2 \quad (5)$$

angesetzt.

- b) Korrelationsansatz mit Nullstellensuche, der eine Gleichung der Form

$$f_N(\theta, Z^N) = 0 \quad (6)$$

nach θ auflöst

Die Methoden werden üblicherweise im Rahmen von Optimierungsaufgaben zur Bestimmung des globalen Optimums eingesetzt. Da die Gleichungssysteme praxisrelevanter Probleme, insbesondere in der Geotechnik, meist nicht-linear sind, ist eine eindeutige und analytische Lösung praktisch nicht möglich. Das heißt, das globale Optimum muss in diesem Fall durch Suchalgorithmen gefunden werden.

Da keine Methode existiert, die das globale Optimum mit absoluter Sicherheit identifiziert, ist an dieser Stelle grundsätzlich die Frage zu stellen, welchen Sinn ein eindeutig identifiziertes globales Minimum im Rahmen der geotechnischen Überwachung und Diagnose überhaupt hätte.

Bereits Versuchsrechnungen an einfachen Beispielen zeigen, dass selbst eindeutig identifizierte Parameter, mit denen das mechanische Modell die Beobachtungsdaten (fast) exakt annähert, nicht zwangsläufig ein brauchbares Ergebnis darstellen, da sowohl durch die Messunsicherheiten als auch durch die schwere Erfassbarkeit des Bodenzustandes eine genauere physikalische Interpretation der ermittelten Parameter erforderlich ist.

Dies bedeutet als Konsequenz, dass die numerische Suche von Optima nicht das einzige Kriterium für ein gutes Modell sein kann. Im Weiteren heißt dies, dass neben den optimalen Parametern auch nicht-optimale Parameter bzw. Parameterkombinationen als Modellparameter in Frage kommen, wenn sie physikalisch begründbar sind.

Die Systemidentifikation im Rahmen der Beobachtungsmethode erfordert weniger, dass das identifizierte Modell mit seinen Modellparametern absolut genau zu den Messdaten passt, sondern es sollen vielmehr Veränderungen im Systemzustand durch Veränderungen der Modellparameter festgestellt, ingenieurmäßig interpretiert und erklärt werden können. Letztendlich bedeutet dies, dass ein größerer Wertebereich für die Parameter zu untersuchen ist und die Wahl der Modellparameter nur in Zusammenhang mit der physikalischen Beurteilung getroffen werden kann. Hierfür ist es notwendig, Simulationen für einen physikalisch plausiblen Parameterraum durchzuführen, und sowohl die Ergebnisse als auch die untersuchten Varianten von Parameterkombinationen zu priorisieren und zu bewerten. Daraus folgt, dass es nicht das Ziel ist, globale Optima zu finden, sondern eine Menge lokaler Optima, die physikalisch plausible Lösungen ergeben.

Diese Aussage wird auch durch Arbeiten belegt, die sich mit der Identifikation von Modellen zur Schadensdiagnose an Tragwerken beschäftigen. (Robert-Nicoud, Raphael, & Smith, 2005) zeigen am Beispiel einfacher statischer Stabsysteme, dass Parameterkombinationen des Elastizitätsmoduls und des Flächenträgheitsmoments, für die die absolute Abweichung zwischen Prognose und Messungen minimal sind, nicht zwangsläufig korrekte Lösungen sind. Der Einfluss von Messunsicherheiten sowie die Abhängigkeit von Modellparametern untereinander führen dazu, dass das tatsächliche Systemverhalten nicht immer eindeutig identifiziert werden kann, d.h., es existieren jeweils mehrere Parameterkandidaten, die das Systemverhalten gleichermaßen erklären.

Die Anzahl der untersuchten Modelle kann durch Anwendung eines Importance-Sampling-Verfahrens (Schueller & Stix, 1987), d. h. durch ein Sampling eines Lösungsraums mit hoher Wahrscheinlichkeit anhand der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der zu untersuchenden Parameter, nach dem PGSL-Algorithmus von (Raphael & Smith, 2003) reduziert werden.

Desweiteren hat die Anwendung von Clustering-Algorithmen zur Filterung von Simulationsergebnissen bei der Bewertung von Modellen mit ähnlichem Prognosefehler $\square$ bei Stabtragwerken zu einer Verbesserung der Systemidentifikation geführt (Saitta, Kripakaran, Raphael, & Smith, 2008). Von erheblichem Einfluss auf die Qualität der Systemidentifikation ist jedoch die Konfiguration des Sensorsystems, d. h. Anzahl und Positionierung der Sensoren. (Kripakaran & Smith, 2009) haben gezeigt, dass die Anzahl nicht identifizierbarer Schadensmodelle einer Fachwerkbrücke mit der Anzahl von Sensoren überproportional sinkt.¹ Abbildung 18 zeigt diesen Zusammenhang zwischen Sensoranzahl und Klassifikationsfähigkeit.

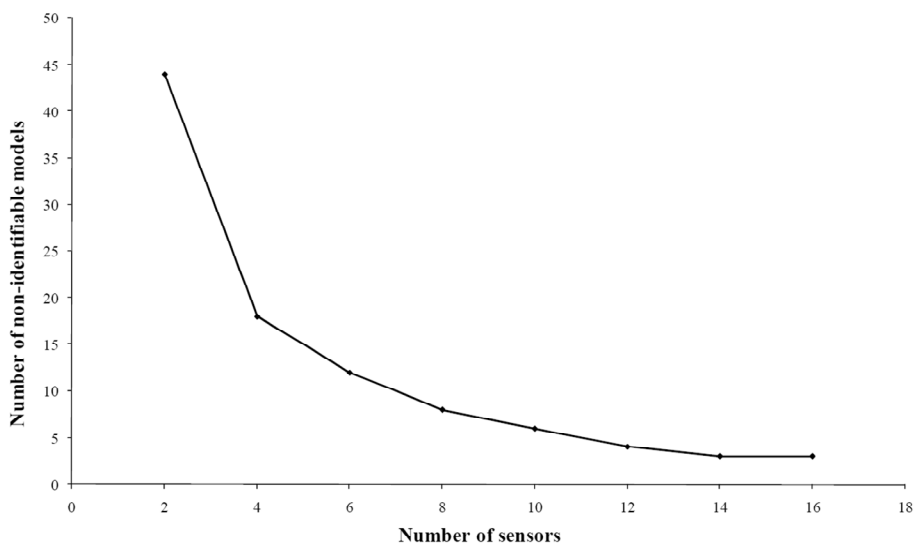


Abbildung 18: Maximale Anzahl nicht identifizierbarer Modelle in Abhängigkeit der Anzahl von Sensoren an einer Brücke (Kripakaran & Smith, 2009)

Aus dieser Abbildung kann grob abgelesen werden, dass die Verdopplung der Sensorenanzahl die Anzahl nichtidentifizierbarer Modellkandidaten in etwa halbiert.

¹ Der in dieser Studie untersuchte Schadensmodus ist die Verminderung der Steifigkeit in einem Stab um 50%. Die Sensoren sind Spannungsmesser. Ziel der Systemidentifikation war es, den Stab zu identifizieren, dessen Steifigkeit reduziert ist.

3.3.2. Systemidentifikation im Rahmen der geotechnischen Beobachtungsmethode

Die Übertragung der oben beschriebenen Verfahren in die hier angestrebte bodenmechanische Anwendung im Rahmen der Beobachtungsmethode ist von der Methodik her zwar möglich, jedoch im Einzelnen mit Schwierigkeiten verbunden:

1. Es besteht die Unsicherheit, dass bei der durch Importance-Sampling-Methoden erzeugten Menge an Modellkandidaten wesentliche Modellkandidaten möglicherweise nicht enthalten sind, da die erzeugten Modellkandidaten sich alle um den Wert mit der höchsten Wahrscheinlichkeit (Erwartungswert) versammeln. Da Boden ein heterogener Stoff ist, muss man davon ausgehen, dass die bei der Entwurfsfassung angenommenen Erwartungswerte für Stoffparameter über die statistische Streuung hinaus abweichen. Das heißt, ein Importance-Sampling-Methoden, das Parametervarianten um den Erwartungswert erzeugt, liefert falsche Ergebnisse, wenn bezüglich dieses Erwartungswertes falsche Annahmen getroffen wurden. Da die Systemidentifikation im Rahmen dieser Arbeit neben der Verbesserung der Prognoseberechnungen insbesondere das Ziel hat, die Entwurfsannahmen kontinuierlich zum Bauablauf zur verifizieren, sind auch Parametervarianten zu untersuchen, die vom statistischen Erwartungswert abweichen. D. h. es ist ein größerer Wertebereich abzudecken, der auch die weniger wahrscheinlichen, aber physikalisch möglichen, Parameter angemessen mit erfasst. Daher ist es anzustreben, zunächst den kompletten Informationsraum wenigstens mit sehr grober Diskretisierung zu erfassen und im Nachgang zur Verfeinerung adaptierte Importance-Sampling-Methoden einzusetzen.
2. Das Verhalten von Böden ist, wie in Kap. 3.1 beschrieben, stark von ihrer meist nicht ausreichend bekannten Vorgeschichte abhängig und nichtlinear. D. h. im Unterschied zu den oben zitierten Verfahren, die ein schadhaftes Tragwerkselement dadurch identifizieren, dass es eine stark veränderte Steifigkeit aufweist, gehört die Variabilität der Steifigkeit für unterschiedliche Böden in Abhängigkeit von ihrem Spannungszustand zur Normalität. Es gibt also für Böden keine allgemeingültige, genaue Referenzsteifigkeit, wie z.B. bei Stahl, mit der man die tatsächliche Steifigkeit vergleichen und dadurch Rückschlüsse auf den Bodenzustand ziehen könnte.
3. Aus (1) und (2) resultiert die Notwendigkeit, eine hohe Anzahl an Modellkandidaten zu untersuchen. Dies erfordert eine hohe Rechenleistung, die mit der gegenwärtig üblichen Ausstattung an Arbeitsplatzrechnern nicht erbracht werden kann.
4. Die Anzahl der Modellkandidaten muss dadurch reduziert werden, dass die Modellkandidaten hinsichtlich ihrer physikalischen Plausibilität gewählt werden, d.h. es müssen physikalische Gesetze und empirische Erfahrungen über die Abhängigkeit von Stoffparametern genutzt werden, um unplausible Kombinationen verschiedener Parameterwerte von vornherein auszuschließen. Dies betrifft sowohl die Wahl des Stoffgesetzes, als auch die Wahl der Parameter.
5. Die hohe Komplexität, bzw. die Nichtidentifizierbarkeit, die sich schon bei einfachen Stabtragwerken zeigt, ist in der Bodenmechanik noch viel höher. Die erforderliche hohe Anzahl der zu untersuchenden Modellkandidaten erfordert eine automatische Vorpriorisierung, die sowohl (a) die numerische als auch (b) die physikalische Priori-

tät (z.B. über die Distanz zu Laborparametern) berücksichtigt und damit die Komplexität bei der endgültigen Wahl eines Modellkandidaten nach (6) zu reduzieren.

6. Die endgültige Entscheidung über die Plausibilität von Ergebnissen bzw. der zu verwendende Modellkandidaten muss ein Ingenieur treffen. Dies ist sowohl der Verantwortlichkeit des Ingenieurs als auch der begrenzten Automatisierbarkeit wissensbasierter Entscheidungen geschuldet.

Aufgrund der bereits angesprochenen komplexen Eigenschaften und des Verhaltens von Böden gelingt durch die reine Variation der Parameter in der überwiegenden Anzahl der Fälle keine ausreichende Verbesserung des Prognosefehlers, da die zumeist verwendeten einfachen Stoffgesetze die auftretenden Effekte, wie z.B. die in Abbildung 19 dargestellte Setzungsmulde infolge der Verformung der Spundwand, nicht ausreichend realitätsnah abbilden können.

Messung und Simulation stimmen wertemäßig und strukturell nicht überein, das Modell kann den Effekt Setzung nicht berücksichtigen

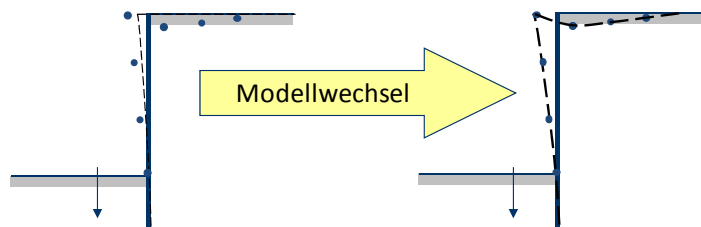


Abbildung 19: Systemidentifikation mit Modellwechsel (Austausch des Stoffgesetzes)

Die Wahl komplexerer Stoffgesetze ermöglicht eine genauere Abbildung. Aus der Vielzahl verfügbarer Stoffgesetze ist also eine Auswahl zu treffen, die die beobachteten Effekte abbilden können. Die für die Systemidentifikation zu nutzenden Stoffgesetze müssen für den jeweiligen Kontext anwendbar sein. Um eine zeitnahe Systemidentifikation zu gewährleisten ist eine Unterstützung des Auswahlverfahrens notwendig (vgl. Kap. 5.3.6), wobei wiederum jeweils für jedes zu testende Stoffgesetz die Stoffgesetzparameter anhand der durchgeführten Laborversuche ermittelt und anschließend so variiert werden müssen, dass eine Approximation an die Messdaten erreicht wird.

Kombinationsvielfalt

Es entstehen durch Kombination von

- **b** Bauzuständen,
- **k** geometrischen Modellansätzen
(hier sind evtl. auch Geometrie-Intervalle zu untersuchen),
- **n** Stoffgesetzen,
- **m** Parametervariationen (m Diskretisierungen des Parameterintervalls) über eine Anzahl von
- **p** Parametern pro Stoffgesetz,

eine Anzahl möglicher Modellkandidaten, die berechnet werden müssen. Die Anzahl ergibt sich aus der Tatsache, dass b , k , n als Skalarprodukt, und m, p als Vektorprodukt (Kreuzprodukt) miteinander kombiniert werden müssen.

Als Endergebnis ist eine begrenzte Auswahl von Modellen aus diesen vielen Modellkandidaten auszuwählen, mit dem wiederum $\mathbf{e} * \mathbf{b}$ Kombinationen von

- $\mathbf{e}$ Entwurfsvarianten für
- $\mathbf{b}$ Bauzustände (Bauphasen)

berechnet werden, um auf dieser Basis letztlich zu entscheiden, ob die bisher zur Ausführung gewählte Entwurfsvariante beibehalten, oder ob eine andere Variante gewählt werden soll. Die Berechnung von Grundwasserströmungen ist hierbei noch nicht berücksichtigt und kommt bei Bedarf noch hinzu.

Um eine Größenordnung zu nennen, sei folgendes Zahlenbeispiel gegeben: Geht man von 4 bereits ausgeführten Bauzuständen, 3 geometrischen Modellansätzen, 3 Stoffgesetzen und 9 Parameter mit jeweils 3 Parameterdiskretisierungen aus, so ergeben sich für die Systemidentifikation (Regelkreis 2 in Abbildung 2) $4 \times 3 \times 3 \times 3^9 = 708588$ nichtlineare FE-Berechnungen. Geht man weiterhin davon aus, dass 5 Entwurfsvarianten für 5 noch auszuführende Bauzustände mit einer Auswahl von 10 Modellen untersucht werden, sind für die Prognoseberechnung des zukünftigen Bauablaufs weitere 250 nichtlineare FE-Berechnungen erforderlich, um über Änderungen des Bauverfahrens (Regelkreis 3b in Abbildung 2) zu entscheiden.

Bei einer 2D-FEM-Berechnung einer Baugrube kann man von einer Rechenzeit von 5 bis 10 Minuten pro Bauzustand ausgehen. Eine Systemidentifikation mit sequenzieller Simulation der Modellkandidaten würde bei Annahme der unteren Grenze also $708588 \times 5 = \text{ca. } 3,5 \text{ Mio. Minuten}$, das sind 59049 Rechenstunden, in Anspruch nehmen. Durch die Verteilung der Rechenlast über Cloud Computing kann der Rechenaufwand bei der Simulation der erforderlichen hohen Anzahl an Modellkandidaten durch die Parallelisierung der Berechnungen beherrschbar gemacht werden (vgl. Kap. 4.4). Es ist hohes Potenzial zur Parallelisierung vorhanden, da zumindest alle Modelle, die die gleiche Bauphase beschreiben, parallel durchgerechnet werden können, d. h. die oben enthaltenen $\mathbf{k} * \mathbf{n} * \mathbf{m}^p$ Modellkandidaten könnten parallel berechnet werden. Damit sind also die für jeden der 3 Bauzustände zu untersuchenden $4 \times 3 \times 3^9 = 236196$ Modellkandidaten parallel simulierbar. Bei paralleler Ausführung der Webserviceinstanzen mit Cloud- oder Grid-Computing und optimaler Skalierung ergibt sich damit eine effektive Rechenzeit von insgesamt 4 Bauzuständen $\times$ 5 Minuten = 20 Minuten. Dieses Szenario ist keineswegs unrealistisch, wenn man als Vergleich z.B. die verteilte Grid Middleware Plattform BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing) heranzieht. Im Jahr 2010 waren durchschnittlich 550000 Computer verfügbar, die im 24-Stunden-Durchschnitt über 5 PetaFLOPS ($= 5 * 10^{15}$ Gleitkommaoperationen pro Sekunde) ermöglichen (van Deventer, Clarke, & Hazelhurst, 2010). Die Tendenz der Beteiligung an solchen Rechen Netzwerken ist steigend. Ein Intel Core i7 Prozessor mit 3,2 GHz erlaubt 51,2 GigaFlops. Damit sind im BOINC-Netzwerk pro Sekunde ca. 100000 mal so viele Gleitkommaoperationen möglich, wie auf einem derzeit handelsüblichen Arbeitsplatzrechner. Da die Hard- und Softwareindustrie das Geschäft mit Rechenressourcen für sich entdeckt (Amazon, Microsoft, Google), kann man also davon ausgehen, dass in absehbarer Zeit die Verfügbarkeit der Rechenleistung kein größeres Problem mehr darstellen wird. Nicht zu vernachlässigen ist allerdings die Kostenseite. Derzeit kostet eine Recheninstanz mit 1 Rechenkern in Cloud-Computing-Umgebungen i. M. ca. 0,12 US-\$. pro Rechenstunde. Bei der oben ermittelten Gesamtrechenzeit (ohne Parallelisierung) von 59049 Stunden

entstehen damit Kosten von insgesamt 7085 US-\$ für die Simulation der 708588 Modellkandidaten. Es handelt sich hierbei um derzeitige Kosten, die in Zukunft kontinuierlich fallen werden. Dieses Beispiel zeigt, dass die Möglichkeit zur simulationsbasierten Systemidentifikation durch Nutzung verteilter Ressourcen prinzipiell besteht, wenngleich sie zurzeit noch einigen Beschränkungen, insbesondere was die Anzahl der zu variierenden Parameter sowie die Anzahl der Variationen betrifft, unterliegt. Dieser Punkt wird in Kap. 6.2 nochmal aufgegriffen und in Kap. 6.3 hinsichtlich seiner Lösungsmöglichkeiten diskutiert.

Sowohl der Rechenaufwand bei der Simulation der hohen Anzahl an Modellen als auch der kombinatorische Aufwand zur Erstellung der Modellkandidaten sind extrem hoch und manuell nicht mehr beherrschbar. Der hohe Aufwand beim Aufbau der Modellkandidaten (Simulationsmodelle) kann durch eine semi-automatische logikbasierte Modellauswahl und Modellkomposition (vgl. Kap. 5.3.6) erheblich reduziert werden.

Priorisierung der Modellkandidaten

Die mit den Modellkandidaten durchgeführten Simulationen sind anschließend zu analysieren. Die hohe Anzahl untersuchter Modellkandidaten führt dazu, dass die produzierten Simulationen für den Anwender nicht mehr überschaubar sind. Zur Reduktion der Komplexität für den Ingenieur muss eine Priorisierung der Modellkandidaten durchgeführt werden. Hierfür sind Distanzmaße notwendig, die eine Priorisierung anhand quantifizierbarer Kriterien ermöglichen.

Das einfachste hierfür verfügbare Distanzmaß ist der Quadratische Mittelwert (RMS=Root Mean Square) der Abweichung zwischen Messwerten und Simulationswerten

$$d = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{iM} - x_{iS})^2} \quad (7)$$

mit

n := Anzahl der untersuchten Messpunkte

x_{iM} := Messwert am Messpunkt i

x_{iS} := Simulationswert am Messpunkt i

Der quadratische Mittelwert ist als Distanzmaß zur Priorisierung der Modellkandidaten im Rahmen der simulationsbasierten Systemidentifikation nicht ausreichend, da

1. die Betragsgröße der gemessenen und simulierten physikalischen Größen das Distanzmaß beeinflussen, d. h. eine ungewollte Wichtung einführen,
2. die Zuverlässigkeit der Messgrößen und Simulationsgrößen nicht im Distanzmaß berücksichtigt werden. Eine Größe, die mit hohen Unsicherheiten behaftet ist, hat also in diesem Distanzmaß die gleiche Priorität, wie eine abgesicherte Größe,
3. Abhängigkeiten der Messgrößen untereinander durch innere Systemzusammenhänge im Distanzmaß nicht berücksichtigt sind. Bei Messungen an einem Bauwerk bedeutet dies, dass z.B. der Einfluss der Verformungsmessung auf das Distanzmaß mit zunehmender Anzahl an Messpunkten gegenüber anderen Messgrößen mit geringerer Messpunktanzahl überrepräsentiert ist.

Zu letzterem Punkt sei ein kurzes Beispiel gegeben. Das in Abbildung 20 dargestellte statische System einer einfach verankerten Spundwand veranschaulicht, dass sich die Messungen der physikalischen Größen Erddruck, Ankerkraft, Inklinometer und Verschiebung über ihre differentiellen Zusammenhänge ergänzen.

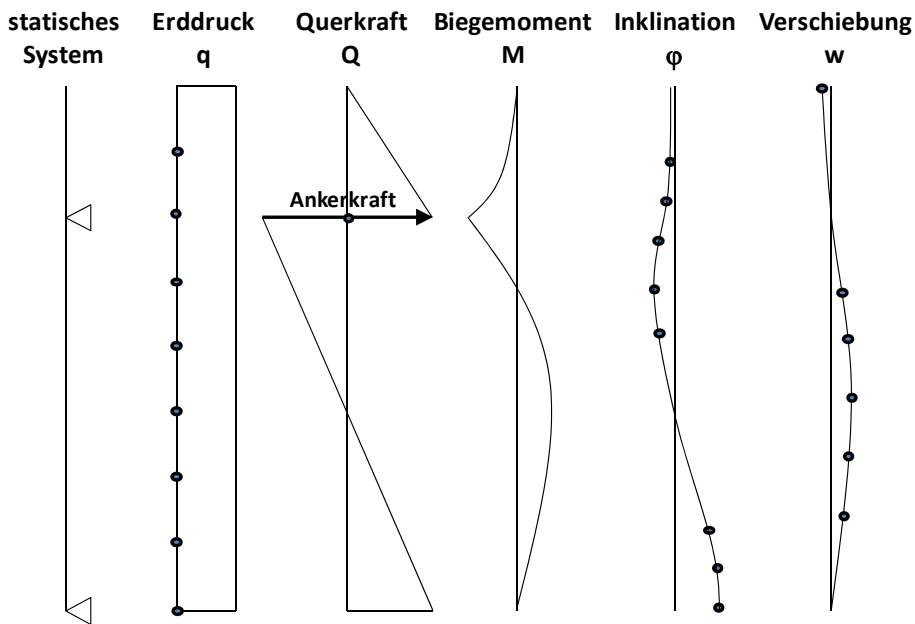


Abbildung 20: Systemzusammenhang physikalischer Größen

Es ist nachvollziehbar, dass z.B. bei einer 30 m hohen Spundwand 300 Messpunkte der Verschiebungskurve im Vergleich zu 30 Messpunkten keinen wirklichen Erkenntnisgewinn bedeuten, jedoch aufgrund der hohen Anzahl das Distanzmaß dominieren. Diese Dominanz muss durch entsprechende Gewichtung abgemindert werden. Da die Erhöhung der Anzahl von Messpunkten, die zur gleichen Kurve gehören, einen eingeschränkten Beitrag zur Qualität der Systemidentifikation leistet, sind die differentiellen Systemzusammenhänge mit anderen physikalischen Größen zu berücksichtigen. Im dargestellten Beispiel bringt die zusätzliche Messung der Inklination an Stellen mit sehr geringer Verformung einen zusätzlichen Informationsgewinn, da sie genau an den Stellen, an denen die Verformung kaum mehr messbar ist, signifikantere Werte annimmt. Für die Messung des Biegemoments stehen keine Messgeräte von baupraktischer Bedeutung zur Verfügung, jedoch kann über die Messung der Ankerkraft die Unstetigkeitsstelle des Querkraftverlaufs quantifiziert werden. Die Messung all dieser Größen leistet durch Interpretation über ihren differentiellen Zusammenhang einen wesentlichen Beitrag zur Systemidentifikation, sofern der Einfluss jeder Größe angemessen gewichtet wird.

Ausgehend vom Quadratischen Mittelwert werden daher Ergänzungen zur Normierung und Wichtung des Distanzmaßes eingeführt. Zum Einen ist die Werteskala des Distanzmaßes zu bereinigen, damit Mess- und Simulationsgrößen mit hohem Wertebereich den Einfluss anderer Größen mit kleinem Wertebereich nicht unterdrücken können. Aus diesem Grund ist das Distanzmaß zu normieren. Es wird vorgeschlagen, diese Normie-

rung durch Division der einzelnen Differenzen der Messwerte x_{iM} und der Simulationswerte x_{iS} mit dem jeweiligen Messwert x_{iM} durchzuführen, da x_{iM} , zumindestens zum Zeitpunkt der Systemidentifikation, der weniger variierende Wert ist. Die Simulationswerte x_{iS} hingegen variieren bei der Sytemidentifikation durch die starke Variation der Modellparameter sehr stark und würden damit eine Variation im Distanzmaß erzeugen, die die Vergleichbarkeit negativ beeinflussen würde. Auf Basis dieser Überlegungen ergibt sich das folgende, normierte Distanzmaß.

$$d = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{iM} - x_{iS}}{x_{iM}} \right)^2} \quad (8)$$

Aus der in Kap. 3.2.2 getroffenen Feststellung, dass Messungen je nach Messprinzip und Messort unterschiedliche Konfidenz aufweisen ergibt sich die Konsequenz, dass die Qualität bestimmter Messungen bei der Priorisierung der Modellkandidaten berücksichtigt werden muss, d. h. Messungen, bei denen davon auszugehen ist, dass sie als weniger zuverlässig und damit als weniger wichtig anzusehen sind, dürfen bei der Systemidentifikation auch nur mit geringem Gewicht in den Identifikationsprozess eingehen, als Messungen, deren Zuverlässigkeit höher ist.

Das Distanzmaß muss also zusätzlich durch Berücksichtigung der Wichtigkeit der einzelnen Mess- und Simulationsgrößen durch Gewichtungsfaktoren w_i objektiviert werden.

$$d = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{x_{iM} - x_{iS}}{x_{iM}} \right)^2} \quad (9)$$

Der Gewichtungsfaktor w_i muss dabei die Konfidenz bzw. den Einfluss sowohl der Messgröße als auch der Simulationsgröße abbilden.

Der Gewichtungsfaktor w_i setzt sich aus vier Einflüssen zusammen:

1. Die Konfidenz der Messungen $w_{i,M}$ kann dabei in Form des Vertrauensniveaus (Wahrscheinlichkeit $w_{i,M}$, mit der das vollständige Messergebnis dem wahren Wert entspricht) nach Standardmethoden der (DIN 1319-3) ermittelt werden.
2. Die Konfidenz der Simulationsgröße $w_{i,S}$ kann aus den Modell- und Parameterunsicherheiten des mechanischen Modells in Anlehnung an (JCSS, 2001) ermittelt werden, wobei hierbei die Repräsentativität von Bodenproben, die Zuverlässigkeit der Laborversuche sowie die Realitätsnähe des mechanischen Modells, insbesondere der bodenmechanischen Aspekte, in die Ermittlung eingehen sollen.
3. Die Signifikanz $w_{i,G}$ der gemessenen physikalischen Größe für die Systemidentifikation ist in Abhängigkeit der Anzahl an Messpunkten aus den Systemzusammenhängen des zu untersuchenden Boden-Bauwerk-Systems zu bestimmen.
4. Ein wesentlicher Aspekt ist es, Messungen über sämtliche Bauzustände hinweg zu nutzen. D. h. bei der Systemidentifikation sind die Daten aller abgeschlossenen Bauzustände zu berücksichtigen. Auch hier soll die Möglichkeit bestehen, Bauzustände hinsichtlich ihrer Relevanz für die aktuelle Situation mit einer entsprechenden Gewichtung $w_{i,B}$ zu berücksichtigen.

Der letztendlich im Objektiven Distanzmaß verwendbare Gewichtungsfaktor w_i ist aus dem Produkt des Gewichtungsfaktors der Messungen $w_{i,M}$, des Gewichtungsfaktors der Simulation $w_{i,S}$, des Gewichtungsfaktors der Signifikanz der physikalischen Größen $w_{i,G}$ und des Gewichtungsfaktors der Bauzustände $w_{i,B}$ zu bilden.

Es ergibt sich damit das objektive Distanzmaß

$$d = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_{i,M} \cdot w_{i,S} \cdot w_{i,G} \cdot w_{i,B} \left(\frac{x_{iM} - x_{iS}}{x_{iM}} \right)^2} \quad (10)$$

Zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren für diverse geotechnische Anwendungsfälle ist weiterführende Forschung notwendig, die insbesondere die Systemzusammenhänge von Boden und Bauwerk angemessen berücksichtigt.

4. Verteilte semantische Informationssysteme

Die Realisierung der anvisierten Beobachtungsmethode mit kontinuierlicher simulationsbasierter Systemidentifikation unter Nutzung der ständig aktuellen Messungen ist nur durch ein integriertes Informationssystem möglich, das einen durchgängigen Informationsfluss von der Erfassung, der Vorbereitung über die Simulation und Analyse der Daten ermöglicht. Die komplexe Interaktion zwischen Bauverfahren, Messung und Systemidentifikation unter Berücksichtigung der bauprozessinstationären Zustände von Bauwerk und Messsystem erfordert über die reine Speicherung der Daten hinaus die Modellierung von Beziehungen zwischen den verschiedenen Objekten sowie die Modellierung der logischen Abhängigkeiten zwischen Systembestandteilen und dem Bauprozess. Die Verlagerung zeitaufwendiger logischer Schlüsse, die zwar im Einzelnen aus einfachen, in der Summe jedoch aus komplexen logischen Abhängigkeiten bestehen, vom Ingenieur auf logikbasierte Softwaresysteme ermöglicht die Behandlung der sich in diesem Fall ergebenden logischen Komplexität. Die für die Aufgabenstellung relevanten Modellansätze zur Repräsentation von Daten, Information und Wissen werden in diesem Kapitel vorgestellt und hinsichtlich ihrer Qualitäten im Rahmen der Produkt- und Prozessmodellierung untersucht. Ein Einblick in die informationstechnische Umsetzung wird gegeben. Desweiteren werden die Grundlagen der komponentenbasierten verteilten Softwareentwicklung im Rahmen Serviceorientierter Architekturen kurz eingeführt. Wenngleich es sich hierbei weniger um wissenschaftliche Inhalte, als vielmehr um technische Grundlagen handelt, ist der beschriebene Ansatz Serviceorientierter Architekturen eine wesentliche Voraussetzung für die Realisierung des Gesamtinformationssystems, sowie besonders der simulationsbasierten Systemidentifikation. Webservices ermöglichen zum Einen die Realisierung des komponentenbasierten Ansatzes und damit die Rekombinierbarkeit von Softwarekomponenten zu integrierten Softwaresystemen für unterschiedliche Anwendungsfälle. Zum Anderen können Webservices per Fernaufruf von beliebigen Rechnern aus über Kommunikationsprotokolle aufgerufen und ausgeführt werden. Sie ermöglichen damit die Verteilung von Analysen auf mehrere Rechner und damit erst die Durchführung der simulationsbasierten Systemidentifikation in praxistauglicher Rechenzeit. Auch im Rahmen von Cloud- und Grid-Computing sind Webservices zur Ausnutzung verfügbarer Rechenkapazitäten notwendig.

4.1. Repräsentation von Informationen über Bauwerk und Bauprozess

Die Nutzung von Webtechnologien erfordert die Formalisierung der betroffenen Anwendungsdomänen. Für die Realisierung des adaptiven Bauverfahrens bedeutet dies, dass die Realität, zu der das Bauwerk, das Sensorsystem, die Bau- und Überwachungsprozesse sowie die jeweils zugehörigen Daten gehören formalisiert und damit maschinenverarbeitbar gemacht werden müssen.

Der Erfolg beim Einsatz semantischer und verteilter Technologien ist sehr stark von der zugrunde liegenden Datenstruktur abhängig, wie u. a. noch in Kap. 5 vertieft dargestellt

wird. Nur auf Basis einer konsistenten mit logischen Kriterien abfragbaren Datenstruktur lässt sich die Übergabe der Daten an die Analyseprozesse effizient realisieren.

Zur Entwicklung von Datenstrukturen haben sich in den letzten Jahren in den Bereichen Produktmodellierung und Prozessmodellierung Paradigmen herauskristallisiert, die in kombinierter Form zur Modellierung der Gesamt-Realität eingesetzt werden können. Die in dieser Arbeit entwickelten Daten- und Wissensmodelle berücksichtigen den nachfolgend erläuterten Forschungs- und Entwicklungsstand von Datenstrukturen für die Bauwerksüberwachung und für den Grundbau.

4.1.1. Produktmodellierung

Produktmodelle sind ein effizientes Mittel, um Informationen über ein geplantes oder bestehendes Produkt zu repräsentieren und mit anderen Bearbeitern auszutauschen. Die Entwicklung von Produktmodellen vollzog sich ab Einführung des CAD mit dem Gedanken, über die reine zeichnerische Darstellung von Produkten hinaus, die Informationen über ein Produkt in einer Form abzuspeichern, die eine vereinfachte Wiederverwendung von Daten, sowie den Datenaustausch, erleichtert. Ausgehend von neutralen Datenformaten auf der Ebene einfacher Zeichnungselemente, wie DXF (Rudolph, Stürznickel, & Weissenberger, 1993) oder IGES (Nagel, Braithwaite, & Kennicott, 1980) wurden Produktdatenmodelle entwickelt, die losgelöst von der zeichnerischen Darstellung die Repräsentation und Verarbeitung von Produktinformationen ermöglichen ((Reed, 1988), (Björk, 1995), (Eastman, 1999)). Eine detaillierte Einführung in Produktdatenmodelle ist in (Weise, 2006) gegeben.

Grundgedanke von Produktmodellen ist, Produkte als Objekt formal objektorientiert mit ihren Attributen parametrisch zu beschreiben und so eine durchgängige Nutzung von Daten im Rahmen integrierter Prozesse zu ermöglichen. Dies entspricht im Wesentlichen einer Trennung von Inhalt und Präsentation, d.h. die Daten stehen losgelöst von der Visualisierung als atomare Informationseinheit zur Verfügung und werden als Attribut mit ihrer Bedeutung einem Objekt zugeordnet. Diese parametrischen Informationen sind damit nicht nur für die Visualisierung verwendbar, sondern auch für alle anderen relevanten Aufgaben, wie z.B. energetische, statische oder auch betriebswirtschaftliche Berechnungen. Im Bauwesen ist in den letzten Jahren der Begriff BIM (Building Information Model) für Produktmodelle populär geworden. Die Produktmodellierung beschäftigt sich also mit der logischen Strukturierung von Objekten der Realwelt in Elemente, der Zuordnung ihrer Eigenschaften durch Attribute sowie der Modellierung der Beziehungen zwischen den Objekten. Als Metamodell für die Erstellung von Produktmodelschemata dienen überwiegend die in Kap. 4.2.2 eingeführten Entitäts-Beziehungs-Modelle, die die Ausgangsbasis für die Implementierung von Produktmodelschemata auf Klassenebene bilden. Ein etabliertes Beispiel eines auf Entitäts-Beziehungs-Modellierung basierenden Produktmodelschemas aus dem Bauwesen ist der zur digitalen Beschreibung von Gebäudemodellen verwendete IFC-Standard (Industry Foundation Classes), genormt in (ISO PAS 16739, 2005). Die IFC sind eine hierarchisch auf Vererbung aufgebaute komplexe Datenstruktur, die eine Anzahl von Bauwerkselementen, sowie Klassen zur Definition von Geometrie und Topologie enthalten. Sie ermöglichen die Instanziierung parametrischer 3D-Bauwerksinformationsmodelle (BIM), bei denen die Beschreibung der

Geometrie über Relationen mit einem Bauwerkselement verknüpft ist, die Bauwerkselemente ihrerseits sind wiederum topologisch mit Nachbarelementen verknüpft, d.h. es wird eine logische Repräsentation des Bauwerks aufgebaut, die es ermöglicht, Informationen bezüglich Geometrie, Topologie und sonstiger Eigenschaften über das CAD-System aus dem Bauwerksmodell abzufragen. Die Produktmodellierung, z.B. mit IFC, wird derzeit überwiegend im Hochbau betrieben, da dort (a) der Wunsch nach 3D-Visualisierungen besonders ausgeprägt und durch das Produktmodell einfach zu realisieren ist und (b) die im Produktmodell repräsentierten Informationen für weitere Fachdisziplinen wie z.B. für statische und wärmetechnische Nachweise genutzt werden. In der Geotechnik und insbesondere in der geotechnischen Überwachung befindet man sich, was die Produktmodellierung betrifft, noch am Anfang. Datenmodelle werden für proprietäre Einzelimplementierungen geotechnischer Software entwickelt, jedoch sind Bestrebungen, standardisierte Datenmodelle zu entwickeln, kaum vorhanden. Dies mag insbesondere daran liegen, dass hier die Datenaustauschproblematik sowie das kooperative Arbeiten einen untergeordneten Stellenwert einnehmen und auch an die durchgängige Bearbeitung eines Projektes bisher geringere Anforderungen gestellt werden, da – wie Eingangs beschrieben – nach Erstellung und Genehmigung des Entwurfs, die Entwurfsinformation meist nur noch zur Ausführung genutzt werden.

Eine vollständige Umsetzung der Beobachtungsmethode mit kontinuierlicher Messung, Analyse, Modell- und Bauverfahrensadaptation jedoch, erfordert ein Produktmodell, das das geotechnische Bauwerk und das Messsystem abbildet und den Datenzugriff für verschiedene Softwareanwendungen realisiert. Besondere Bedeutung erlangt das Produktmodell für die Modelladaptation, bei der gezielt bestimmte Aspekte des Boden-Bauwerk-Modells, z.B. Stoffparameter, das Materialgesetz oder die geometrische Aufteilung modifiziert werden müssen.

4.1.2. Prozessmodellierung

Für den Einsatz bei der baubegleitenden Überwachung ist die Abfrage von 3D-Informationen nicht ausreichend. Bei einem sich entwickelnden Bauwerk ist vor allem die Berücksichtigung prozessgebundener Informationen wichtig. Wie bereits in Kap 2.1 im Rahmen des Handlungssystems ausgeführt, ist ein Prozess eine Abfolge von Aktivitäten, die Material, Energie und Information von einem Ausgangszustand in einen Zielzustand transformieren. Diese Materie-, Energie- und Informationstransformation in einem Modell formal abzubilden, ist Ziel der Prozessmodellierung.

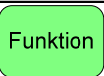
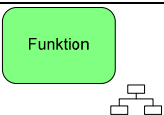
Zur Modellierung von Prozessen wurden zahlreiche Methoden, Sprachen und Notationen entwickelt. Diese ermöglichen die Beschreibung, Analyse/Simulation und Ausführung von Prozessen. Die Wahl der Sprache und der Formalität sind in erheblichem Maße vom Modellzweck abhängig. Nachfolgend werden die für diese Arbeit wesentlichen Methoden, Sprachen und Notationen zur Dokumentation, Simulation und Ausführung von Prozessen kurz vorgestellt. Auf eine ausführliche Einführung wird hier verzichtet, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Dokumentation von Prozessen

Zur Dokumentation von Prozessen ist bei der Wahl der Prozessmodellierungssprache wesentlich, ob überwiegend material- oder informationstransformierende Prozesse vorliegen. Für die Dokumentation informationstransformierender Prozesse steht mit der von der OMG (Object Management Group, 2010) standardisierten Business Process Modeling Notation (BPMN) eine standardisierte, graphische Modellierungsmethode zur Darstellung von Geschäftsprozessen zur Verfügung, die insbesondere zur Planung der Informationslogistik zwischen Softwarekomponenten von Softwarearchitekten eingesetzt wird.

Zur Dokumentation überwiegend materialtransformierender Prozesse mit interagierenden informationstransformierenden Prozessen, haben sich ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) (Scheer, ARIS - Business Process Modeling, 2000), (Scheer, ARIS - Modellierungsmethoden, Metamodelle, Anwendungen, 2001) etabliert. Grundgedanke dieser ebenfalls graphischen Notationssprache ist, Prozessmodelle auf der Basis von sich abwechselnden Ereignissen und Aktivitäten aufzubauen und logische Prozessabhängigkeiten durch Konnektoren (und, oder, und/oder) im Prozessmodell zu berücksichtigen. Die EPK an sich ist per se kein implementierungsfähiges Konzept. Die Zielanwendung ist die Dokumentation von Prozessen, als Diskussionsgrundlage. Eine Übersicht über die grundlegenden Elemente der EPK ist in nachfolgender Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Elemente der EPK

Symbol	Bedeutung
	Die Funktion ist ein aktiver Objekttyp, der eine Aktivität oder Aufgabe beschreibt.
	Detaillierung einer Funktion durch weitere EPK. Das Symbol neben der Funktion zeigt an, dass die Funktion durch eine weitere EPK detailliert wird.
	Ereignisse sind passive Objekttypen, die Funktionen auslösen und wiederum Ergebnisse ausgeführter Funktionen sind.
	Kontrollfluss (Direkte Verknüpfung)
	UND - Verknüpfung – Konjunktion
	ODER - Verknüpfung – Adjunktion
	XOR - Verknüpfung – Disjunktion
	Prozessschnittstelle: Verweis auf vorhergehende oder nachfolgende EPK

Zur Verwendung der Elemente in Tabelle 2 sowie zum Aufbau einer EPK sind folgende syntaktische Regeln zu beachten (Holstein, 2006):

- Jede EPK beginnt mit mindestens einem Startereignis und endet in der Regel mit mindestens einem Endereignis, kann aber auch auf eine andere EPK verweisen. Prozesswegweiser verbinden verschiedene einzelne EPKs miteinander
- Weder zwei Ereignisse noch zwei Funktionen dürfen unmittelbar aufeinander folgen
- Im Unterschied zu den Verknüpfungsoperatoren besitzen Ereignisse und Funktionen jeweils nur genau einen ein- und genau einen ausgehenden Steuerfluss
- Mit der Hilfe von AND-Verknüpfungsoperator kann ein Ereignis mehrere Funktionen auslösen. Damit sind durch Gabelung nebenläufige Prozesse realisierbar. Eine Gabelung mit OR und XOR ist nur nach einer Funktion zulässig, da hierfür eine Entscheidung notwendig ist, die in Funktion realisiert wird.
- Wird der Kontrollfluss durch einen Verknüpfungsoperator verzweigt, so muss dieser im weiteren Prozessverlauf auch durch einen Operator des gleichen Typs wieder geschlossen werden.

Ein Beispiel für eine EPK zur Installation eines Baugrubenverbaus mit Erdaushub und Installation eines Sensors ist in Abbildung 21 gegeben.

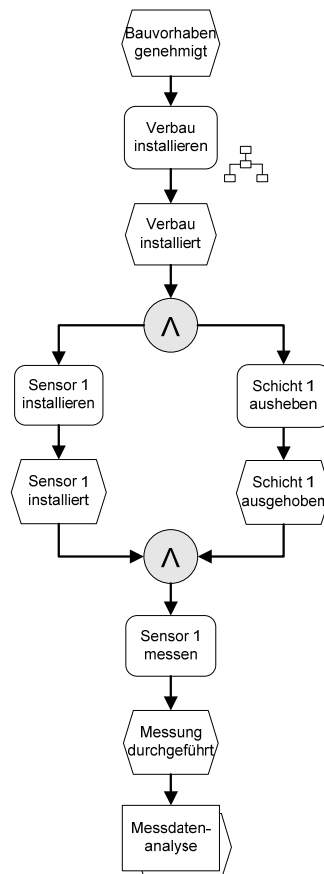


Abbildung 21: Beispiel-EPK

Die Funktion „Verbau installieren“ wird dabei durch eine weitere EPK detailliert (s. Detaillierungssymbol). Die Installation des Sensors 1 und der Aushub der Schicht 1 werden nebenläufig ausgeführt. Nach dem Abschluss beider Aktivitäten, der durch die jeweiligen Folgeereignisse festgestellt wird, wird eine Messung mit Sensor 1 ausgeführt. Nach Durchführung der Messung sollen die Messdaten analysiert werden. Der Prozess zur Messdatenanalyse wird in der EPK „Messdatenanalyse“ beschrieben (Prozesswegweiser).

Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass die EPK als graphische Notationssprache nur den Zweck der Dokumentation eines Prozesses erfüllt. Die Elemente der EPK sowie der Gedanke, hierarchische Prozessmodelle zu entwickeln, sind jedoch eine gute Basis für die Entwicklung eines implementierungsfähigen Metamodells. Der EPK-Ansatz wird daher bei der Entwicklung des beschreibungslogikbasierten Produkt-Prozess-Modells in Kap. 5.3.2 wieder aufgegriffen, um ihn mit den Aspekten der 3D-Produktmodellierung zu verknüpfen und in Beschreibungslogik zu beschreiben.

Simulation von Prozessen

Zur Simulation von Prozessen finden meist Petri-Netze (Petri, 1962) Verwendung. Sie basieren auf einer gerichteten Graphen-Struktur und dienen der strukturellen und verhaltensorientierten Beschreibung und Simulation von Prozessen. Insbesondere werden häufig Bereitstellungsprobleme bei Produktionsprozessen sowie die Durchgängigkeit von Informationsflüssen durch Petrinetzsimulation untersucht. Petrinetze finden im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Verwendung, jedoch sollen sie nicht unerwähnt bleiben, da ähnliche Arbeiten, die sich ebenfalls mit der Prozessmodellierung im geotechnischen Ingenieurbau beschäftigten auf Petrinetzen aufbauen. Angesprochen ist hier die Forschung von (Rüppel, Meissner, & Greb, 2004), (Katzenbach & Giere, 2005) und (Katzenbach, Rüppel, Meißner, Giere, & Wagenknecht, 2006). Inhalt dieser Forschung ist die formale Beschreibung und Analyse von kooperativen Planungsprozessen im Grundbau auf Basis eines Petri-Netz-basierten Prozessmodells, wobei für den Aufbau der Prozessmodelle ebenfalls Prozessmuster verwendet werden. Ziel ist die prozessorientierte Vernetzung und Steuerung von Fachplanungen, wobei es darum geht, Fachinformationen während des Planungsprozesses zwischen den Bearbeitern auszutauschen. Zum Zweck des Austausches von Fachinformationen werden Petrinetze mit individuellen Marken (colored Petri Nets) verwendet, um eine Verbindung zwischen Prozessmodell und Produktmodell herzustellen. Hierbei werden die Marken des Prozessmodells mit Informationen aus dem Produktmodell assoziiert, wobei die individuellen Marken die Art der erforderlichen bzw. auszutauschenden Information repräsentieren. Ergebnis der Forschung ist die vernetzte Kooperationsumgebung ProMiSE (Process Modelling in Structural Engineering). Der ProMiSE Server dient zur Koordination der Kommunikation zwischen den Planungsbeteiligten.

Die zitierte Forschung unterscheidet sich von der vorliegenden Arbeit in folgenden wesentlichen Punkten:

- Das Anwendungsgebiet in dieser Arbeit ist nicht der Planungsprozess, sondern der Ausführungs- und Überwachungsprozess.
- Die Zielsetzung der Prozessmodellierung ist nicht die Analyse der Prozesse bezüglich möglicher Modellierungsfehler bzw. möglicher Bereitstellungsprobleme von Informationen, sondern die Repräsentation der prozessgebundenen Daten, Informationen und Wissen in Bezug zum Bauverfahren und zur messtechnischen Überwachung.
- Die Verknüpfung des Prozessmodells mit dem Produktmodell erfolgt auf Aktivitätsebene (Prozessmodell) und Objektebene (Produktmodell) mit dem Ziel der logischen Zuordnung und Auswertbarkeit, d. h. Ziel ist es nicht, zu analysieren, welche Daten bei welchem Prozessschritt auszutauschen sind, sondern die zu Objekten gehörigen Daten formal zu repräsentieren und gezielt nach logischen Kriterien abfragen zu können, um eine Prozesssteuerung zu realisieren.

Ausführung von Prozessen

Die Definition ausführbarer Prozesse hat immer das Ziel, diese Prozesse durch eine Prozessengine ausführen zu lassen. Prozessausführungssprachen richten sich damit auf informationstransformierende Prozesse. Für informationstransformierende Prozesse wurden einige Ausführungssprachen entwickelt. Die Sprachen XLANG von Microsoft (Thatte, 2001), Web Services Flow Language WSFL von IBM (Wesley, 2002), die aus der Kombination dieser beiden Sprachen entstandene Business Process Execution Language BPEL (OASIS, 2007), sowie die XML Process Definition Language XPDL (WFMC, 2008) sind nur einige Beispiele dafür. Die durch die Industrie am meisten unterstützte Sprache ist die auch in dieser Arbeit verwendete Business Process Execution Language (BPEL). BPEL ist eine XML-basierte Sprache zur Steuerung des Informationsflusses zwischen Webservices, die die algorithmische Umsetzung von Problemen unter Nutzung von webbasierten Softwarekomponenten ermöglicht. Sie setzt damit zwei wesentliche Konzepte um:

- Komponentenbasierte Softwareentwicklung: Softwarekomponenten können wiederverwendet und flexibel zu größeren Softwaresystemen integriert werden. Dieser auch als „Programmieren im Großen“ bekannte Ansatz ermöglicht eine erhebliche Effizienzsteigerung bei der Erstellung von Softwareanwendungen.
- Nutzung von Web-Ressourcen: Die zu orchestrierenden Softwareanwendungen stehen als Webservices im Internet zur Verfügung. D. h. sie sind für eine größere Anzahl von Nutzern verfügbar, und können ohne Installation auf dem eigenen Rechner ausgeführt werden. BPEL agiert dabei im Sinne der Kommunikationssteuerung als Informationslogistikkomponente und übermittelt die Nachrichten zwischen den Webservices.

4.2. Grundlagen der Daten-, Informations- und Wissensrepräsentation

Die Semiautomatisierung der baubegleitenden Überwachung mit Systemidentifikation, Modellanpassung und Adaption des Bauverfahrens erfordert die Repräsentation von Daten, Information und Wissen in maschinenverarbeitbarer Form. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Definition nach der DIKW-Hierarchie genutzt, um zwischen Daten, Informationen und Wissen aufgrund ihrer Struktur und ihres semantischen Gehalts zu unterscheiden.

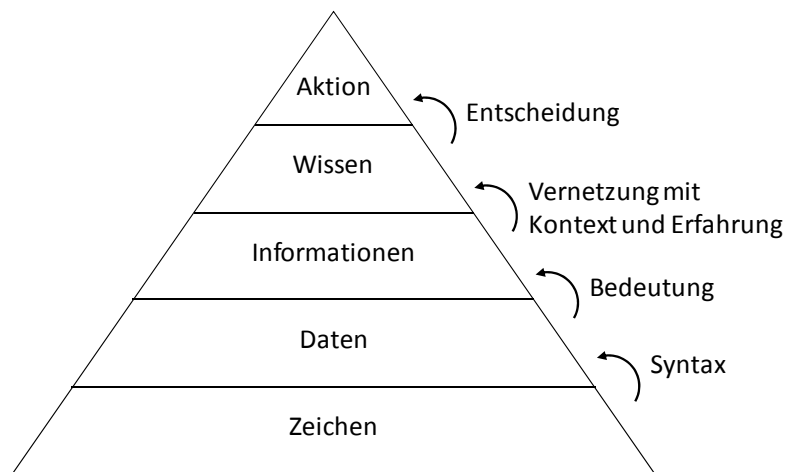


Abbildung 22: Wissenspyramide nach (Aamodt & Nygard, 1995)

Nach (Zins, 2007) sind Daten das Rohmaterial, das sich aus der Wahrnehmung von Objekten und Ereignissen ergibt. Daten an sich haben nur einen geringen Nutzen. Um sie verarbeiten zu können müssen sie strukturiert und in einen Kontext eingeordnet werden. Strukturierte Daten bezeichnet man als Informationen. Das Treffen von Entscheidungen auf der Grundlage der Information erfordert jedoch noch etwas mehr. Es erfordert die Einordnung in einen Kontext, d.h. die Information, welche Beziehungen zwischen den Objekten, die durch die Daten / Informationen repräsentiert werden bestehen, also wie die Informationen miteinander vernetzt sind. Diese Erweiterung der Information bezeichnet man als Wissen.

Im Rahmen der Wissensverarbeitung ist Wissen die „Speicherung, Integration und Organisation von Information im Gedächtnis. [...] Wissen ist organisierte Information, es ist Teil eines Systems oder Netzes aus strukturierten Informationen.“ (Solso, 2005)

Jenseits aller philosophischen Betrachtungen des Begriffes Wissen sollte festgehalten werden, dass Wissen die Voraussetzung für Entscheidungen ist und dass die (auch teilweise) Automatisierung von Entscheidungen es erfordert, Wissen, Informationen und Daten durch Formalisierung maschinenverarbeitbar zu machen. Man spricht hierbei auch von Wissensrepräsentation.

Wissen kann in unterschiedlicher Art und Weise repräsentiert werden. Es kann z.B. explizit durch mathematische Funktionen oder durch Logiken beschrieben oder implizit in Algorithmen gekapselt sein. Die Wissensrepräsentation durch mathematische Funktionen ist im Ingenieurwesen die übliche Vorgehensweise. Selbstverständlich werden mathematische Funktionen (Modelle) identifiziert, die physikalische Zusammenhänge abbilden. Man denke z. B. an Materialgesetze, die für ein bestimmtes Material den Zusammenhang zwischen Kraftgrößen und Verformungsgrößen durch eine mathematische Funktion abbilden. Durch die Anwendung physikalischer Gesetze und durch Versuche werden diese Abhängigkeiten und die Einflussparameter analysiert und durch ein mathematisches Modell beschrieben. Die Repräsentation dieses Wissens über physikalische Zusammenhänge durch ein mathematisches Modell ermöglicht es, aus dem Verhalten des Materials auf das Verhalten eines Bauwerks zu schließen und somit Prognosen über die Sicherheit des Bauwerks zu erstellen.

Es gibt jedoch auch Wissen, das sich nicht durch mathematische Funktionen, sondern durch Regeln der Art „Wenn-Dann-Sonst“, also Prämisse und Konklusion darstellen lässt. Eine Menge derartiger Regeln wird als Regelbasis bezeichnet und stellt zusammen mit einer Faktenbasis, die domänenspezifische Informationen enthält, ein regelbasiertes System dar. Diese Art wissensbasierter Systeme kann durch logisches Schließen (Inferenz) ausgewertet werden. Die Realisierung von Regelinterpretern (Inferenzmaschinen) zur automatischen logischen Schlussfolgerung eröffnet auch für den Einsatz im Rahmen der Wissensverarbeitung im Bauwesen neue Möglichkeiten der Automatisierung.

Vor allem die Möglichkeit, neben einfachen Regeln auch aus transitiven Beziehungen durch Vorwärts- oder Rückwärtsverkettung implizit vorhandenes Wissen explizit zu machen, stellt einen erheblichen Fortschritt dar. Die Nutzung transitiver Beziehungen in Kombination mit Schlussregeln ermöglicht es, komplexe Zusammenhänge durch die Verkettung vieler einfacher Zusammenhänge zu repräsentieren und die Re-Kombination des komplexen Zusammenhangs maschinell vorzunehmen. Damit kann die Komplexität zum Teil vom Menschen (Endanwender oder auch Entwickler) auf die Maschine übertragen werden.

Die Abbildung 23 zeigt die qualitative Abhängigkeit des Wissens vom semantischen Gehalt der Repräsentationsmethode.

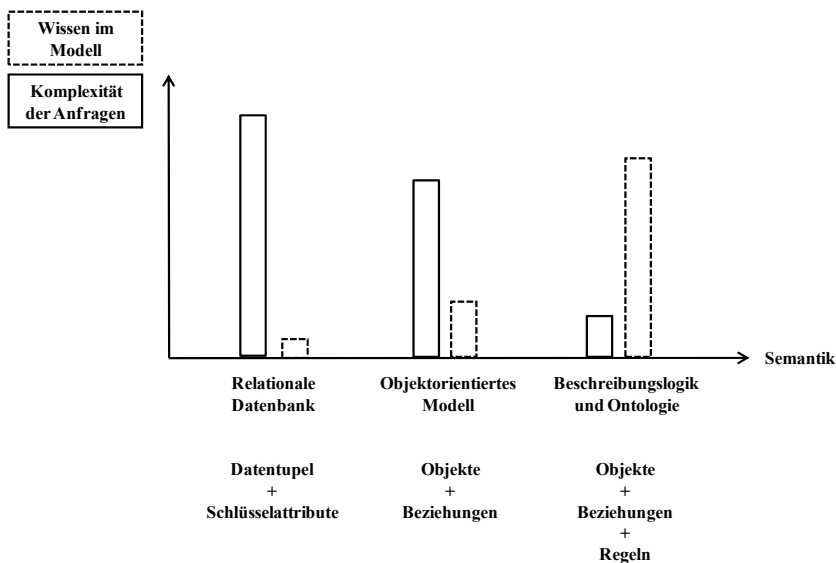


Abbildung 23: Abhängigkeit des Wissens vom semantischen Gehalt der Repräsentationsmethode

Der semantische Gehalt von Datenbanken (Daten und Information) ist gering. Die Abfrage von Daten nach logischen Kriterien erfordert eine umfangreiche Kenntnis des Datenbankmodells und eine umfangreiche Kodierung der Abfragelogik.

Die Ergänzung durch semantische Beziehungen in einem objektorientierten Modell entspricht einer Erhöhung des semantischen Gehalts. Die Modellierung von Objekten und ihrer Beziehungen untereinander ermöglicht die direkte Abfrage von Objekten und Beziehungen, ohne den Abgleich von Schlüsselattributen, wie dies im relationalen Datenbankmodell der Fall ist.

Das Hinzufügen weiterer Beziehungen und Regeln in Form von Beschreibungslogiken und Ontologien erhöht den semantischen Gehalt nochmals.

In diesem Zusammenhang kann festgestellt werden, dass die Komplexität der Abfragen an eine Daten- oder Wissensbasis von deren semantischen Gehalt, d.h. von ihrer Ausdruckstärke, abhängt. So ist bei einer reinen Datenrepräsentation die Anforderung an die Abfrage relativ hoch, da die komplette Logik in der Abfrage zu formulieren ist. Bei Abfragen an eine Wissensbasis, in der Beziehungen und Regeln für deren weitere Verknüpfung vorformuliert sind, kann durch logisches Schlussfolgern das implizit vorhandene Wissen explizit gemacht, also zusätzliche Beziehungen eingefügt, werden. Daraus ergibt sich als Konsequenz, dass die Anfragen, die an eine derartige Wissensbasis gestellt werden eine einfachere Form haben können.

Diese Eigenschaften können auch für das Bauwesen genutzt werden. Bisherige einfache Informationsmodelle, die einer rein syntaktischen Strukturierung der Daten entspre-

chen, sollen soweit sie überhaupt vorhanden sind zu Wissensbasen ausgebaut werden, um sie einer Auswertung durch automatisches logisches Schließen zugänglich zu machen.

Damit erlangt auch die Entwicklung und Anwendung neuer semantischer Informationsmodelle für bisher nicht erschlossene Anwendungsdomänen (wie z. B. in dieser Arbeit der geotechnische Ingenieurbau an sich sowie deren Überwachung) an Bedeutung.

4.2.1. Relationales Modell

Das bis heute überwiegend etablierte Modell zur Strukturierung von Daten ist das von (Codd E. F., 1970) erstmals vorgestellte relationale Modell. Das relationale Modell basiert auf Relationen R . Relationen in diesem Sinne sind geordnete Paare von Individuen, die auch wieder Individuen sind (DIN 5473, 1992), wobei sich der Begriff „Individuum“ hier auf Datentupel t bezieht. Jedes Tupel t besteht aus mehreren Werten w , die Realisierungen der Attribute A darstellen. Die Paarbildung wird durch Schlüsselattribute vorgenommen, die über Verbundbedingungen verknüpft werden. Die Auswertung der relationalen Modelle erfolgt mit den Methoden der relationalen Algebra (Codd E. F., 1990).

Es existiert ein Minimum von sechs wesentlichen Grundoperationen der Relationenalgebra, die für das Arbeiten mit relationalen Datenstrukturen notwendig sind, und durch deren Kombination weitere Operationen ableitbar sind (Pernul & Unland, 2003):

1. Projektion

Aus der Relation R wird eine neue Relation erzeugt, die aus allen Tupeln t von R besteht, eingeschränkt auf die angegebene Auswahl von Attributen A_1 bis A_m .

$$\pi_{\{attr_1, \dots, attr_m\}} R := \left\{ \langle w_1, \dots, w_m \rangle \mid \{A_1, \dots, A_m\} \subseteq \{A_1, \dots, A_n\}^R \wedge \right. \\ \left. \exists t \in R (t = \langle w_1, \dots, w_m, \dots, w_n \rangle) \right\}$$

2. Restriktion

Aus der Relation R wird eine neue Relation erzeugt, die alle Tupeln aus R enthält, die der angegebenen Bedingung genügen.

$$\sigma_{\text{Bedingung}}(R) := \{t \mid t \in R \wedge \text{Bedingung}(t) = \text{TRUE}\}$$

3. Vereinigung

Aus den zwei Relationen R_m und R_t wird eine neue Relation erzeugt, die alle Tupeln (Datensätze) enthält, die in wenigstens einer der beiden Relationen vorkommen.

$$R_m \cup R_t := \{t \mid t \in R_m \vee t \in R_t\}$$

4. Differenz

Aus den beiden Relationen R_m und R_t wird eine neue Relation erzeugt, die nur die Tupeln enthält, die in R_m , aber nicht in R_t vorkommen.

$$R_m \setminus R_t := \{t \mid t \in R_m \wedge t \notin R_t\}$$

5. Umbenennung

Diese Operation dient der Umbenennung von Attributen und Relationen. Sie hat ihre Hauptbedeutung bei der Umsetzung des relationalen Modells in eine relationale Datenbank, insbesondere zur Vermeidung gleicher Attributnamen in unterschiedlichen Relationen, um z.B. einen automatischen natürlichen Verbund zu vermeiden oder Mengenoperationen aus Relationen mit unterschiedlichen Attributnamen zu ermöglichen.

6. Kreuzprodukt

Aus den beiden Relationen R_m und R_t wird eine neue Relation erzeugt, die aus allen möglichen Kombinationen der Tupeln der beiden Relationen bestehen.

$$R_m \times R_t := \left\{ \langle w_1, \dots, w_m, w_{m+1}, \dots, w_{m+t} \rangle \mid \begin{array}{l} \exists t_m \in R_m (t_m(A_1, \dots, A_m) = \langle w_1, \dots, w_m \rangle) \wedge \\ \exists t_t \in R_t (t_t(A_{m+1}, \dots, A_{m+t}) = \langle w_{m+1}, \dots, w_{m+t} \rangle) \end{array} \right\}$$

Das Kreuzprodukt ist die allgemeine Form des Verbundes von Relationen, aus der durch Anwendung der Restriktion mit unterschiedlichen Bedingungen weitere Arten von Verbunden abgeleitet werden können. Die am häufigsten ausgeführte Operation zur Verknüpfung von Tabellen ist die Bildung des Kreuzprodukts mit Projektion und anschließender Restriktion unter Verwendung einer Gleichverbundbedingung. Das Kreuzprodukt ist insbesondere bei der Bildung von Modellkandidaten (S. 140) in einer relationalen Datenbank von Bedeutung.

Das relationale Modell setzt einen kleinen Teil der Prädikatenlogik um, ohne jedoch auf die Bedeutung der Prädikate und der über sie verknüpften Datentupeln einzugehen. Diese Eigenschaft verleiht dem Modell bei der Umsetzung in eine relationale Datenbank den Vorteil einer guten Performanz, da Daten speichersparend und gut strukturiert gespeichert und effizient abgefragt werden können. Gleichzeitig ist die Umsetzung der Prädikate ohne deren Bedeutung ein wesentlicher Nachteil, wenn höherwertiges Wissen repräsentiert werden soll, da die Semantik der Verknüpfungen nicht im Modell mit abgebildet wird. Es handelt sich also um eine rein syntaktische Strukturierung von Daten, die durch atomare Speicherung, relationale Verknüpfung und durch die Bildung ihres Kreuzproduktes mit anschließender Restriktion und Projektion abgefragt und in der gewünschten tabellarischen Form dargestellt werden können.

Die Bedeutung sowohl der Datentupel als auch deren Verknüpfung untereinander ist für die Speicherung der Daten grundsätzlich noch nicht von Belang. Die Abfrage von Daten in einer sinnvollen Form und Zusammenstellung jedoch erfordert Wissen über die syntaktische Strukturierung und Verknüpfung der Daten und über deren Bedeutung. Dieses Wissen muss beim Anwender/Programmierer der Datenbank vorliegen.

Ein weiterer Nachteil ist, dass die Relationale Algebra an sich rekursive Anfragen nicht unterstützt und damit die Explikation transitiver Relationen, also ihre Erweiterung um die indirekt über weitere Prädikate verknüpfte Beziehungen, nicht direkt möglich ist. Die Abbildung rekursiver Beziehungen ist bei der Repräsentation von Objekten, insbesondere bei der Repräsentation von Prozessen, von erheblicher Bedeutung. Die Bestimmung von transitiven Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zum Beispiel ist bei Prozessen ein rekursives Problem, das von großer praktischer Relevanz ist. Die transitive Hülle der Beziehungen zwischen Informationsobjekten ist, wie sich in den folgenden Kapiteln noch zeigen wird, bei der Abfrage von Informationen von erheblichem Wert.

4.2.2. Entitäts-Beziehungs-Modell

Zusätzlich zur Strukturierung der Daten ist verstärkt auch die Repräsentation und Verarbeitung von Wissen erforderlich. Hierzu sind Modelle erforderlich, die hochwertigere Konzepte der Logik umsetzen. Derartige Modelle werden als „Semantische Datenmodelle“ bezeichnet. Einen wesentlichen Schritt in diese Richtung hat (Chen, 1976) mit der Entwicklung des Entitäts-Beziehungs-Modells (Entity-Relationship-Model, ER-Modell) erreicht.

Das ER-Modell nach (Chen, 1976) basiert auf

- Mengentheorie,
- Relationen im Sinne der Mathematik,
- Abstrakter Algebra,
- Logik und
- Verbandstheorie (Lattice Theory).

Der Grundgedanke dieses Modells ist weniger die Modellierung und Strukturierung von Daten, sondern eher die Abbildung von Objekten (Entitäten, Individuen) der Realwelt und deren Beziehungen untereinander, denen Attribute zur näheren Beschreibung zugeordnet sind. Die formale Definition der Entity-Relationship-Modellierung nach (Chen, 1976) ist nachfolgend gegeben.

Die Elemente des Entitäts-Beziehungs-Modells sind:

- (1) Entitäten (Entity) e ,
- (2) Beziehungen (Relationships) r
- (3) Attribute (Values) v .

Desweiteren existiert für jedes dieser Elemente eine Abstraktion durch die die gemeinsamen Eigenschaften von Mengen von Entitäten, Beziehungen und Attributen definiert werden.

Demnach werden diese Elemente zu

- (1) Entitätsmengen (Entity Set) E ; $e \in E$,
- (2) Beziehungsmengen (Relationship Set) R ; $r \in R$ und
- (3) Attributmengen (Value Set) V ; $v \in V$

zusammengefasst.

Eine Beziehungsmenge ist schließlich als „mathematische Relation“ auf der Basis von Entitätsmengen wie folgt definiert (Chen, 1976):

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$$

$$ri = [e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in}] | e_{i1} \in E_1, \dots, e_{in} \in E_n \quad (11)$$

Es werden damit die Grundelemente der Prädikatenlogik umgesetzt. Entitäten entsprechen dem in der Logik verwendeten Begriff der Individuen, die als Elemente von Klassen (Entitätstypen) auftreten. Zwischen den Elementen können Relationen (Beziehungen, Prädikate) bestehen. Ein ER-Modell entspricht also einem Fragment der Prädikatenlogik. Neben der Definition von Entitätstypen, Beziehungen, der Komplexität von Beziehungstypen sowie der Definition einfacher Datentypen ist auch die Modellierung etwas komplexerer Semantik möglich, z.B. Spezialisierung (Entitätstyp als Teilmenge eines anderen Entitätstyps) und Generalisierung (Zusammenführen gleicher Einzelobjekte, die in verschiedenen Entitätstypen vorkommen zu einem neuen Entitätstyp) sowie Mengen- und Rollenaggregation. Weiterentwicklungen des Chen ER-Modells (Chen, 2002) berücksichtigen ferner die Möglichkeit der Generalisierung/Spezialisierung von Entitäten und Beziehungen durch is-a Beziehungen sowie Aggregation und Zerlegung von Entitäten mit is-part-of Beziehungen.

Der Hauptunterschied zwischen dem Relationalen Modell und dem ER-Modell besteht in der Art und der Umsetzung der *Relationen im Sinne der Mathematik*. Während im relationalen Modell mathematische Relationen Mengen von Datentupeln verknüpfen, verknüpfen sie im ER-Modell Entitäten bzw. Entitätstypen miteinander. Beide Modelle basieren auf der Prädikatenlogik 1. Stufe. Dem Unterschied bezüglich der mathematischen Relation wird auch in der Bezeichnung Rechnung getragen. So wird das Prädikat aus Tupeln des Relationalen Modells als Relation (engl. Relation) bezeichnet, während die Prädikate im ER-Modell als Beziehung (engl. Relationship) bezeichnet werden.

Auch die Umsetzung der Verknüpfungen ist unterschiedlich. Das Relationale Modell setzt die Verknüpfung implizit über Attribute um, die eine Verbundbedingung erfüllen, während beim ER-Modell Beziehungen explizite eigenständige „Objekte“ sind. Insbesondere dieser Punkt ermöglicht einen wesentlich höheren semantischen Gehalt bei der Repräsentation von Informationen einerseits und ermöglicht auch die Abbildung rekursiver Beziehungen andererseits.

Zur graphischen Repräsentation von ER-Modellen stehen eine Reihe von graphischen Notationssprachen wie die Chen-Notation (Chen, 1976), EXPRESS-G (ISO 10303-11:2004) und UML (Object Management Group (OMG), 2009) zur Verfügung. Üblicherweise erfolgt die Entwicklung einer Datenstruktur mehrstufig. Hierbei unterscheidet man in vier prinzipielle Stufen:

1. Objekterhebung (Objekt-Glossar)
2. Informationsfluss-Erhebung (z.B. in IDEF0)
3. Entwurf der Datenstruktur in graphischer Notation
4. Detaillierte Ausarbeitung der Datenstruktur in formaler Notation

4.2.3. Beschreibungslogiken und logisches Schlussfolgern

Beschreibungslogiken setzen einen über die Möglichkeiten der ER-Modellierung hinausgehenden Teil der Prädikatenlogik um. Neben der Möglichkeit, Individuen und Klassen sowie deren Beziehungen untereinander zu modellieren, bieten einige Beschreibungslogiken die notwendige Ausdrucksstärke², um komplexe Klassen durch Klassenkonstruktoren zu erzeugen (Baader F. , 2009). Dies stellt insofern eine wesentliche Erweiterung zur ER-Modellierung dar, da diese lediglich die Ausdrucksfähigkeit besitzen, um Klassen und Objekte sowie deren Beziehungen untereinander zu repräsentieren. Die Definition einer Klasse durch deren Beziehungen zu anderen Klassen ist jedoch ein völlig anderer Gesichtspunkt, der es ermöglicht, Wissen mit wesentlich höherer Komplexität zu repräsentieren, als dies durch ein ER-Modell möglich ist. Nachfolgend werden einige theoretische Grundlagen, die für das Verständnis der weiteren Arbeit wesentlich sind, aus (Baader & Nutt, 2003), (Baader F. , 2009) und (Hitzler, Krötzsch, Rudolph, & Sure, 2008) kurz zusammengefasst und ihre Bedeutung für diese Arbeit anhand einfacher Beispiele erklärt.

Eine beschreibungslogikbasierte Wissensbasis besteht aus zwei Komponenten: TBox und ABox (Baader & Nutt, 2003).

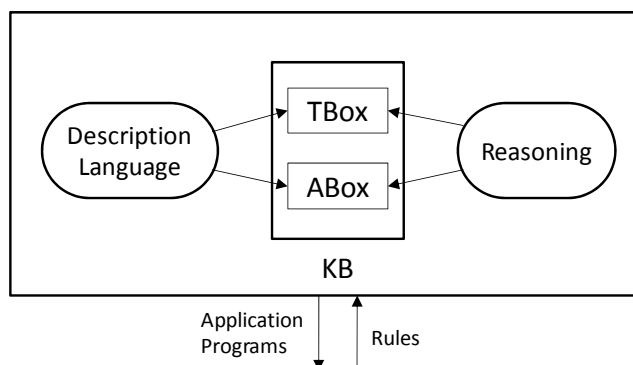


Abbildung 24: Komponenten einer Wissensbasis (Baader & Nutt, 2003)

Das terminologische Wissen der TBox umfasst Klassen (= Konzepte = Mengen von Individuen) und Rollen (binäre Beziehungen zwischen Individuen), und ermöglicht deren komplexe Beschreibung, während die ABox das assertionale Instanzwissen über die Individuen repräsentiert.

Im Rahmen dieser Arbeit sind die Beschreibungslogiken $\mathcal{AL}^3$, $\mathcal{ALC}$ und $\mathcal{SHOIN}(\mathcal{D})$ von Bedeutung, da sie aufeinander aufbauen und die theoretische Grundlage für die verwendete XML-basierte Implementierungssprache OWL-DL bilden.

² Die Ausdrucksstärke ist ein Maß dafür, was mit einer formalen Logik definiert bzw. bewiesen werden kann

³ Eingeführt in (Schmidt-Schauß & Smolka, 1991) als minimale Sprache von praktischem Interesse (Baader & Nutt, 2003)

Die Grundlegenden Bestandteile von $\mathcal{AL}$ sind komplexe Klassen C , D sowie Rollen R .

Komplexe Klassen können auf Basis der in Tabelle 3 gegebenen Konstruktoren definiert werden. Die formale Semantik der $\mathcal{AL}$ -Konstruktoren wird auf Basis der Interpretationen $\mathcal{I}$, die Elemente einer nichtleeren Menge $\Delta^{\mathcal{I}}$ (Domäne der Interpretation) sind, definiert.

Tabelle 3: Konstruktoren der Beschreibungslogik $\mathcal{AL}^4$

Zeichen	Bezeichnung	Semantik
A	Atomare Klasse	$A^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta^{\mathcal{I}}$
R	Atomare Rolle	$R^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}}$
$\top$	Allklasse	$\top^{\mathcal{I}} = \Delta^{\mathcal{I}}$
$\perp$	Leere Klasse	$\perp^{\mathcal{I}} = \emptyset$
$\neg A$	Atomare Negation	$(\neg A)^{\mathcal{I}} = \Delta^{\mathcal{I}} \setminus A^{\mathcal{I}}$
$C \sqcap D$	Konjunktion	$(C \sqcap D)^{\mathcal{I}} = C^{\mathcal{I}} \cap D^{\mathcal{I}}$
$\forall R . C$	Rollenrestriktion	$(\forall R . C)^{\mathcal{I}} = \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \forall b. (a, b) \in R^{\mathcal{I}} \rightarrow b \in C^{\mathcal{I}}\}$
$\exists R . \top$	Eingeschränkte existenzielle Quantifikation	$(\exists R . \top)^{\mathcal{I}} = \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \exists b. (a, b) \in R^{\mathcal{I}}\}$

Ein kurzer Hinweis sei zur Lesart der Notation $\forall R . C$ gegeben: $\forall R . C$ sagt aus, dass alle Individuen b , die über die Relation R einem Individuum a zugeordnet sind, zur Klasse C gehören. Der Punkt kann in diesem Zusammenhang in etwa mit dem Wort „gilt“ übersetzt werden. Bei Verwendung des Punktes in der Form $\forall b. (a, b) \in R^{\mathcal{I}}$ entspricht die Bedeutung in etwa dem Wort „mit“.

Die Definition komplexer Klassen erfolgt schließlich nach der Syntax, bzw. der Syntaxmenge, die mit der rechten Seite der Gl. (12) (Hitzler, Krötzsch, Rudolph, & Sure, 2008) wiedergegeben wird

$$C, D \rightarrow A \mid \top \mid \perp \mid \neg A \mid C \sqcap D \mid \forall R . C \mid \exists R . \top \quad (12)$$

über terminologische Axiome, die im Allgemeinen die Form einer Inklusion $C \sqsubseteq D$ oder einer Äquivalenz $C \equiv D$ haben (Baader & Nutt, 2003).

$$C \sqsubseteq D \text{ ist definiert als } C^{\mathcal{I}} \subseteq D^{\mathcal{I}} \quad (13)$$

$$C \equiv D \text{ ist definiert als } C^{\mathcal{I}} = D^{\mathcal{I}} \quad (14)$$

⁴ Zusammengestellt aus (Baader & Nutt, 2003), (Baader F. , 2009), (Hitzler, Krötzsch, Rudolph, & Sure, 2008)

Die Inklusion ermöglicht auch die Generalisierung/Spezialisierung durch Unterklassenbildung (Subsumtion). Eine Klasse C wird subsumiert durch eine Klasse D , wenn für jedes *Modell* der T-Box $\mathcal{T}$ die Menge C eine Teilmenge von D , also $C \sqsubseteq D$ ist (Baader & Nutt, 2003).

Als Beispiel für die Klassendefinition über Inklusion sei die Nutzung der Quantoren $\forall$ und $\exists$ als Klassenkonstruktoren angeführt (Hitzler, Krötzsch, Rudolph, & Sure, 2008). Sie ermöglichen die Definition von Klassen durch Ausdrücke in Form der Beispielausdrücke in Gl. (15).

$$D \sqsubseteq \forall R.C \text{ oder } D \sqsubseteq \exists R.T, \quad (15)$$

Damit ist eine Klasse durch ihre Beziehung zu anderen Klassen beschrieben.

Eine weitere Möglichkeit, Klassen durch die Beziehung zu anderen Klassen bzw. Individuen zu beschreiben, ist die Nutzung von Äquivalenzaxiomen. So kann z.B. durch die Konstrukte $\perp$ (leere Klasse) und $\top$ (Allklasse) die Disjunktheit zweier Klassen C und D dadurch ausgedrückt werden, dass deren Konjunktion

$$C \sqcap D \sqsubseteq \perp \quad (16)$$

die leere Klasse ergibt (Baader F., 2009).

$\mathcal{AL}$ bildet die Basis für eine Familie von $\mathcal{AL}$ -Logiken, die durch Erweiterung um zusätzliche Konstrukturen gebildet werden. Die Erweiterung um die volle existenzielle Quantifikation $\exists R.C$, die sich von der eingeschränkten existenziellen Quantifikation dahingehend unterscheidet, dass die Restriktion über die Rolle auf die Klasse C beschränkt ist, und nicht wie dort alle Klassen innerhalb der Domäne umfasst wird mit dem Symbol $\mathcal{E}$ gekennzeichnet. Die erweiterte Logik heißt damit $\mathcal{ALE}$. Desweiteren kann $\mathcal{AL}$ um die Disjunktion $C \sqcup D$ erweitert werden. Diese Erweiterung wird mit dem Symbol $\mathcal{U}$ gekennzeichnet. Die erweiterte $\mathcal{AL}$ wird damit als $\mathcal{ALU}$ bezeichnet. Hinzu kommt eine Erweiterung um die Negation beliebiger Klassen, z.B. $\neg C$, die mit dem Symbol $\mathcal{C}$ gekennzeichnet wird. Die Erweiterung von $\mathcal{AL}$ sowohl um die volle existenzielle Quantifikation als auch um die Disjunktion, sowie um die Negation beliebiger Klassen wird insgesamt unter dem Symbol $\mathcal{C}$ zusammengefasst, was schließlich zur Bezeichnung dieser Logik als $\mathcal{ALC}$ führt.

Klassen in $\mathcal{ALC}$ werden der folgenden Syntax entsprechend definiert:

$$C, D \rightarrow A | \top | \perp | \neg C | C \sqcap D | C \sqcup D | \forall R.C | \exists R.C \quad (17)$$

Die Erweiterung von $\mathcal{ALC}$ führt schließlich zur Beschreibungslogik $\mathcal{SHOIN}(\mathcal{D})$. Diese Logik ist für diese Arbeit insofern wichtig, da sie die theoretische Grundlage für die XML-basierte Sprache OWL-DL (W3C, 2004) ist, die zur Implementierung der konzeptuellen Modelle verwendet wurde. Die Sprachkonstrukte von $\mathcal{SHOIN}(\mathcal{D})$ sind aufbauend auf $\mathcal{AL}$ und $\mathcal{ALC}$ in Tabelle 4 wiedergegeben.

Tabelle 4: Sprachkonstrukte⁵ von $SHOIN(\mathcal{D})$, ACC , AL und ER

				Zeichen	Bezeichnung	Semantik
$SHOIN(\mathcal{D})$	ACC	ER		A	Atomare Klasse	$A^I \subseteq \Delta^I$
				R	Atomare Rolle	$R^I \subseteq \Delta^I \times \Delta^I$
		AL		$\top$	Allklasse	$\top^I = \Delta^I$
				$\perp$	Leere Klasse	$\perp^I = \emptyset$
				$\neg A$	Atomare Negation	$(\neg A)^I = \Delta^I \setminus A^I$
				$C \sqcap D$	Konjunktion	$(C \sqcap D)^I = C^I \cap D^I$
				$\forall R.C$	Rollenrestriktion	$(\forall R.C)^I = \{a \in \Delta^I \mid \forall b.(a,b) \in R^I \rightarrow b \in C^I\}$
				$\exists R.\top$	Eingeschränkte existenzielle Quantifikation	$(\exists R.\top)^I = \{a \in \Delta^I \mid \exists b.(a,b) \in R^I\}$
				$\exists R.C$	volle existenzielle Quantifikation	$(\exists R.C)^I = \{a \in \Delta^I \mid \exists b.(a,b) \in R^I \wedge b \in C^I\}$
				$C \sqcup D$	Disjunktion	$(C \sqcup D)^I = C^I \cup D^I$
				$\neg C$	Negation beliebiger Klassen	$(\neg C)^I = \Delta^I \setminus C^I$
				$\{\dots\}$	Abgeschlossene Klassen	
				$\leq n R$, $\geq n R$ bzw. $= n R$	Zahlenrestriktionen (n =Anzahl der Individuen b , die über die Relation R einem Individuum a zugewiesen werden)	$(\leq n R)^I = \{a \in \Delta^I \mid \ \{b \mid (a,b) \in R^I\}\ \leq n\}$ $(\geq n R)^I = \{a \in \Delta^I \mid \ \{b \mid (a,b) \in R^I\}\ \geq n\}$ $(= n R)^I = \{a \in \Delta^I \mid \ \{b \mid (a,b) \in R^I\}\ = n\}$
				$R \sqsubseteq S$ bzw. $R \equiv S$	Unterrollen und Rollenäquivalenz	$(R \sqsubseteq S)^I = R^I \subseteq S^I$ $(R \equiv S)^I = R^I = S^I$
				R^-	Inverse Rollen	$(R^-)^I = \{(b,a) \in \Delta^I \times \Delta^I \mid (a,b) \in R^I\}$

⁵ Zusammengestellt aus (Baader & Nutt, 2003), (Baader F., 2009), (Hitzler, Krötzsch, Rudolph, & Sure, 2008)

Tabelle 4 zeigt, wie mit zunehmender Erweiterung der sprachlichen Konstrukte einer Beschreibungslogik eine höhere Komplexität des Wissens repräsentiert werden kann. Desweiteren ist die aufbauende Erweiterung, angefangen bei ER-Modellen, über $\mathcal{AL}$, $\mathcal{ALC}$ bis zu $\mathcal{SHOIN}(\mathcal{D})$ dargestellt.

Nachfolgend soll an kleinen Beispielen der Einfluss der Ausdrucksstärke der dargestellten Beschreibungslogiken auf die Komplexität des repräsentierbaren Wissens demonstriert werden. Die Nutzung der Rollenrestriktionen, Zahlenrestriktionen sowie der existenziellen Quantifikation ist insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Konsistenzsicherung des logischen Systems notwendig.

Bei ER-Modellen besteht die Möglichkeit, atomare Klassen über jede beliebige Relation miteinander zu verbinden. Man kann z.B. Sensordaten als Subklasse von Daten definieren:

$\text{Sensordaten} \sqsubseteq \text{Daten}$

Die Modellierungsfreiheit kann aber auch in semantisch nicht sinnvollen Beziehungen resultieren. Demnach könnte man die Individuen Aktivität1 und Bauphase1 über das Prädikat *hatFußpunkt* einander zuordnen.

hatFußpunkt(Aktivität1, Bauphase1)

Total sinnlose Beziehungen dieser Art können mit den erweiterten Möglichkeiten ausdrucksstärkerer Logiken unterbunden werden.

In $\mathcal{AL}$ kann z.B. durch die Anwendung der Rollenrestriktion eine Klasse Aktivität derart definiert werden, dass alle Individuen, die einem zur Klasse Aktivität gehörenden Individuum zugeordnet werden entweder der Klasse Ereignis oder der Klasse Konnektor angehören müssen:

$\text{Aktivität} \sqsubseteq \forall \text{hat_direkten_Vorgänger.}(\text{Ereignis oder Konnektor})$

Die darüber hinausgehende Logik $\mathcal{ALC}$ ermöglicht durch die volle existenzielle Quantifikation eine Klassendefinition der folgenden Art:

$\text{Spundwand} \sqsubseteq \exists \text{hat_Fußpunkt.Punkt} \sqcap \exists \text{hat_Kopfpunkt.Punkt}$

Eine Spundwand ist damit derart definiert, dass ein Individuum der Klasse Punkt existiert, das Fußpunkt der Spundwand ist und es existiert ein Individuum der Klasse Punkt, das Kopfpunkt der Spundwand ist. Sowohl Kopfpunkt als auch Fußpunkt können dabei nur von der Klasse Punkt sein.

$\mathcal{SHOIN}(\mathcal{D})$ lässt darüber hinaus Klassenkonstruktionen zu, bei denen durch Zahlenrestriktionen die Anzahl zuzuordnender Individuen festgelegt werden kann.

$\text{Spundwand} \sqsubseteq = 1 \text{ hat_Fußpunkt} \sqcap \forall \text{hat_Fußpunkt.Punkt} \sqcap = 1 \text{ hat_Kopfpunkt} \sqcap \forall \text{hat_Kopfpunkt.Punkt}$

Nach dieser Definition muss einem Individuum der Klasse Spundwand genau 1 Fußpunkt der Klasse Punkt und genau 1 Kopfpunkt der Klasse Punkt zugeordnet werden.

Abhängig von der Ausdrucksstärke der Beschreibungslogik kann also Wissen mit unterschiedlicher Komplexität repräsentiert werden.

Das Hauptinteresse bei der Anwendung von Beschreibungslogiken gilt jedoch nicht nur der Repräsentation komplexen Wissens, sondern vor allem der Möglichkeit des logischen Schlussfolgerns. Nach (Salmon, 1973) befasst sich die Logik mit der Beziehung zwischen Prämissen und Konklusion. Sie „untersucht die Gültigkeit von Argumenten hinsichtlich ihrer Struktur unabhängig vom konkreten Inhalt der eigentlichen Aussagen.“ (Wikipedia, 2010) Das Ziehen von Schlüssen kann damit prinzipiell als Hauptziel der Logik angesehen werden. Logisches Schlussfolgern erlaubt es, implizit repräsentiertes Wissen aus dem explizit in einer Wissensbank enthaltenen Wissen abzuleiten (Baader & Nutt, 2003).

Nach (Peirce, 1905) existieren drei elementare Arten des logischen Schlussfolgerns (Hoffmann, 1999), die auch heute nach 100 Jahren noch aktuell sind:

- Deduktion
- Induktion
- Abduktion

Sowohl die Deduktion als auch die Induktion schließen aus Prämissen auf die Konklusion. Während sich bei der Deduktion aus wahren Prämissen notwendig eine wahre Konklusion ergibt, ist bei der Induktion aus wahren Prämissen eine wahre Konklusion zwar wahrscheinlich aber nicht notwendig. Dies rührt daher, dass bei der Deduktion der Informationsgehalt der Konklusion wenigstens implizit bereits in den Prämissen enthalten ist und lediglich explizit gemacht wird, während die durch Induktion erzeugte Konklusion Informationen enthält, die nicht einmal implizit in den Prämissen vorhanden sind, da sie eine Verallgemeinerung von möglicherweise unvollständigen Beobachtungen darstellt (Hoffmann, 1999). Demnach ist die Deduktion die zuverlässigere Art der Schlussfolgerung, während die Induktion zwar weniger zuverlässig ist, jedoch einen echten Erkenntnisgewinn bringt, da sie das Wissen durch Verallgemeinerung häufig aufgetretener Beobachtungen erweitert, wobei die Konfidenz der induktiven Schlüsse durch neue Erfahrungen erhöht werden kann. (Hoffmann, 1999) Entsprechend hat auch (Peirce, 1905) die Deduktion als „necessary reasoning“ und die Induktion als „experimental research“ bezeichnet.

Abduktion ist eine Schlussfolgerung, die aus einer Anzahl von Fakten auf eine Theorie schließen soll, die die Fakten begründet. Mit anderen Worten soll durch die Anwendung regelhaften Wissens die Begründung für eine Beobachtung gefunden werden. Die Abduktion zielt damit auf die Entwicklung neuer Ideen und Theorien. (Peirce, 1905) Die Abduktion ist die unsicherste Art der Schlussfolgerung, da für eine Beobachtung häufig eine Vielzahl an Begründungen in Frage kommt, und hierfür insbesondere das Problem der Vollständigkeit einer zugrundeliegenden Wissensbasis ungleich schwieriger handhabbar ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ausschließlich die automatische logische Schlussfolgerung durch Deduktion genutzt, wenngleich Anwendungsbereiche für Induktion und Abduktion, letztere insbesondere im Bereich der Ursachenfindung für ungeplantes Bauwerksverhalten, denkbar sind.

Beziehungen zwischen Klassen und/oder Individuen, die lediglich implizit gegeben sind können durch Deduktion expliziert werden. Dies trägt zu einer Erweiterung des expliziten Wissens über die modellierte Domäne bei. Deduktion ist nur auf der Basis

entscheidbarer Logiken möglich. Die Entscheidbarkeit einer Beschreibungslogik hängt von ihrer Komplexität ab. Sehr ausdrucksstarke Logiken sind in der Regel auch sehr komplex und haben daher häufig Inferenzprobleme oder sind sogar unentscheidbar, während sehr schwache Beschreibungslogiken zwar effiziente Schlussfolgerungsalgorithmen ermöglichen, aber zu wenig Ausdrucksstärke besitzen, um die wichtigsten Konzepte einer Anwendungsdomäne hinreichend zu repräsentieren (Schmidt-Schauß & Smolka, 1991). Um durch logisches Schließen möglichst viel Wissen explizit abzuleiten, sind also Beschreibungslogiken einzusetzen, deren Verhältnis zwischen Ausdrucksmächtigkeit und Entscheidbarkeit ausgewogen ist. *SHOIN(D)* hat sich diesbezüglich als ausgewogene Beschreibungslogiksprache erwiesen (Baader F. , 2009). Sie ist die theoretische Grundlage für die nachfolgend beschriebene und zur Erstellung der Wissensbasis in Kap. 5.3 angewandte XML-basierte Beschreibungslogiksprache OWL-DL.

Die Automatisierung der Deduktion erfordert deren Zugänglichmachung zu einer algorithmischen, syntaktischen Verarbeitung. D.h. alle Sacherhalte (Prämissen) und Regeln müssen formal repräsentiert sein. Eine Möglichkeit des syntaktischen Schlussfolgerns besteht in der Angabe von Deduktionsregeln.

Deduktionsregeln werden im Allgemeinen in der Form

$$\frac{s_1 \dots s_n}{s} R_i \quad (18)$$

angegeben (Hitzler, Krötzsch, Rudolph, & Sure, 2008). Die Inferenzrelation R_i leitet aus den gegebenen Sätzen $s_1, \dots, s_n$ (Prämissen) den Satz s (Konklusion) ab. So lässt sich z.B. aus den Prämissen

$$\begin{aligned} s_1 &:= a \rightarrow b \\ s_2 &:= b \rightarrow c \end{aligned} \quad (19)$$

die Konklusion

$$s := a \rightarrow c \quad (20)$$

über die Inferenzrelation R_1

$$\frac{a \rightarrow b \wedge b \rightarrow c}{a \rightarrow c} R_1 \quad (21)$$

schlussfolgern. Diese Inferenzrelation besagt, wenn aus a b folgt, und aus b c folgt, dann folgt aus a auch c . Es wird also die transitive Beziehung zwischen a und c , die durch die beiden Aussagen implizit gegeben ist, explizit abgeleitet.

Die Gesamtheit der für eine Logik gegebenen Deduktionsregeln nennt man Deduktionskalkül.

4.2.4. Ontologien und Semantic Web

Im Zusammenhang mit der Logik ist für die Modellierung der Realwelt die Erstellung von Ontologien ein wesentliches Thema. Ontologien, häufig definiert als Spezifikation einer gemeinsamen Konzeptualisierung (Gruber, 1993), sind Konzeptmodelle einer Fachdomäne, die der Definition und Klassifikation von Fachterminologien dienen. Ontologien sind dabei komplementär zur Logik. Beide Begriffe werden insbesondere im Rahmen der Technologieforschung im Zusammenhang mit dem Semantic Web immer mehr vermischt, sodass einem Außenstehenden die Einarbeitung stark erschwert wird. Eine sehr eingängige Abgrenzung der Begriffe Logik und Ontologie hat (Sowa, 2000) formuliert:

„Pure logic is ontologically neutral. It makes no presuppositions about what exists or may exist in any domain or any language for talking about the domain. To represent knowledge about a specific domain, it must be supplemented with an ontology that defines the categories of things in that domain and the terms that people use to talk about them. The ontology defines the words of a natural language, the predicates of predicate calculus, the concept and relation types of conceptual graphs, the classes of an object-oriented language, or the tables and fields of a relational database.“

Und etwas detaillierter erklärt (Sowa J. F., 2003):

“The subject of ontology is the study of the categories of things that exist or may exist in some domain. The product of such a study, called an ontology, is a catalog of the types of things that are assumed to exist in a domain of interest D from the perspective of a person who uses a language L for the purpose of talking about D. The types in the ontology represent the predicates, word senses, or concept and relation types of the language L when used to discuss topics in the domain D. An uninterpreted logic, such as predicate calculus, conceptual graphs, or KIF, is ontologically neutral. It imposes no constraints on the subject matter or the way the subject may be characterized. By itself, logic says nothing about anything, but the combination of logic with an ontology provides a language that can express relationships about the entities in the domain of interest.“

Das Semantic Web verfolgt das Ziel, Informationen mit Ontologien und Logiken zu formalisieren, um so die Basis für die Anwendung von Methoden zur Schlussfolgerung von Informationen aus implizit gegebenen Informationen zu schaffen.

Hierdurch ergeben sich Problemlösungen für (Hitzler, Krötzsch, Rudolph, & Sure, 2008):

- Das Auffinden relevanter Informationen
- Die Integration von Informationen aus verschiedenen Quellen und
- Die Nutzung impliziten Wissens.

Der Gedanke, die oben beschriebenen ontologischen und logischen Aspekte der Realwelt in maschinenlesbarer und maschinenverarbeitbarer Form zu repräsentieren, hat mit dem Fortschritt des Internet erheblichen Auftrieb erhalten. Bei der ursprünglichen Entwicklung der Semantic Web Technologien hat sich weniger die Frage nach der Maschinenverarbeitbarkeit von Logiken und Ontologien gestellt. Eher stand die Nutzung im Netz verteilter Ressourcen, insbesondere das Erreichen von Interoperabilität, im Vordergrund. Die in der formalen Logik angewandte Notation, die auf (Whitehead & Russell, 1910) zurückgeht, ist hierfür nicht geeignet. Durch entsprechend maschinenverarbeitbare Repräsentationssprachen kann Wissen im Internet in vernetzter Art und Weise zur Verfügung gestellt werden. Die Grundlagen dieser Logik- und Ontologiesprachen werden in Kap. 4.3 eingeführt.

4.3. Semantic Web Technologien

Die technologische Basis dieser Arbeit sind innovative Web-Technologien, die die Repräsentation von Daten und Wissen, deren gezielte Abfrage sowie die verteilte Informationsverarbeitung ermöglichen. Das Ziel, verteilte Informationen durchgängig verarbeiten zu können, hat zu erheblichen Standardisierungsbestrebungen der Technologien geführt. Die in dieser Arbeit verwendeten Technologien basieren zum Teil auf Standards des World Wide Web Consortiums und der Object Management Group.

Das World Wide Web Consortium (W3C) ist eine internationale Community bestehend aus Forschungsinstituten, namhaften Softwareunternehmen und öffentlichen Organisationen, die Webstandards entwickelt (<http://www.w3.org/>).

Die Object Management Group (OMG) ist ein internationales non-profit Konsortium der Computerindustrie, dem ebenfalls eine Reihe namhafter Softwareunternehmen und Forschungsinstitutionen angehören. Die OMG entwickelt insbesondere Standards zur Unternehmensintegration (<http://www.omg.org/>).

Beide Organisationen arbeiten bei ihren Standardisierungsbemühungen eng zusammen, wobei auf das W3C eher die Erarbeitung und Standardisierung von Internet-Grundlagentechnologien entfällt und die OMG ihren Fokus auf dem unternehmens- bzw. anwendungsübergreifenden Integrationsaspekt hat. Abbildung 25 zeigt das Schichtenmodell der als W3C-Technologie zusammengefassten Technologiestandards.

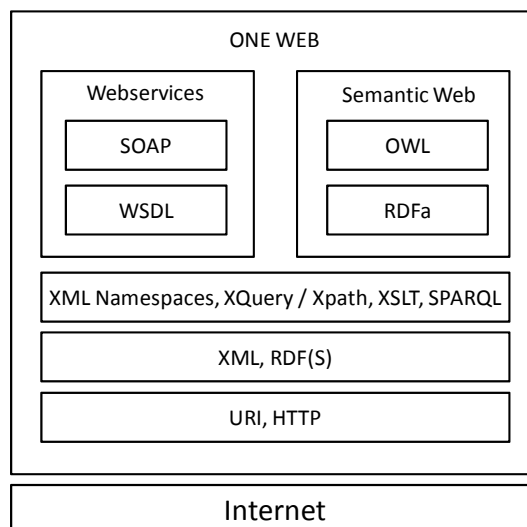


Abbildung 25: Auszug aus dem Schichtenmodell der W3C-Technologie

Das Schichtenmodell der W3C-Technologie basiert auf URI⁶, XML⁷, RDF⁸ und HTTP⁹, die die Grundlage für die Identifikation, Repräsentation und Kommunikation im www bilden.

⁶ Uniform Resource Identifier

⁷ Extensible Markup Language

URI dienen der eindeutigen Identifikation verteilter Ressourcen. Sie stellen zusammen mit Repräsentationssprachen wie XML und RDF sowie einem Übertragungsprotokoll, wie z.B. HTTP die Grundlage für die Kommunikation zwischen Softwarekomponenten dar.

Extensible Markup Language (XML)

Die XML ist eine einfache, flexible Auszeichnungssprache, die die Repräsentation von Daten in einer Baumstruktur erlaubt. Als Beispiel sei folgende Repräsentation einer Spundwand in XML gegeben (Abbildung 26):

```
<RetainingWall>
  <GlobalID>101</GlobalID>
  <WallID>1</WallID>
  <Point>
    <Name>Point1</Name>
    <x_coord>0</x_coord>
    <z_coord>0</z_coord>
  </Point>
  <Point>
    <Name>Point2</Name>
    <x_coord>0</x_coord>
    <z_coord>-30</z_coord>
  </Point>
</RetainingWall>
```

Abbildung 26: Beispiel XML-Repräsentation einer Verbauwand

XML ermöglicht die einheitliche Darstellung verschiedenartiger Daten, die Zusammenfassung atomarer Datentypen zu komplexen Datentypen durch die Baumstruktur sowie die Trennung von Schema und Instanz. Dies und die Möglichkeit der relativ einfachen Transformationsmöglichkeiten der XML-Datenstruktur durch Sprachen wie XSLT verbessert die Interoperabilität zwischen verschiedenen Anwendungen. Aufgrund ihrer diversen Vorteile ist XML die Grundlage für viele weitere Standards (RDF, OWL, SOAP, WSDL, BPEL, ...)

⁸ Resource Description Framework

⁹ Hypertext Transfer Protocol

Resource Description Framework (RDF)

Das Resource Description Framework (RDF) ist eine formale Sprache, die die Repräsentation von Informationen in Form eines gerichteten RDF-Graphen erlaubt, der mit Tripeln aus Subjekt, Prädikat und Objekt beschrieben wird (Abbildung 27).

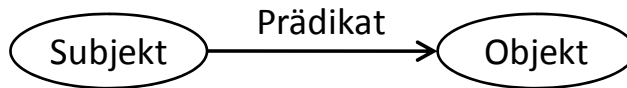


Abbildung 27: Konzept des RDF-Graphen (W3C)

Die Möglichkeit, Informationen als Graphen zu repräsentieren ist deswegen von Vorteil, weil damit allgemeine Beziehungen zwischen Ressourcen, die mit einer URL identifiziert werden ausgedrückt werden können (Hitzler, Krötzsch, Rudolph, & Sure, 2008). Dies ist ein erheblicher Vorteil gegenüber der Baumstruktur des reinen XML, da damit Informationen vernetzt werden können. RDF wird üblicherweise mit XML ausgedrückt und kann von einem beliebigen XML-Parser eingelesen werden. RDF wird durch RDFS ergänzt. RDFS verfügt über die syntaktische Darstellung der Informationen als Graphen mit Tripeln hinaus über ein Vokabular und eine formale Semantik, durch die den repräsentierten Daten eine Bedeutung zugeordnet werden kann. Insbesondere sind in RDF Sprach-elemente zur Modellierung von Klassen sowie Prädikate zur Darstellung von Vererbung enthalten.

Bezugnehmend auf Tabelle 4 in Kap. 4.2.3 sei erwähnt, dass RDF(S) die Semantik des Entitäts-Beziehungs-Modells, d. h. die Instanzen atomarer Klassen und atomarer Rollen repräsentieren kann. Die in Abbildung 26 in XML repräsentierte Verbauwand ist in Abbildung 28 in RDF repräsentiert.

```

<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<!DOCTYPE rdf:RDF [
  <!ENTITY rdf 'http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#'>
  <!ENTITY fag_cib_bau_tu 'http://fag.cib.bau.tu-dresden.de#'>
  <!ENTITY rdfs 'http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#'>
<rdf:RDF xmlns:rdf="&rdf;"
  xmlns:fag_cib_bau_tu="&fag_cib_bau_tu;"
  xmlns:rdfs="&rdfs;">
  <fag_cib_bau_tu:RetainingWall rdf:about="&fag_cib_bau_tu;RetainingWall1"
    rdfs:label="RetainingWall1">
    <fag_cib_bau_tu:hasHeadPoint rdf:resource="&fag_cib_bau_tu;Point1"/>
    <fag_cib_bau_tu:hasFootPoint rdf:resource="&fag_cib_bau_tu;Point2"/>
  </fag_cib_bau_tu:RetainingWall>
  <fag_cib_bau_tu:Point rdf:about="&fag_cib_bau_tu;Point1"
    fag_cib_bau_tu:x_coord="0.0"
    fag_cib_bau_tu:z_coord="0.0"
    rdfs:label="Point1"/>
  <fag_cib_bau_tu:Point rdf:about="&fag_cib_bau_tu;Point2"
    fag_cib_bau_tu:x_coord="0.0"
    fag_cib_bau_tu:z_coord="-30.0"
    rdfs:label="Point2"/>
</rdf:RDF>
  
```

Abbildung 28: Beispiel RDF-Repräsentation der Verbauwand

Zu beachten ist, dass der Kopfpunkt und der Fußpunkt der Verbauwand durch die Prädikate „hasHeadPoint“ und „hasFootPoint“ als solche eindeutig gekennzeichnet sind, das heißt, dass im Vergleich zu „Standard“-XML nicht nur Syntax, sondern auch Semantik repräsentiert wird. Das der Instanz¹⁰ in Abbildung 28 zugrunde liegende Schema¹¹ ist in Abbildung 29 gegeben.

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<!DOCTYPE rdf:RDF [
  <!ENTITY rdf 'http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#'>
  <!ENTITY a 'http://protege.stanford.edu/system#'>
  <!ENTITY fag_cib_bau_tu_ 'http://fag.cib.bau.tu-dresden.de#'>
  <!ENTITY rdfs 'http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#'>
  <rdf:RDF xmlns:rdf="&rdf;"
    xmlns:a="&a;"
    xmlns:fag_cib_bau_tu_="&fag_cib_bau_tu_;"
    xmlns:rdfs="&rdfs;">
    <rdfs:Class rdf:about="&fag_cib_bau_tu_;Point"
      rdfs:label="Point">
      <rdfs:subClassOf rdf:resource="&rdfs;Resource"/>
    </rdfs:Class>
    <rdfs:Class rdf:about="&fag_cib_bau_tu_;RetainingWall"
      rdfs:label="RetainingWall">
      <rdfs:subClassOf rdf:resource="&rdfs;Resource"/>
    </rdfs:Class>
    <rdf:Property rdf:about="&fag_cib_bau_tu_;hasFootPoint"
      a:maxCardinality="1"
      a:minCardinality="1"
      rdfs:label="hasFootPoint">
      <rdfs:range rdf:resource="&fag_cib_bau_tu_;Point"/>
      <rdfs:domain rdf:resource="&fag_cib_bau_tu_;RetainingWall"/>
    </rdf:Property>
    <rdf:Property rdf:about="&fag_cib_bau_tu_;hasHeadPoint"
      a:maxCardinality="1"
      a:minCardinality="1"
      rdfs:label="hasHeadPoint">
      <rdfs:range rdf:resource="&fag_cib_bau_tu_;Point"/>
      <rdfs:domain rdf:resource="&fag_cib_bau_tu_;RetainingWall"/>
    </rdf:Property>
    <rdf:Property rdf:about="&fag_cib_bau_tu_;x_coord"
      a:maxCardinality="1"
      a:minCardinality="1"
      a:range="float"
      rdfs:label="x_coord">
      <rdfs:domain rdf:resource="&fag_cib_bau_tu_;Point"/>
      <rdfs:range rdf:resource="&rdfs;Literal"/>
    </rdf:Property>
    <rdf:Property rdf:about="&fag_cib_bau_tu_;z_coord"
      a:maxCardinality="1"
      a:minCardinality="1"
      a:range="float"
      rdfs:label="z_coord">
      <rdfs:domain rdf:resource="&fag_cib_bau_tu_;Point"/>
      <rdfs:range rdf:resource="&rdfs;Literal"/>
    </rdf:Property>
  </rdf:RDF>
```

Abbildung 29: RDF-Schema des einfachen Verbauwand-Modells

¹⁰ Eine Instanz ist die Realisierung eines Schemas, bzw. ein Exemplar/Individuum einer Klasse

¹¹ Ein Schema beschreibt die Struktur von Daten

Aufbauend auf RDF(S) wurde die Ontologiesprache OWL (Web Ontology Language) entwickelt. Es existieren drei verschiedene Teilsprachen mit unterschiedlicher Ausdrucksstärke: OWL-Full, OWL-DL und OWL-Lite (W3C, 2004). Die umfänglichste und ausdrucksstärkste ist OWL-Full. OWL-Full ist jedoch nicht entscheidbar und damit nicht für logisches Schlussfolgern einsetzbar. Desweiteren existiert eine etwas ausdruckschwächere, dafür jedoch entscheidbare Sprache OWL-DL. Die in dieser Arbeit zur Wissensrepräsentation angewandte Sprache ist OWL-DL (Description Logic), deren logische Komponenten überwiegend der Beschreibungslogik $\mathcal{SHOIN}(\mathcal{D})$ entsprechen (Farrar & Langendoen, 2009). Die OWL-DL Repräsentation des Verbaubeispiels ist auf Klassenebene (Schema) in Abbildung 30 dargestellt und wird auf Instanzebene in Abbildung 31 fortgesetzt:

```

xml version="1.0"?>
<rdf:RDF
  xmlns:xsp="http://www.owl-ontologies.com/2005/08/07/xsp.owl#"
  xmlns:swrlb="http://www.w3.org/2003/11/swrlb#"
  xmlns="http://fag.cib.bau.tu-dresden.de.OWL-Baugrube.owl#"
  xmlns:swrl="http://www.w3.org/2003/11/swrl#"
  xmlns:protege="http://protege.stanford.edu/plugins/owl/protege#"
  xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
  xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
  xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
  xml:base="http://fag.cib.bau.tu-dresden.de.OWL-Baugrube.owl">
  <owl:Ontology rdf:about=""/>
  <owl:Class rdf:ID="Point">
    <owl:equivalentClass>
      <owl:Class>
        <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
          <owl:Restriction>
            <owl:onProperty>
              <owl:DatatypeProperty rdf:ID="x_coord"/>
            </owl:onProperty>
            <owl:someValuesFrom rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float"/>
          </owl:Restriction>
          <owl:Restriction>
            <owl:someValuesFrom rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float"/>
            <owl:onProperty>
              <owl:DatatypeProperty rdf:ID="z_coord"/>
            </owl:onProperty>
          </owl:Restriction>
        </owl:intersectionOf>
      </owl:Class>
    </owl:equivalentClass>
  </owl:Class>
  <owl:Class rdf:ID="RetainingWall">
    <owl:equivalentClass>
      <owl:Class>
        <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
          <owl:Restriction>
            <owl:onProperty>
              <owl:ObjectProperty rdf:ID="hasFootPoint"/>
            </owl:onProperty>
            <owl:someValuesFrom rdf:resource="#Point"/>
          </owl:Restriction>
          <owl:Restriction>
            <owl:onProperty>
              <owl:ObjectProperty rdf:ID="hasHeadPoint"/>
            </owl:onProperty>
            <owl:someValuesFrom rdf:resource="#Point"/>
          </owl:Restriction>
        </owl:intersectionOf>
      </owl:Class>
    </owl:equivalentClass>
  </owl:Class>
  <owl:ObjectProperty rdf:about="#hasFootPoint">
    <rdfs:range rdf:resource="#Point"/>
    <rdfs:domain rdf:resource="#RetainingWall"/>
  </owl:ObjectProperty>
  <owl:DatatypeProperty rdf:about="#z_coord">
    <rdfs:domain rdf:resource="#Point"/>
    <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float"/>
  </owl:DatatypeProperty>
  <owl:DatatypeProperty rdf:about="#x_coord">
    <rdfs:domain rdf:resource="#Point"/>
    <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float"/>
  </owl:DatatypeProperty>

```

Abbildung 30: Beispiel OWL-DL Repräsentation der Verbauwand auf Klassenebene

```

<RetainingWall rdf:ID="RetainingWall1">
  <hasFootPoint>
    <Point rdf:ID="Point2">
      <x_coord rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float"
      >0.0</x_coord>
      <z_coord rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float"
      >-30.0</z_coord>
    </Point>
  </hasFootPoint>
  <hasHeadPoint>
    <Point rdf:ID="Point1">
      <x_coord rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float"
      >0.0</x_coord>
      <z_coord rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float"
      >0.0</z_coord>
    </Point>
  </hasHeadPoint>
</RetainingWall>
</rdf:RDF>

<!-- Created with Protege (with OWL Plugin 3.4, Build 533)
http://protege.stanford.edu -->

```

Abbildung 31: Beispiel OWL-DL-Repräsentation der Verbauwand auf Instanzebene

OWL-DL stellt einen Kompromiss zwischen komplexen Ausdrucksstrukturen und dem effizienten Schlussfolgern dar (Hollmann, 2008). OWL-DL ist entscheidbar und wird von den aktuellen Werkzeugen fast vollständig unterstützt (Hitzler, Krötzsch, Rudolph, & Sure, 2008). So unterstützt beispielsweise die in dieser Arbeit verwendete Inferenzmaschine Jess (<http://www.jessrules.com/>) vollständig die OWL-DL. Die dritte und ausdruckschwächste Teilsprache OWL-Lite eignet sich aufgrund ihrer Schlankeit insbesondere zur Erstellung von Taxonomien.

4.4. Komponentenbasierte verteilte Softwareentwicklung

Die Einbettung von Komponentensoftware in offene Softwaresysteme stellt einen wesentlichen Gesichtspunkt sowohl zur Realisierung der notwendigen Anwendungsintegration als auch zur Nutzung externer Rechenressourcen dar. Die Nutzung von Webservices, deren Orchestrierung und ihre Ausführung auf externen Servern ermöglicht die Nutzung von Rechenressourcen, die auf Einzelplatzrechnern nicht verfügbar sind. Insbesondere die Nutzung von Webservices in Cloud- und Grid-Infrastrukturen vervielfacht die verfügbaren Rechenressourcen und macht eine simulationsbasierte Systemidentifikation mit kurzen Antwortzeiten erst realisierbar. Ferner ist die Austauschbarkeit von Diensten in Serviceorientierten Architekturen ein wesentlicher Vorteil, der ein darauf basierendes Informationssystem ohne größeren Aufwand flexibel anpassbar macht und damit dem Unikatcharakter von Baumaßnahmen entgegenkommt. Nachfolgend werden die Webservice-Technologie sowie die Orchestrierung zur Realisierung der Informationslogistik eingeführt und ihr Mehrwert im Rahmen des Informationssystems aufgezeigt.

4.4.1. Serviceorientierte Architekturen mit Webservices

Ein Webservice ist nach der Definition der (W3C Working Group, 2004) ein Dienst, der im Internet registriert ist. Er besteht aus Serviceimplementierung (z.B. eine Java-Klasse) und Servicebeschreibung (WSDL). Die Schnittstelle eines Webservice ist mit Ein- und Ausgabeparametern in maschinenlesbarem Format (üblicherweise WSDL=Web Service Description Language) beschrieben. Webservices interagieren mit anderen Systemen über Nachrichten, die ein Protokoll (SOAP=Simple Object Access Protocol) nutzen. Die Nachricht wird auf Basis der WSDL-Beschreibung erzeugt und i.d.R. per HTTP übertragen. Mit Webservices ist eine interoperable M2M-Kommunikation über ein Netzwerk realisierbar.

Das Funktionsprinzip des Webservice ist, dass mit Hilfe eines SOAP-Clients eine SOAP-Anfrage generiert und über das HTTP-Protokoll an den HTTP-Server (Webserver) gesendet wird, der die SOAP-Nachricht an die SOAP-Engine (=SOAP-Prozessor) weiterleitet. Die SOAP-Engine, die Teil des Application Servers ist, ruft die adressierten Methoden des Webservices auf und übergibt die in der SOAP-Nachricht enthaltenen Daten. Die Antwort wird wiederum als SOAP-Nachricht an den Client gesendet, vgl. Abbildung 32.

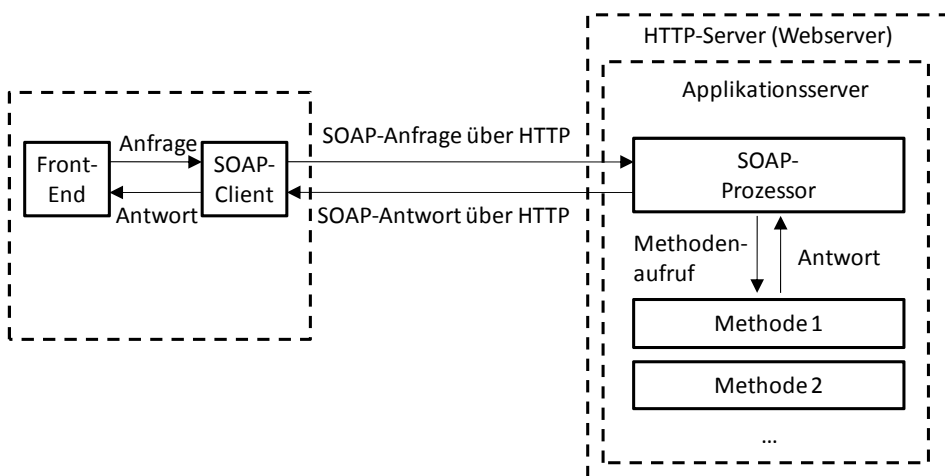


Abbildung 32: Funktionsprinzip eines Webservice-Aufrufs

Webservices verfügen im Wesentlichen über folgende bekannte Eigenschaften, die insbesondere für die Umsetzung der Datenauswertung im Rahmen des hier vorgeschlagenen adaptiven Bauverfahrens von Vorteil sind:

- **Ortstransparenz:** Web Services können an beliebigen Orten auf Webservern zur Verfügung gestellt und über das Internet aufgerufen werden. Dies bietet für den Service den Vorteil, auf einem Rechner ausgeführt zu werden, der die notwendigen Rechenressourcen für die implementierten Algorithmen enthält. Dies ist insbesondere bei der Nutzung von Finite-Elemente-Programmen ein wesentlicher Vorteil, da damit die Rechenleistung für FEM-Berechnungen mit Variation der Parameter auf hochperformanten Servern zur Verfügung gestellt werden kann, die mit einem Standardrechner nicht gegeben ist. Desweiteren bietet die Ortstransparenz für einen An-

wender den Vorteil, Services durch einen Nachrichtenaufruf zu nutzen. D. h. die Installation auf dem eigenen Rechner entfällt. Wenn die Schnittstellen bekannt und der Service für den Nutzer freigeschaltet ist, ist eine direkte Nutzung des Services ohne Installation auf dem eigenen Rechner möglich. Diese Eigenschaft ist insbesondere zur Nutzung in Grid- oder Cloud-Computing wesentlich, da durch die Bereitstellung als Webservice bereits die Realisierung als fernzugriffsfähige Softwarekomponente realisiert wurde und der Service damit auf den entsprechenden Plattformen zur Verfügung gestellt werden kann.

- **Komposition:** Web Services können selbst weitere Web Services nutzen. Durch Definition der Kommunikation von Webservices untereinander (Informationslogistik) können einfache Webservices zu komplexeren Webservices (Composite Webservice) integriert werden. Im hier vorgestellten Ansatz ist die Komposition von Services zur Aufstellung von Modellkandidaten, zur Simulation des Systemverhaltens, zu Vergleichsaufgabe sowie zur logischen Datenabfrage notwendig. Die Kompositionsfähigkeit ermöglicht also die Umsetzung eines integrierten, durchgängigen und dennoch flexiblen Softwaresystems, was für die Verwendung im Rahmen der Überwachung durch den hohen Unikatcharakter der Bauprodukte notwendig ist.
- **Lose Kopplung:** Die lose Kopplung, d. h. der geringe Grad der Abhängigkeit des Webservices von anderen Softwarekomponenten, der dadurch zustande kommt, dass der Webservice nicht mit anderen Komponenten verbunden wird, sondern mit ihnen lediglich über Nachrichten kommuniziert, ermöglicht die einfache Änderung oder den Austausch einzelner Services, ohne zwangsläufig eine Änderung des Gesamtsystems durchführen zu müssen. Dies bedeutet, dass z.B. Finite-Elemente-Services oder auch andere Komponenten bei Bedarf ausgetauscht werden können, ohne das gesamte Softwaresystem neu zu implementieren.
- **Schnittstellen:** Web Services haben Softwareschnittstellen und keine eigene graphische Benutzungsoberfläche. Im Vordergrund steht die M2M-Kommunikation und nicht die direkte Kommunikation mit Menschen, die separat über Client-Programme realisiert werden kann.
- **Interoperabilität:** Die Kommunikation mit Web Services erfolgt über offene XML-basierte Standards (SOAP = Simple Object Access Protocol). Die Unabhängigkeit vom Einsatz bestimmter Programmiersprachen, Hardwareplattformen oder Betriebssysteme erleichtert die Integration heterogener Systeme.
- **Kapselung:** Web Services sind unabhängige, abgeschlossene Dienste mit genau definierten Aufgaben und Schnittstellen. Implementierungsdetails bleiben dem Anwender verborgen (Blackbox).

Der Webservice ist eine ausführbare Klasse, die auf einem Applikationsserver veröffentlicht ist und dort aufgerufen und ausgeführt werden kann. Nachfolgend soll als kurzes Beispiel ein Webservice zur Berechnung eines Kragarms gezeigt werden. Der Service wird neben anderen später auch zur Berechnung im Rahmen eines Spundwandbeispiels genutzt.

Der Quellcode in Abbildung 33 zeigt die Javaklasse Krag mit 3 Methoden zur Berechnung der Biegelinie, der Biegespannung und des Biegemoments eines Kragarms.

```
import java.lang.Math;
public class Krag {
    public double w(double q, double x, double l, double E, double I)
    {
        double w=(-q*Math.pow(x, 4)/(24*E*I)+q*Math.pow(l,
        3)*x/(6*E*I)-3*q*Math.pow(l,4)/(24*E*I));
        return w;
    }
    public double S(double q, double x, double W)
    {
        double S=(-q*Math.pow(x, 2)/2)/W;
        return S;
    }
    public double M(double q, double x)
    {
        double M=(-q*Math.pow(x,2)/2);
        return M;
    }
}
```

Abbildung 33: Java-Klasse zur Berechnung eines Kragarms

Diese Klasse wird auf einem Applikationsserver, der Javaklassen ausführen kann, zur Verfügung gestellt. Ein Aufruf des Servers über einen Internetbrowser zeigt den Service mit den verfügbaren Operationen w (Biegelinie), S (Biegespannung) und M (Biegemoment) an.

Bei einem Aufruf des Services mit dem Request http://141.30.165.8:9762/axis2/services/service_Kragarm?wsdl generiert der WSDL-Generator des Applikationsservers die in Abbildung 34 dargestellte WSDL-Schnittstellenbeschreibung des Services im XML-Format.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<wsdl:definitions xmlns:wsdl="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/"
xmlns:ns1="http://org.apache.axis2/xsd"
xmlns:wsaw="http://www.w3.org/2006/05/addressing/wsdl"
xmlns:http="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/http/"
xmlns:ns0="http://ws.apache.org/axis2" xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
xmlns:mime="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/mime/"
xmlns:soap="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/soap/"
xmlns:soap12="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/soap12/"
targetNamespace="http://ws.apache.org/axis2">
  <wsdl:documentation>service_Kragarm</wsdl:documentation>
  <wsdl:types>
    <xs:schema xmlns:ns="http://ws.apache.org/axis2" attributeFormDe-
fault="qualified" elementFormDefault="qualified" targetNames-
pace="http://ws.apache.org/axis2">
      <xs:element name="M">
        <xs:complexType>
          <xs:sequence>
            <xs:element minOccurs="0" name="q" type="xs:double"/>
            <xs:element minOccurs="0" name="x" type="xs:double"/>
          </xs:sequence>
        </xs:complexType>
      </xs:element>
      <xs:element name="MResponse">
        <xs:complexType>
          <xs:sequence>
            <xs:element minOccurs="0" name="moment" type="xs:double"/>
          </xs:sequence>
        </xs:complexType>
      </xs:element>
      <xs:element name="S">
        <xs:complexType>
          <xs:sequence>
            <xs:element minOccurs="0" name="q" type="xs:double"/>
            <xs:element minOccurs="0" name="x" type="xs:double"/>
            <xs:element minOccurs="0" name="w" type="xs:double"/>
          </xs:sequence>
        </xs:complexType>
      </xs:element>
      <xs:element name="SResponse">
        <xs:complexType>
          <xs:sequence>
            <xs:element minOccurs="0" name="return" type="xs:double"/>
          </xs:sequence>
        </xs:complexType>
      </xs:element>
    </xs:schema>
  </wsdl:types>
  ...

```

Abbildung 34: Ausschnitt aus WSDL-Dokument des Kragarm-Service

Diese Schnittstellenbeschreibung definiert die verfügbaren Methoden mit den zu übergebenden Aufruf- und Antwortparametern. Zur Berechnung des Biegemomentes M sind z.B. die Parameter q (Linienlast) und x (x-Koordinate des zu berechnenden Moments) zu übergeben. Es wird ein Element mit dem Namen „moment“ zurückgegeben, das das Berechnete Biegemoment enthält.

Die in der WSDL gegebene Schnittstellenbeschreibung ist die Voraussetzung zur Erstellung eines SOAP-Requests, der die eigentliche Nachricht zum Aufruf des Services darstellt. Der in Abbildung 35 dargestellte SOAP-Request wird an den Service gesendet. Die SOAP-Antwort wird mit dem berechneten Wert für das Moment $M=-125.0$ vom Server zurückgesendet (Abbildung 36).

```
<soap:Envelope xmlns:soap="http://www.w3.org/2003/05/soap-envelope"
xmlns:axis="http://ws.apache.org/axis2">
  <soap:Header/>
  <soap:Body>
    <axis:M>
      <!--Optional:-->
      <axis:q>10</axis:q>
      <!--Optional:-->
      <axis:x>5</axis:x>
    </axis:M>
  </soap:Body>
</soap:Envelope>
```

Abbildung 35: Webservice-Aufruf (SOAP-Request)

```
<soapenv:Envelope xmlns:soapenv="http://www.w3.org/2003/05/soap-envelope">
  <soapenv:Body>
    <ns:MResponse xmlns:ns="http://ws.apache.org/axis2">
      <ns:moment>-125.0</ns:moment>
    </ns:MResponse>
  </soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>
```

Abbildung 36: Webservice-Antwort (SOAP-Response)

4.4.2. Informationslogistik – Webservice-Orchestrierung

Die Komposition von Webservices eröffnet die Möglichkeit, ein komponentenbasiertes Softwaresystem im Sinne einer „Programmierung im Großen“ umzusetzen, d. h. bereits erstellte Softwarekomponenten, die häufig wiederkehrende Probleme berechnen, für unterschiedliche Aufgaben neu kombiniert wiederzuverwenden. Die Nutzung von Webservices eröffnet über die „Programmierung im Großen“ hinaus die Verwendung von Softwarekomponenten, die auf beliebigen Servern zur Verfügung gestellt werden.

Ein wesentlicher Mehrwert wird dann erreicht, wenn die einzelnen Services unterschiedlicher Hersteller flexibel zu einer größeren Anwendung komponiert werden können. Die Komposition erfordert die Koordination der Services. Die in dieser Arbeit verwendete Kompositionsmethode ist die Orchestrierung, d. h. die prozessorientierte Komposition verschiedener Services zu einem ausführbaren Prozess. Die Orchestrierung beschreibt, wie mehrere Services durch Nachrichten miteinander interagieren. Orchestrierte Services können dabei an einer beliebigen internen oder externen Stelle in einem Netzwerk liegen. Der Prozessfluss, d. h. die zeitliche Reihenfolge, die Prozesslogik (Bedingungen der Serviceaufrufe) und die Kommunikation (Übergabe und Zwischenspeicherung von Daten zwischen Services) werden zentral durch ein Prozessmodell gesteuert. Abbildung 37 zeigt dies beispielhaft für drei Webservices, die auf unterschiedlichen Servern veröffentlicht sind und durch eine Prozessengine, die auf einem weiteren Server liegt, angesteuert werden.

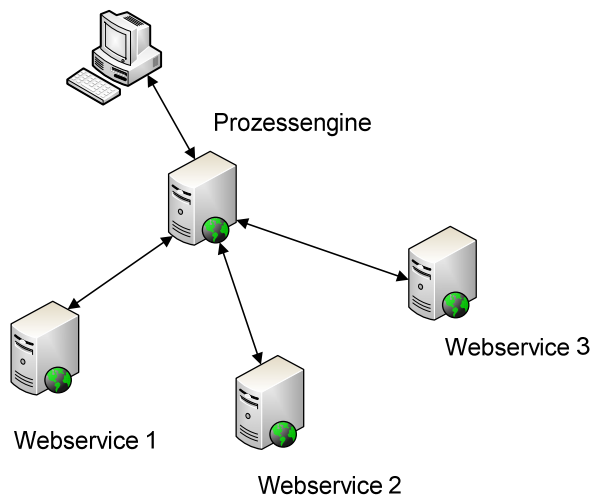


Abbildung 37: Netzwerk mit verteilten Services und Prozessengine

Die Anwendung der benutzten Services bleibt dabei verborgen (Blackbox). Der orchestrierte Prozess ist selbst wieder ein Service (Composite Service) und kann damit auch als Subprozess in einen größeren Prozess eingebettet werden. Der Composite Service wird auf einer Workflowmaschine zum Einsatz gebracht und wie ein gewöhnlicher Webservice über seine Schnittstelle durch einen SOAP-Request aufgerufen und ausgeführt.

Die in dieser Arbeit verwendete Orchestrierungssprache ist die Business Process Execution Language (BPEL). Die Erstellung ausführbarer Prozesse erfordert die Übertragung fachlicher Prozessmodelle in Workflowmodelle für die Webservice-Orchestrierung. Hierfür hat sich ein praktikables Vorgehen herauskristallisiert, das in Abbildung 38 dargestellt ist.

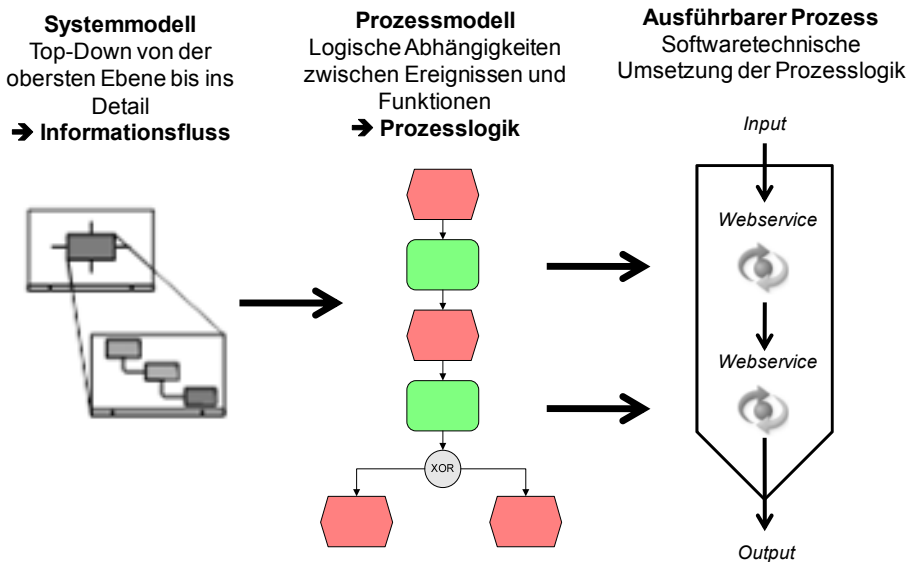


Abbildung 38: Vom Konzept zum ausführbaren Prozess

Angefangen von der Erstellung des Systemmodells, das nach dem Top-Down-Ansatz erstellt wird und den prinzipiellen Informationsfluss IT-neutral darstellt wird eine Prozesslogik entworfen, die die logischen Abhängigkeiten zwischen Ereignissen und Funktionen umfasst. Auf dieser Basis wird die softwaretechnische Umsetzung der Prozesslogik mit Abbildung der Funktionen in Webservices und Implementierung der Prozesslogik und des Informationsflusses durchgeführt.

Ohne auf die Details der Orchestrierungssprache BPEL eingehen zu wollen, sollen kurz die wichtigsten Sprachelemente eingeführt werden. Für eine vollständige Beschreibung wird auf die BPEL-Spezifikation (OASIS, 2007) verwiesen. Die für diese Arbeit wichtigen BPEL-Sprachelemente lassen sich grob in

- Prozessdefinition
- Basis-Aktivitäten
- Strukturierende Aktivitäten

einteilen.

Die **Prozessdefinition** umfasst Sprachelemente zur Definition des Prozesses, zum Import weiterer Sprachen, zur Definition der Prozessvariablen, sowie zur Definition der Partner Links, mit denen definiert wird, was bei welchem Kommunikationspartner aufgerufen werden soll.

Die **Basis-Aktivitäten** umfassen die Sprachelemente zur externen Kommunikation (Receive & Reply) sowie zum Aufruf von Webservices (Invoke). Eine sehr wichtige Basisaktivität ist die Assign-Aktivität, die den Inhalt von Variablen aktualisiert. Assigning kopiert Daten von Quell- in Zielvariablen und kann neue Daten durch Xpath-Ausdrücke oder andere Sprachen erzeugen. Die in Abbildung 39 Assign-Aktivität z.B. multipliziert das Ergebnis eines Webservices zur Berechnung der vertikalen Bodenspannung mit dem Erddruckbeiwert K_{agh} , der ebenfalls durch einen Webservice ermittelt wurde und kopiert dieses Ergebnis in die Variable „horErddruckResponse“.

```
<bpel:assign>
  <bpel:copy>
    <bpel:from>$vertSpannungResponse.parameters/ns3:return * $kaghResponse.parameters/ns4:return </bpel:from>
    <bpel:to variable="horErddruckResponse"/>
  </bpel:copy>
</bpel:assign>
```

Abbildung 39: Beispiel BPEL Assign-Aktivität

Auf diese Art und Weise lässt sich die Informationslogistik sehr komplexer Prozesse definieren, da die Daten nicht nur einfach weitergereicht, sondern auch durch einfache Berechnungsvorschriften zusammengeführt und verarbeitet werden können.

Durch **strukturierende Aktivitäten**, wie z.B. Bedingungen und Schleifen, können Webservices zu komplexen Algorithmen orchestriert werden. Mit einem Sequence-Container werden Aktivitäten in einer geordneten Liste arrangiert und sequenziell ausgeführt.

Von besonderem Interesse für diese Arbeit ist jedoch die Möglichkeit, durch einen Flow-Container (Abbildung 40) Aktivitäten parallel zu arrangieren und sie nebenläufig auszuführen.

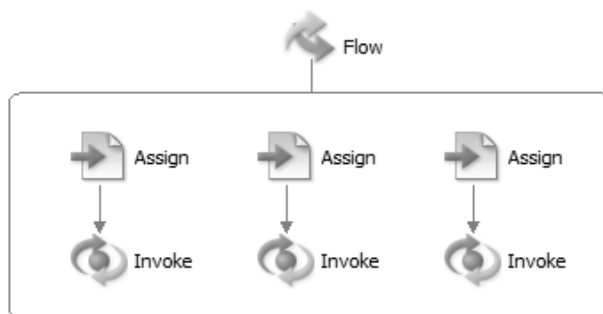


Abbildung 40: Nebenläufige Ausführung von Services durch Flow-Container

5. IT-basierte Beobachtungsmethode für adaptive Bauverfahren

Es wird das vorgeschlagene IT-basierte adaptive Bauverfahren in seiner Gesamtheit als IT-System vorgestellt. Die Realisierung der Beobachtungsmethode ist mit baubegleitender Systemidentifikation und Bauverfahrensadaptation ohne einen dedizierten IT-Einsatz praktisch nicht möglich. Auf der Basis der bisher dargestellten Methoden wird der Überwachungsprozess als Prozessmodell ausgearbeitet und damit die notwendigen Komponenten des Rahmeninformationssystems sowie die Informationsflüsse spezifiziert. Die Systemkomponente, die die Hauptrolle bei der Realisierung der Gesamtmethodik spielt, ist die beschreibungslogikbasierte Wissensbasis. Die Kombination der Informationen des Bauwerks und des Sensorsystems einerseits, die Kombination des Bauprozesses und des Monitoringprozesses andererseits sowie die Vereinigung von Objekt- und Prozesssicht in einem gemeinsamen Informationsraum erfordert ein Metamodell, das diese gemeinsame Modellierung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Granularitätsstufen ermöglicht. Die Komplexität, die dabei entsteht, ist nur durch Nutzung des automatischen logischen Schließens beherrschbar, sodass das Metamodell auf Beschreibungslogik aufgebaut wird.

Die Realisierung der simulationsbasierten Systemidentifikation erfordert die Lösung von zwei Geschwindigkeitsproblemen. Der Aufbau der erforderlichen hohen Anzahl an Modellkandidaten mit Nutzung der Vielfalt an Stoffgesetzen und die Identifikation der realitätsnahen Modelle durch Priorisierung der Simulationsergebnisse sind manuell nicht zu bewerkstelligen und erfordern daher eine Automatisierung, die durch eine wissensbasierte, semi-automatische Variantenbildung und Modellkomposition und durch eine Modellpriorisierung auf der Basis einer Modellmetrik ermöglicht wird. Das zweite Geschwindigkeitsproblem ist die Simulation der sehr hohen Anzahl an Modellkandidaten mit nichtlinearen Modellen. Dieses Problem ist nur durch hochparallele Simulation der Modellkandidaten lösbar. Das Informationssystem wird daher auf der Basis von Webservices konzipiert, um einerseits die erforderliche Nutzung externer Rechenressourcen im Rahmen von Cloud- und Grid-Computing zu ermöglichen und andererseits die flexible Konfigurierbarkeit des Systems für die Vielfalt geotechnischer Problemstellungen zu erreichen. Zur Datenauswertung, Simulation und Systemidentifikation werden also Webservices konzipiert und prototypisch umgesetzt, die die informationstransformierenden Aufgaben des Monitoringprozesses ausführen und dabei auf die Wissensbasis, in der die bau- und messspezifischen Informationen repräsentiert sind, zugreifen. Die Steuerung der Informationslogistik durch Webserviceorchestrierung erlaubt die parallele Ausführung der Webservices. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Schaffung einer anpassbaren und erweiterbaren Grundkonfiguration der Systemarchitektur mit generischen Grundbausteinen. Durch die flexible, bedarfsgemäße Konfigurierbarkeit und Erweiterbarkeit der Wissens- und Datenbanken, sowie der Webservices mit Simulations- und Analysealgorithmen wird die Anwendbarkeit des Überwachungs- und Steuerungssystems für diverse Bauvorhaben ermöglicht.

Die Informationslücken im zyklischen Bau- und Monitoringprozess werden damit durch Simulation, Modellauswertung und Modellanpassung geschlossen. Dies ermöglicht fundierte und abgesicherte Entscheidungen für kosten- und sicherheitsrelevante Verfahrensänderungen.

5.1. Überwachungsprozess

Der Überwachungsprozess realisiert die informationstransformierenden Aktivitäten des in Abbildung 2, Kap. 1.2 eingeführten gekoppelten Bau- und Überwachungszyklus. Er ist nebenläufig zum Bauprozess und wertet kontinuierlich erfasste Sensordaten durch Vergleich mit Schwellwerten sowie kontinuierliche Simulation und Systemidentifikation aus. Das mechanische Modell wird so validiert und kann zur Neubestimmung der rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeit, sowie zur Änderung im Entwurf und letztendlich zur Adaption des Bauverfahrens genutzt werden. In Abbildung 41 bis Abbildung 45 ist eine mögliche Konfiguration des Überwachungsprozesses gegeben, die auf die spezifische Überwachungsaufgabe bedarfsgemäß anpassbar ist.

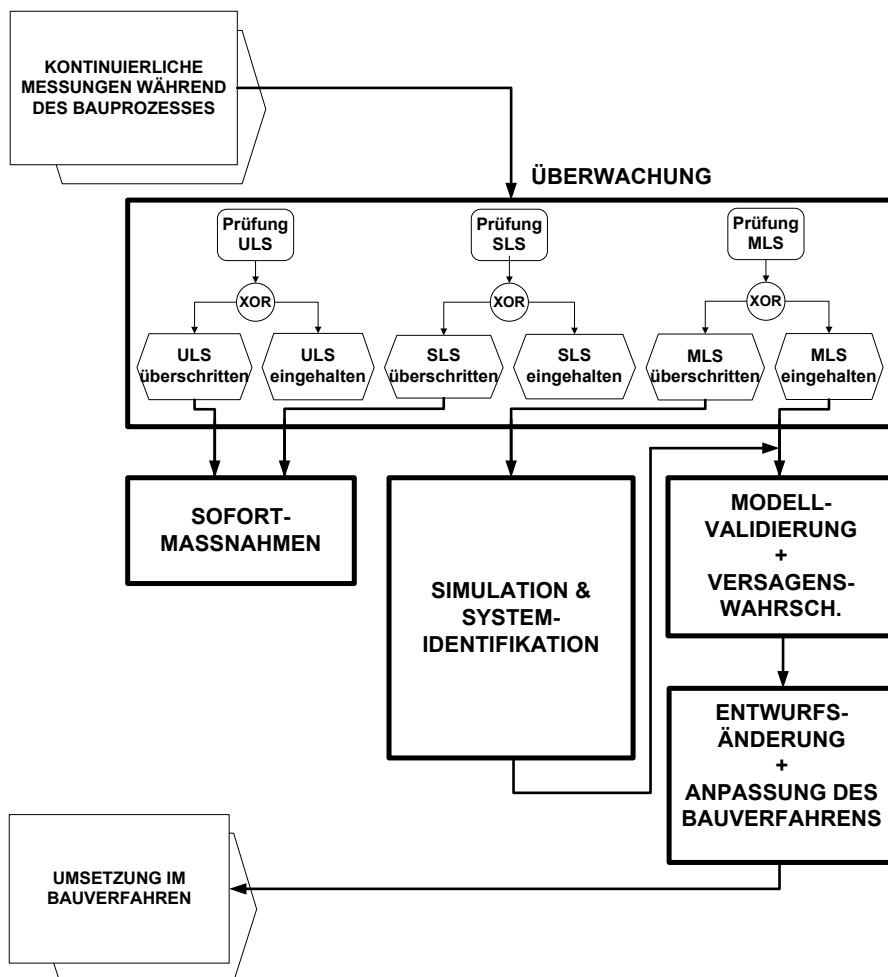


Abbildung 41: Überwachungsprozess

Überwachung

In Analogie zu den Sicherheitsnachweisen bei der Entwurfsphase eines Bauwerks wird hier für die Bauwerksüberwachung ein ständiger sensordatenbasierter Nachweis der Standsicherheit (Ultimate Limit State, ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (Serviceability Limit State, SLS) durchgeführt (Abbildung 42). D. h. es werden auf Basis des mechanischen Modells jeweils für definierte Messgrößen die Schwellwerte für Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit festgelegt und als Vergleichskriterium für die Sensordaten verwendet. Die Nachweise haben dabei zunächst rein informativen Charakter, d.h. sie sind Bestandteil der Überwachung und treffen Aussagen über den Zustand des entstehenden Tragwerks und fungieren als Kontrollgrößen, ohne die rechtlichen Rahmenbedingungen an Sicherheitsnachweise erfüllen zu müssen. Desweiteren wird ein dritter Grenzzustand der Modellgültigkeit (Model validity Limit State, MLS) eingeführt.

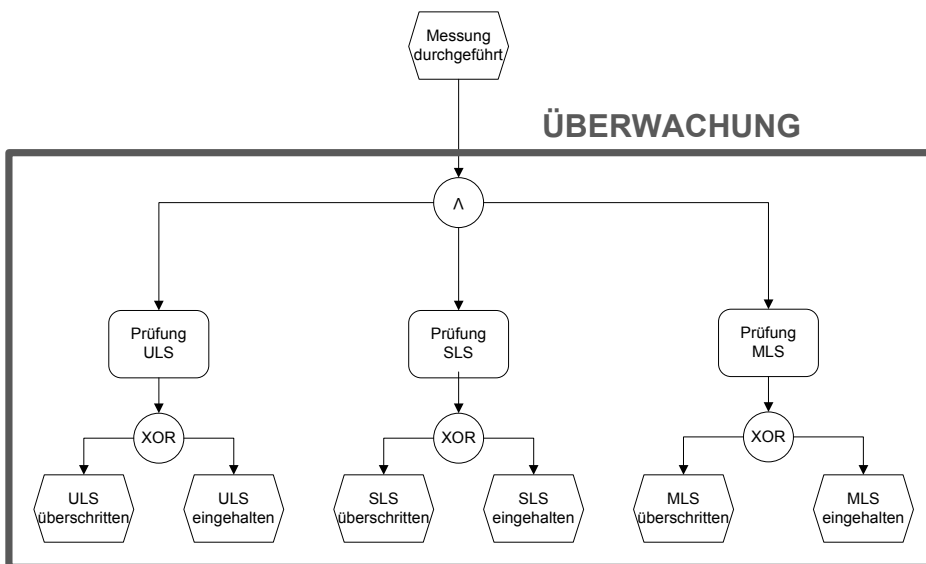


Abbildung 42: Überwachung

Sofortmaßnahmen

Wenn einer dieser Grenzwerte überschritten wird, sind in der Regel sofortige Maßnahmen notwendig, um eine akute Gefahr abzuwenden (Abbildung 43). Hierfür sollen, wie in Abschnitt 3.2.1 bereits erwähnt, vorkonfigurierte Maßnahmenpläne für denkbare Situationen vorliegen. Die Maßnahmenpläne können als Produkt-Prozess-Modell nach dem in Abschnitt 5.3.4 eingeführten Metamodell formalisiert werden. Nach Beseitigung der akuten Gefahr sind in der Regel eine Überprüfung der Situation und sehr wahrscheinlich eine Änderung des Entwurfs notwendig. Es kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass im Fall einer Überschreitung eines der beiden Grenzwerte das bisher genutzte bodenmechanische Modell das Systemverhalten von Bauwerk und Boden nicht mehr adäquat abbildet.

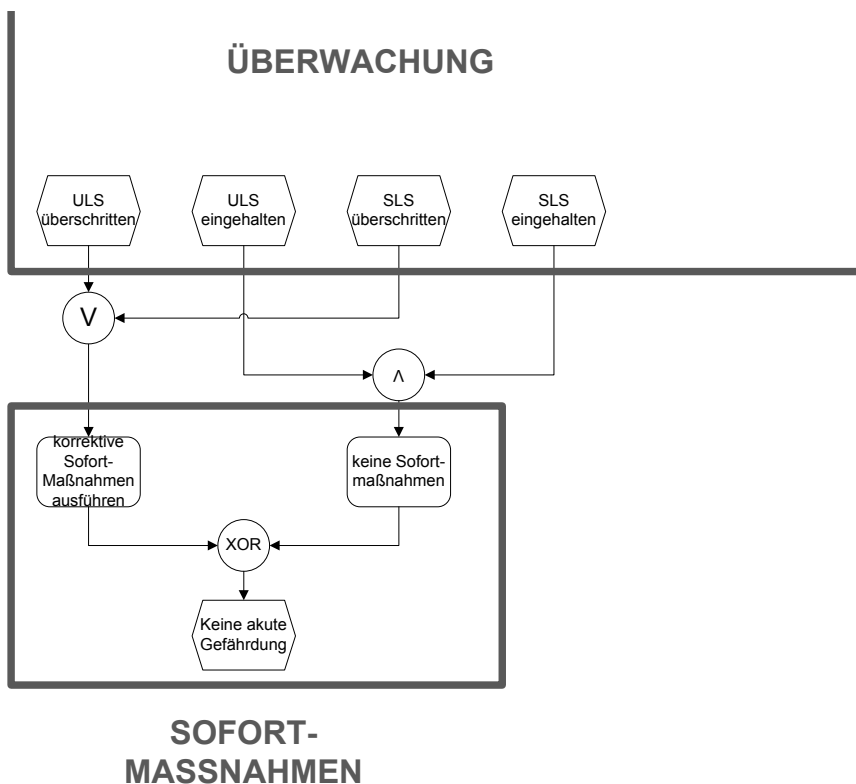


Abbildung 43: Sofortmaßnahmen

Systemidentifikation

Bei Überschreitung des Grenzzustands der Modellgültigkeit (MLS) wird eine Systemidentifikation durch iterative Simulation über Alternativen des bodenmechanischen Modells und der Modellparameter sowie die Diagnose des Bauwerkszustands ausgeführt (Abbildung 44).

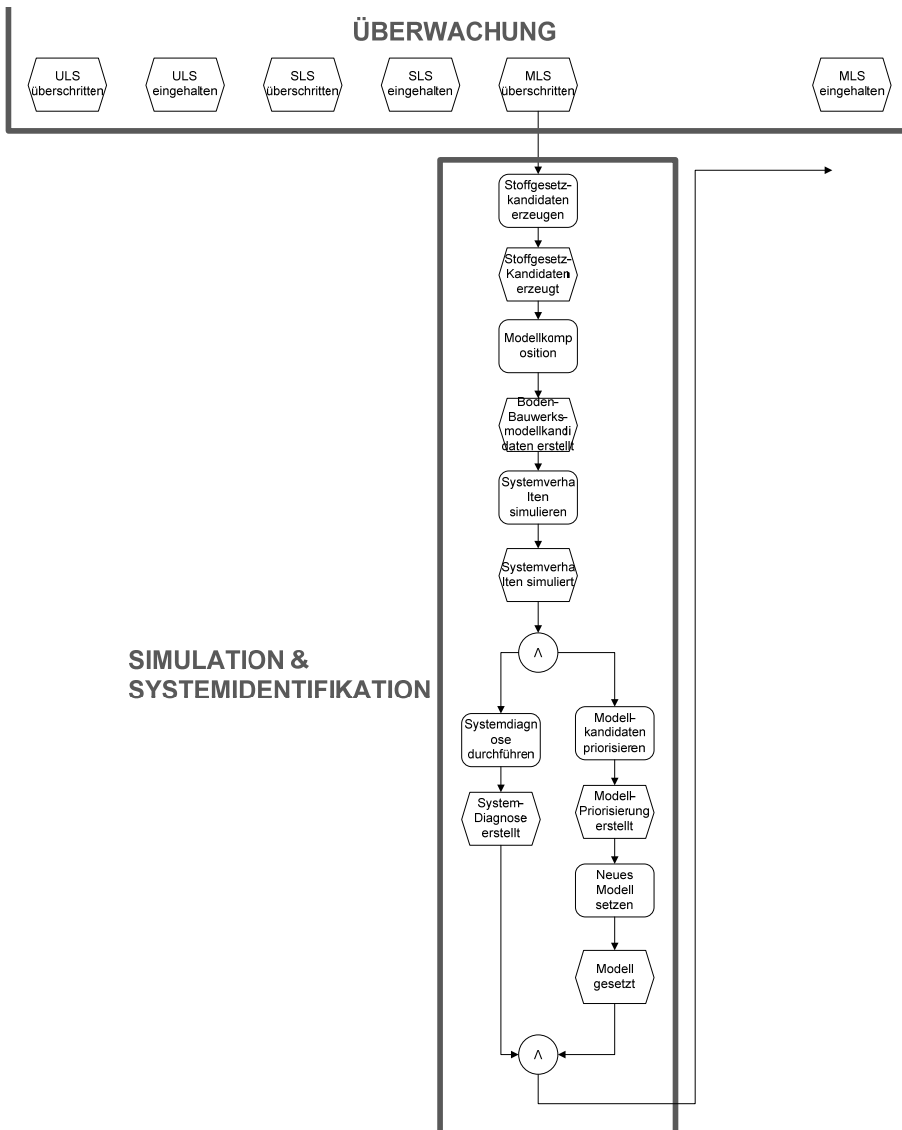


Abbildung 44: Simulation und Systemidentifikation

Der Grenzzustand der Modellgültigkeit wird festgelegt als maximal tolerierte relative Abweichung zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. Es wird dabei angenommen, dass das Modell gültig ist, solange die Abweichung zwischen Simulation und Messung

einen bestimmten Wert nicht überschreitet – unter der Prämisse, dass der verwendete Modellansatz (Stoffgesetz) bei dessen ursprünglicher Nutzung durch den Ingenieur als gültig festgelegt wurde. Ist der Grenzzustand der Modellgültigkeit überschritten, gilt es, eine Erklärung für das tatsächliche Systemverhalten zu finden. Die Erklärung des Systemverhaltens ist nur durch eine simulationsbasierte Systemidentifikation nach Kap. 3.3.2 möglich, bei der relevante und mögliche Stoffgesetze und Stoffparametervarianten mit der Boden- und Bauwerksgeometrie zu Modellkandidaten komponiert werden, auf deren Basis anschließend das Systemverhalten simuliert wird. Die Modellkandidaten werden hinsichtlich der Anpassungsfähigkeit ihrer Simulationsergebnisse an die Messdaten sowie hinsichtlich ihrer Plausibilität priorisiert. Die Modellpriorisierung dient der Wahl eines neuen gültigen Modells, auf dessen Grundlage eine Verhaltensdiagnose des Ingenieursystems durchgeführt wird.

Modellvalidierung und Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit

Die Modellunsicherheiten des identifizierten Modells werden im Rahmen einer Modellvalidierung neu bestimmt und Sicherheitsindizes werden neu berechnet (Abbildung 45). Die neu gesetzten Modellannahmen werden dann zur Entscheidung über Entwurfsänderungen und/oder Änderungen der Bauausführung genutzt. Die bisher dargestellte Verfahrensweise geht von der Überschreitung der Grenzzustände aus. Der Regelfall soll jedoch sein, dass die Grenzwerte eingehalten sind. In diesem Fall werden lediglich die Modellunsicherheiten analysiert und Sicherheitsindizes neu bestimmt. Durch die Aufzeichnung der Sensordaten wird das Prognosemodell bei weitgehender Übereinstimmung kontinuierlich immer mehr bestätigt. Dies entspricht einer Validierung des Modells, die zu einer Reduzierung der Modellunsicherheiten und damit zu höheren Sicherheitsindizes bzw. zu einer Reduzierung der rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeit des Bauwerks führt.

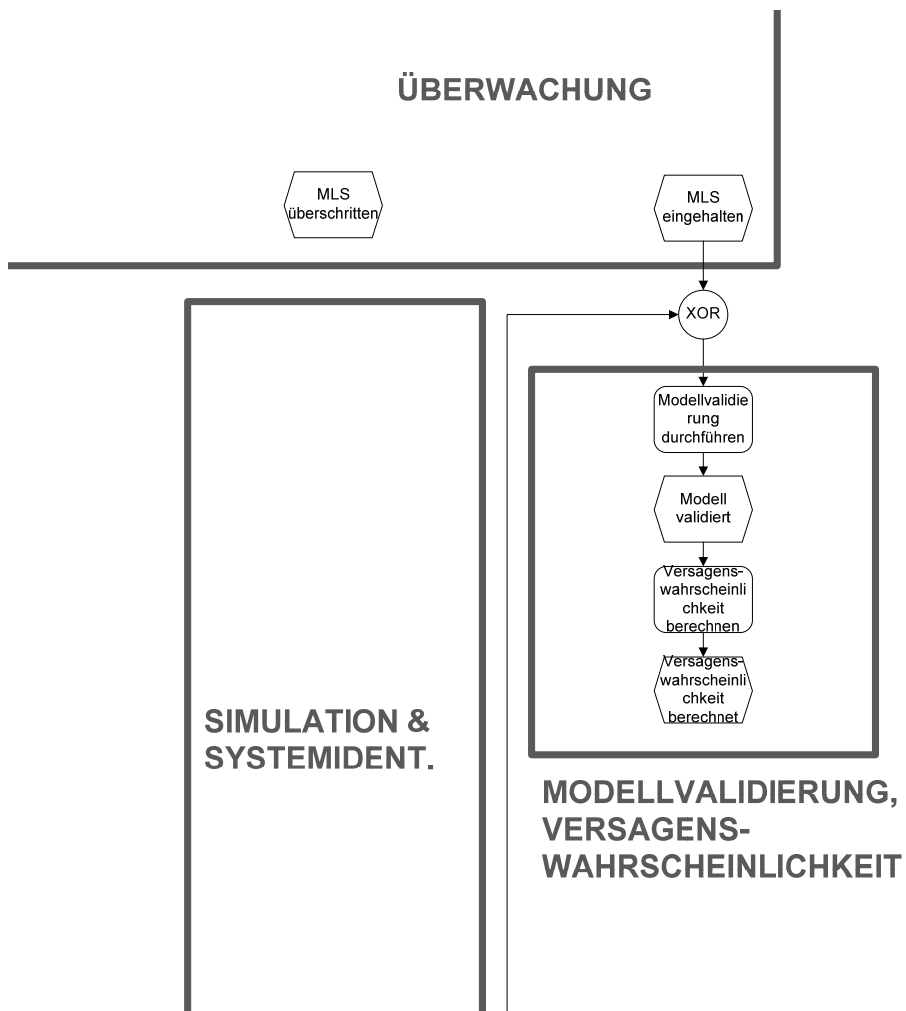


Abbildung 45: Modellvalidierung und Neubestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit

Die erfassten Messdaten sowie die Ergebnisse der Systemidentifikation gelten für einen bestimmten Bauzustand. Die Erkenntnisse aus einem validierten Modell der Phase x werden auf die Phasen $x+$ übertragen und liefern einen verbesserten Schätzer für das Boden-Bauwerk-Verhalten. In Abbildung 46 ist die Zuordnung von Prognosemodellen zu den jeweiligen Bauzuständen am Beispiel eines Baugrubenaushubs mit begleitender Überwachung angedeutet.

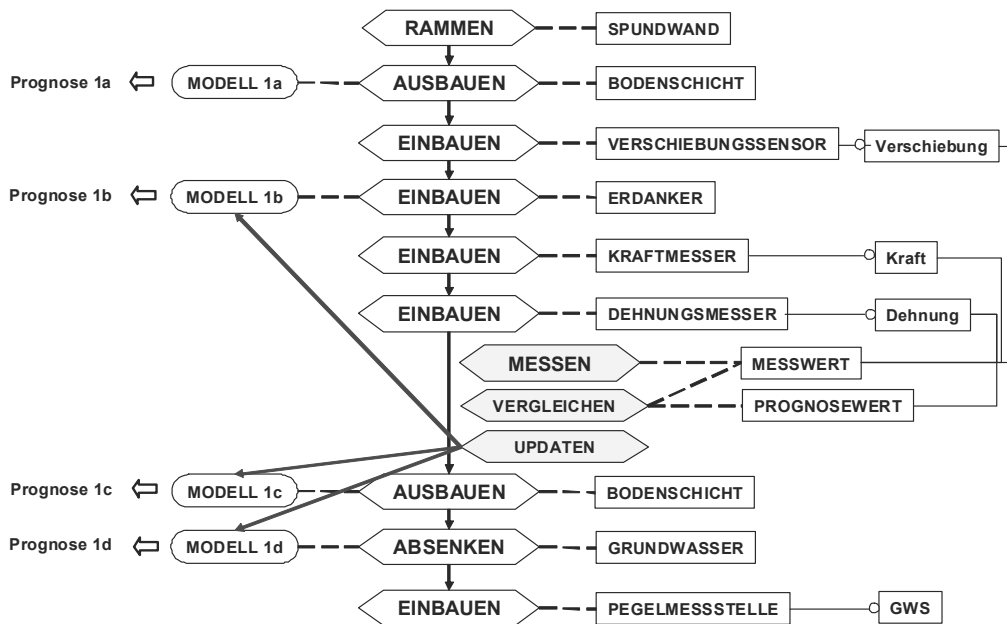


Abbildung 46: Nutzung der Messungen zur Modelladaption und Prognoseverbesserung

Wird z.B. zu dem durch Modell 1b repräsentierten Bauzustand eine Messung und Systemidentifikation durchgeführt und eine Verbesserung des Modells erreicht, so ist diese natürlich auch für alle nachfolgenden Bauzustände und deren Modelle maßgeblich, d.h. alle Modelle, die nachfolgende Bauzustände repräsentieren sind anzupassen und neue Prognosen des Boden-Bauwerks-Verhaltens sind durchzuführen.

Entwurfsänderung und Anpassung des Bauverfahrens

Der Nutzen der Systemidentifikation und der Validierung des Simulationsmodells liegt in der Möglichkeit, bei einer günstigen Entwicklung der Sicherheitsindizes, den Entwurf während des Bauprozesses durch eine kostengünstigere Alternative zu ersetzen, soweit dies aus konstruktiven und rechtlichen Gesichtspunkten noch möglich ist. Ist ein realitätsnahes Modell gefunden, kann entschieden werden, ob Änderungen im Entwurf und im Bauverfahren notwendig oder gewünscht sind. Ist eine Änderung des Entwurfs notwendig, sind Entwurfsvarianten zu bilden, für die jeweils mit den zuvor identifizierten Stoffgesetzen das Systemverhalten zu simulieren ist. Die untersuchten Entwurfsvarianten sind durch den Ingenieur zu priorisieren und zu entscheiden. Bei einem neu gesetzten Entwurf ist das Bauverfahren entsprechend anzupassen (Abbildung 47). Stellt sich z.B. heraus, dass mit dem gegenwärtigen Entwurf die Standsicherheit einer Verbauwand nach dem gewonnenen neuen Wissensstand nicht gegeben ist, wird eine Konstruktionsänderung – im Beispiel der Verbauwand vermutlich die Anordnung einer weiteren Ankerreihe – notwendig. Diese frühzeitige Reaktion ist nur durch die simulationsbasierte Systemidentifikation mit dem verbesserten Modell möglich und objektiv begründbar.

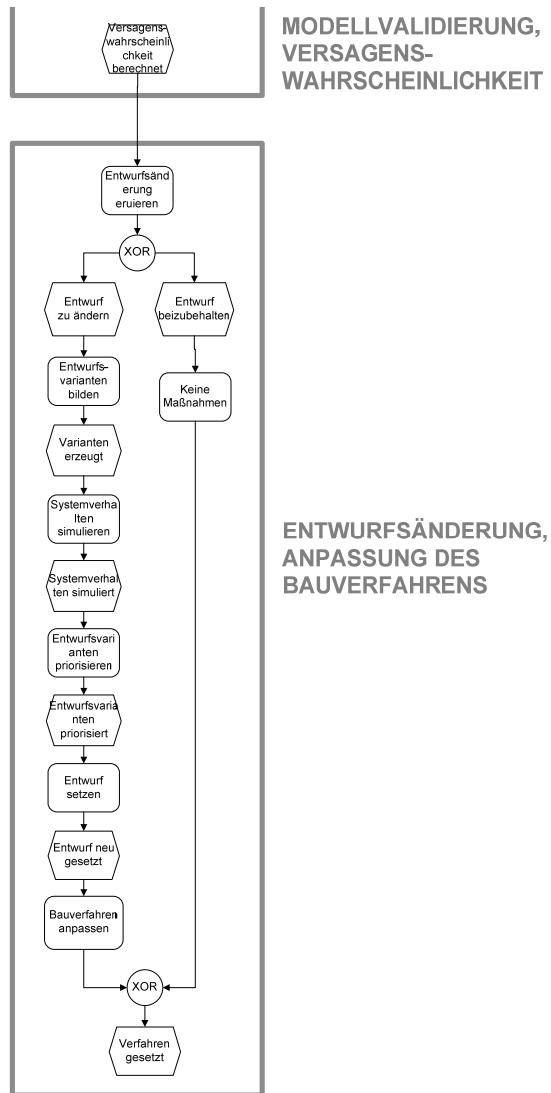


Abbildung 47: Entwurfsänderung und Anpassung des Bauverfahrens

5.2. Architektur des Rahmeninformationssystems

Die Grundlage der IT-gestützten Überwachungsmethode ist ein Rahmensoftwaresystem, das auf Basis einer vierschichtigen Architektur (s. Abbildung 48) umgesetzt wird.

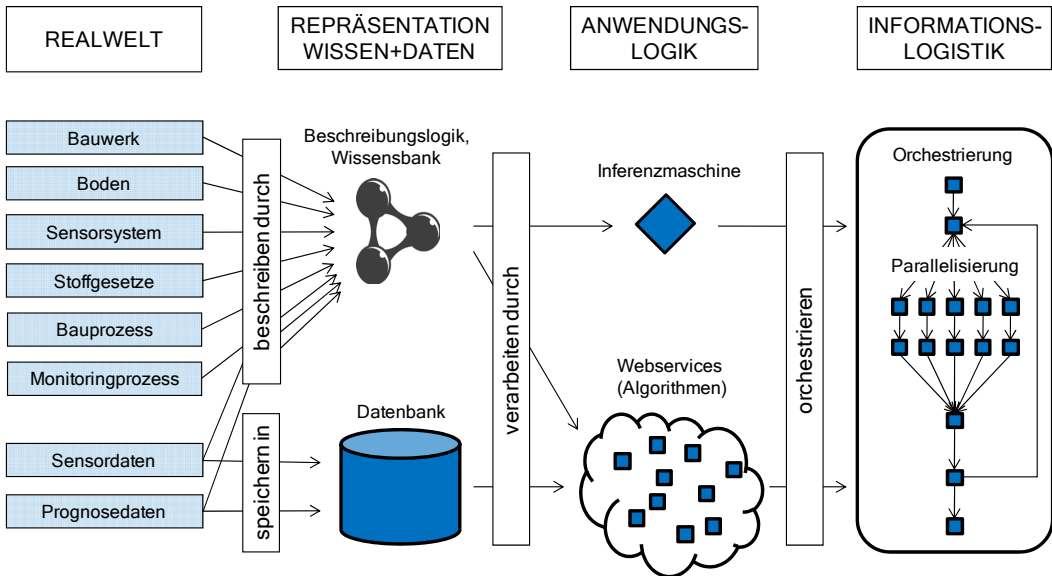


Abbildung 48: Prinzipieller Aufbau der Systemarchitektur

Die Aspekte der Realwelt bezüglich Bauwerk, Sensorsystem, bodenmechanisches Modell, Bauprozess, Überwachungsprozess, Sensordaten und Prognosedaten werden in einer Wissensbank als logisches System mit den wesentlichen Beziehungen und Regeln in Beschreibungslogik repräsentiert, um ihre logische Auswertbarkeit durch Schlussfolgerung zu ermöglichen. Die implizit definierten logischen Beziehungen der in der Wissensbank repräsentierten Individuen werden durch logische Schlussfolgerung mit Inferenzmaschinen (Reasoner) expliziert. Das in der Wissensbank repräsentierte Wissen wird mit der Abfragesprache SPARQL gezielt nach logischen Kriterien abgefragt und über das Netzwerkprotokoll SOAP im Rahmen eines Remote-Procedure-Calls an die (Rechen-)Webservices zur Echtzeitauswertung und Systemidentifikation übergeben. Die Informationslogistik, d. h. die Weitergabe der Daten von einem Webservice zum nächsten, wird durch eine flexibel anpassbare BPEL-Orchestrierung der Services gesteuert.

Das System ermöglicht die prozessgesteuerte Anwendungsintegration von Prognose- und Überwachungssoftware, sowie Software für Simulation und Simulationsvorbereitung, sowie eine Informationsintegration, die neben direkten Relationen auch transitive Zusammenhänge zwischen Informationen aus Überwachung und Simulation nutzen kann und somit modifizierbar und flexibel erweiterbar ist. Im Einzelnen verfügt das Rahmeninformationssystem über folgende Komponenten:

Management der 4D-Bauwerksinformationen

Die Informationen über das Ingenieurbauwerk, den Boden sowie über Bau- und Überwachungsprozesse werden als objektorientiertes, parametrisches Modell in einer Wissensbasis auf der Grundlage einer OWL-DL-Beschreibungslogik unter Berücksichtigung der zeitlichen Bauzustände, die sich aus dem Bauprozess ergeben, gespeichert. Die Verknüpfung der Daten mit dem Prozessmodell ist im Hinblick auf die erhebliche zu bearbeitende Datenmenge ein unabdingbarer Basisbaustein für die effiziente Datenverwaltung. Dies stellt den gezielten Zugriff auf Objekt-/Prozessdaten sowie die Filterung nach bestimmten Objekt-/Prozesseigenschaften sicher und unterstützt damit durch die Abfragemöglichkeit zusammengehöriger, vergleichbarer Prognose- und Überwachungsdaten ein effizientes Monitoring des Bauzustandes.

Management von Messprogrammen, Sensoren, Labor- und Felduntersuchungen

Messprogramme, Sensoren, Labor- und Felduntersuchungen werden mit ihren Beziehungen zum Bauwerk, zu Baumaschinen und zum Bauablauf ebenfalls in der OWL-DL-Beschreibungslogik modelliert. Die Messwerte selbst können in einer relationalen Datenbank abgespeichert werden. Die Beschreibungslogik kann mit der relationalen Datenbank, die zur automatischen Messwernerfassung genutzt wird, verknüpft werden. Die Beschreibungslogik bietet durch die Anwendung von logischem Schlussfolgern die Möglichkeit, die Konfiguration des Messsystems sowohl planen als auch leicht umplanen und so leicht Variantenuntersuchungen durchführen zu können als auch die automatische Datenauswertung durch die Integration von Messdaten, Bauwerksdaten und Prozessdaten zu erleichtern.

Management der modularen mechanischen Modelle und ihrer Variationen

Die Stoffgesetze werden dezentral abgespeichert und mit ihren Eigenschaften, Anwendungsbereichen und -grenzen durch eine Beschreibungslogik beschrieben. Die Bereitstellung als auch die Beschreibung kann durch den Stoffgesetzautor bei der Veröffentlichung des Stoffgesetzes angelegt werden. Sie enthält die logischen Fakten, die eine Entscheidung für oder gegen ein Stoffgesetz bei einem geotechnischen Problem ermöglicht. Der Endanwender hat damit die Möglichkeit, unterstützt durch das wissensbasierte System schnell und effizient geeignete mechanische Modellmodule gezielt nach logischen Kriterien abzufragen, auszuwählen und zu Simulationsmodellen zu kombinieren. Durch eine wissensbasierte Steuerung der Parametervariationen wird die Wahl sinnvoller, realistischer Parameterkombinationen gewährleistet. Die Untersuchung unrealistischer Parametersets, die durch einfache kombinatorische Verfahren ohne Berücksichtigung des geotechnischen Wissens erfolgen, ist damit erheblich reduziert. Dies trägt somit zur Verminderung von Rechenaufwand und Fehlinterpretationen bei.

Die logikbasierte Wissensrepräsentation ist durch eine Beschreibungslogik in OWL-DL und SWRL umgesetzt und wird mit einer Inferenzmaschine (hier: Jess Rule Engine, Sandia) deduktiv ausgewertet. Damit werden passend zum Bauvorhaben und zur Situation theoretisch mögliche Stoffgesetze und sinnvolle Parameter ermittelt. Der Ingenieur wählt die für die Systemidentifikation zu nutzenden Modelle aus dieser Menge aus. Nach Durchführung der simulationsbasierten Systemidentifikation mit den gewählten Modellkandidaten wird durch den Ingenieur aus den bestehenden identifizierten und priorisierten Modellen ein Modell ausgewählt und als aktuelles Berechnungsmodell gesetzt. Hierzu werden Modell-Distanzmaße eingesetzt, die den Unterschied zwischen den geotechnischen Modellen im Vergleich zu den Messwerten quantifizierbar machen

(Kap. 3.3.2). Zur Vermeidung von physikalisch nicht plausiblen Modellalternierungen werden Trendanalysen als Entscheidungsbasis für Modelländerungen eingesetzt. Die geotechnischen Auswerte- und Optimierungsalgorithmen werden als Webservices umgesetzt.

5.3. Wissensbasis

Die Wissensbasis des Überwachungs- und Prognosesystems wird auf der Grundlage eines Systemmodells der involvierten Objekte erstellt. Dieses Systemmodell wird losgelöst von der Fachdomäne des Bauwesens zunächst generisch entwickelt, um eine spätere Anpassungsmöglichkeit der Modelle auf ähnlich gelagerte Problemstellungen in anderen Fachgebieten des Ingenieurwesens offen zu halten. Abbildung 49 zeigt das Systemmodell, das die grundlegenden Konzepte des Überwachungs- und Prognosesystems beschreibt.

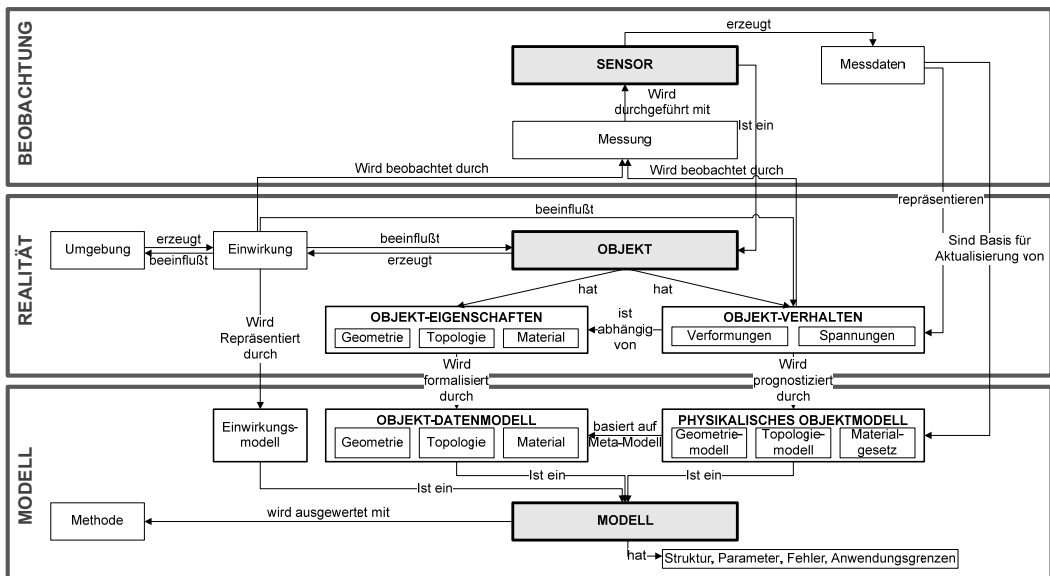


Abbildung 49: Systemmodell der Prognose und Überwachung

Zur Strukturierung werden, ohne eine tiefgreifende philosophische Diskussion anstoßen zu wollen, drei grundlegende Sichten des zu betrachtenden Gesamtsystems eingeführt: Realität, Modell und Beobachtung. Diese Dreiteilung ist die Grobstruktur der weiteren Modellbildung und Datenverarbeitung. Hintergrund ist, dass die bestehende und geplante Realität durch Modelle repräsentiert werden, um reales Verhalten simulieren zu können. Die gleiche Realität wird durch Beobachtung erfasst, um sie verstehen und kontrollieren zu können.

Objekte sind Gegenstände der Realität, die durch Einwirkungen aus ihrer Umwelt beeinflusst werden und in Wechselwirkung Einwirkungen auf ihre Umwelt erzeugen. Objekte können sowohl Bauobjekte, wie Träger, Stützen, Tunnel-Tübbinge oder Böden als auch

Baumaschinen, wie Tunnelvortriebsmaschinen, Bagger, Verdichtungsmaschinen, etc. sein. Die Tatsache, dass auch nichtgegenständliche, abstrakte Objekte existieren, ist in dem hier betrachteten Zusammenhang zunächst unwesentlich. Jedes Objekt der Realität hat Eigenschaften. Geometrieeigenschaften charakterisieren die Form eines Objekts, Topologieeigenschaften beschreiben dessen Lage in Bezug auf andere Objekte und Materialeigenschaften beschreiben das Material, aus dem das Objekt besteht. Desweiteren hat jedes Objekt ein Verhalten, das von den Einwirkungen auf das Objekt abhängig ist. So können sich z.B. in Abhängigkeit der Einwirkung unterschiedliche Verformungs- und Spannungszustände einstellen.

Die unterschiedlichen Aspekte der Realität werden durch Modelle repräsentiert. Objekteigenschaften werden formal durch Objekt-Datenmodelle abgebildet. Dieser Begriff fasst die Aspekte der Modellierung zusammen, die durch Kenngrößen beschrieben werden können. Das Objektverhalten wird durch physikalische Modelle abgebildet, die eine Komposition aus Materialgesetz, Geometriemodell und Topologiemodell darstellen. Einwirkungen werden durch Einwirkungsmodelle, z.B. Lastmodelle, repräsentiert.

Sowohl die Einwirkungen als auch das Objekt-Verhalten können durch Messungen beobachtet werden. Diese Messungen werden mit Sensoren durchgeführt. Sensoren sind (reale) Objekte, die Messdaten erzeugen. Die Messdaten wiederum repräsentieren das Objektverhalten und sind gleichzeitig die Basis zur Identifikation der (mechanischen) Verhaltensmodelle. Insofern schließt sich hier der Kreis aus Realität, Modell und Beobachtung.

Sowohl eine modellbasierte Simulation als auch Beobachtungen erfassen jeweils die Realität nur näherungsweise. Modelle sind mit Modellungenauigkeiten und Modellfehlern behaftet (JCSS, 2001). Messungen sind sowohl zeitlich als auch räumlich nur punktuell durchführbar, geben also nur ein diskretes Abbild einer kontinuierlichen Realität wieder. Außerdem sind sie mit Messabweichungen behaftet. Das Messergebnis repräsentiert also auch nur näherungsweise den wahren Wert einer Messgröße, vgl. z.B.(Grabe, 2005), (DIN 1319-1, 1995).

Ziel ist es daher, den Umfang des Wissens über die Realität durch die kombinierte Auswertung von modellbasierter Simulation und Beobachtungsdaten kontinuierlich zu erhöhen. Die integrierte Betrachtung von Simulation und Überwachung erfordert die durchgängige Erfassung, Speicherung, Verarbeitung und den Austausch von Daten. Hierfür ist eine flexible semantische Datenstruktur notwendig, die zusätzlich die Modellierung des logischen Systems gestattet. Nur durch ausreichende Formalisierung des Wissens lässt sich der manuelle Aufwand für die Bearbeitung von Daten reduzieren, d.h. die Daten und das Wissen müssen in einer Form vorliegen, die einen weitestgehend automatischen und informationsverlustfreien Datenzugriff, -verarbeitung und -austausch erlaubt. Demzufolge umfasst die Wissensbank folgende Domänen als Basis für das Informationssystem:

- Prozess- und Objektorientierter Metamodell-Kern zur Verknüpfung von Prozessmodell und Produktmodell
- Grundbauobjekte und Böden
- Messinstrumente / Sensoren
- Geotechnische Modelle, Modellverwaltung

Die in dieser Arbeit beschriebenen Daten- und Prozessmodelle werden nach dem Top-Down-Ansatz entwickelt. Dieser Ansatz ermöglicht die bevorzugte Behandlung des Integrationsaspekts. Diesem ist gegenüber dem Detailgrad der Datenmodelle für diese Arbeit die wichtigere Rolle zuzumessen. Das heißt, das Gewicht wird der domänenübergreifenden Modellierung auf Meta-Ebene gegeben. Die detaillierte Datenmodellierung für jede Domäne ist eine Aufgabe, die eher nachgeordneten Forschungscharakter und vor allem normativen Charakter besitzt und in der Regel unter Einbeziehung von Domänenspezialisten mehrere Iterationszyklen erfordert. Es wird daher in dieser Arbeit Wert darauf gelegt, ein Metamodell zu entwickeln, das die notwendigen Konstrukte zur Entwicklung detaillierter Domänenmodelle zur Verfügung stellt. Dieses Metamodell wird in den nachfolgenden Abschnitten hergeleitet und beschrieben.

5.3.1. Objektorientierte Modellierung von Objektzuständen

Modellierung von Objekten

Auf Basis des oben beschriebenen Systemmodells soll nachfolgend die Modellierung von Objekten der Realwelt detaillierter ausgearbeitet werden. In Abbildung 50 sind die für die Prognose- und Überwachung von Ingenieursystemen wesentlichen Aspekte eines Objektes dargestellt.

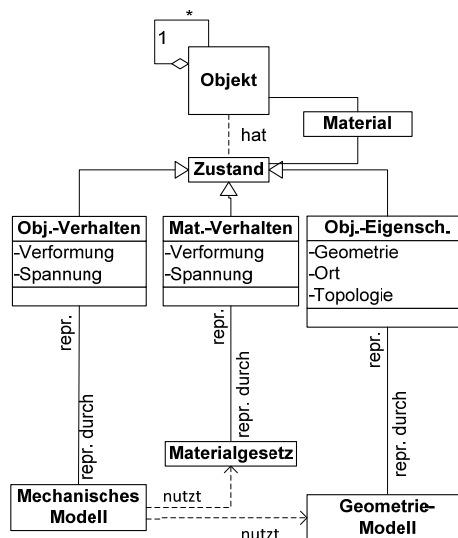


Abbildung 50: Repräsentation der wesentlichen Aspekte von Objekten in UML

Die objektorientierte Modellierung von Objekten ist in der Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) ein gängiges Modellierungsparadigma. BIM beschränken sich jedoch weitestgehend darauf, die Objekteigenschaften eines Bauwerks und der Bauwerksteile zu modellieren. Für viele Zwecke, z.B. zur Erstellung von Ausführungsplänen, Durchführung von Fachplanungen usw. ist dieser Informationsgehalt meist ausreichend. Die kontinuierliche Überwachung, Systemidentifikation und Prognose emergenter Bauwerkssysteme erfordert die Erfassung zeitabhängiger, prozessinstationärer Zustände der Boden-

und Bauwerkseigenschaften sowie zusätzlich die Erfassung des Boden-Bauwerk-Verhaltens. Im Rahmen der Modellbildung in dieser Arbeit wird daher über die übliche BIM hinaus berücksichtigt, dass Objekteigenschaften in der Realität zustandsabhängig sind, d.h. Eigenschaften können sich ändern und sind damit nicht nur an das Objekt an sich gekoppelt, sondern auch an Einwirkungen auf das Objekt während dessen Entwicklungsgeschichte. Desweiteren wird in dem hier entwickelten Metamodell neben der Repräsentation der Objekteigenschaften auch die Repräsentation des Objektverhaltens berücksichtigt. Dies ist für die Prognose- und Überwachungsaufgabe erforderlich, da sich sowohl die Simulation als auch die Messung auf Effekte beziehen, die abhängig vom Objektverhalten sind. Ein Objekt befindet sich immer in einem bestimmten Zustand, der durch Objekteigenschaften und Objektverhalten beschrieben werden kann und der von der Geschichte des Objektes abhängt. Desweiteren besteht ein Objekt aus einem Material, das ein definiertes Materialverhalten aufweist. Das Materialverhalten wird durch ein Materialgesetz (Stoffgesetz) abgebildet. Materialgesetz und geometrisches Modell enthalten die notwendigen Informationen zur Bildung des mechanischen Modells des Objektes. Damit wird das Verhalten des Materials in Verbindung mit den Objekteigenschaften auf das Verhalten des Objektes übertragen.

Die Aggregation mehrerer Objekte ergibt wiederum ein Objekt. Die sehr allgemeine Definition des Objektes gestattet die Integration und Verwendung anderer Referenzmodelle, die objektorientiert aufgebaut sind. So können z.B. Bauwerksmodelle, die auf Basis der IFC (ISO PAS 16739, 2005) modelliert sind mit dem hier vorgeschlagenen Modell verknüpft werden. Die Definition des Objektes in dieser Arbeit entspricht in etwa der Klasse `ifcElement`. Diese Kompatibilität ist insbesondere aus zwei Gründen von Interesse: (1) Sie gestattet die Verwendung von Klassen aus den IFC, z.B. zur geometrischen Modellierung. Die redundante Definition von Klassen, wie Punkt, Linie, Flächen, etc. ist damit nicht notwendig. (2) Bei der Überwachung von Tiefbaumaßnahmen, insbesondere bei der Überwachung angrenzender Gebäude, können bestehende IFC-Modelle des Gebäudes direkt mit dem auf Basis des hier entwickelten Metamodells erstellten geotechnischen Modell als Gesamtsystem integriert und berechnet werden. Desweiteren ist die Integration weiterer Modellierungsaspekte, wie z.B. stochastische Modellierung, Risikomodellierung etc. durch die Verknüpfung mit dem im BMBF-Projekt Mefisto entwickelten Multi-Modell-Ansatz (Scherer, Schapke, & Katranuschkov, 2010) auf Basis der Mefisto-Baukernontologie möglich.

Zuordnung von Daten zu Objekten

Daten, die durch Simulation als auch durch Messungen erzeugt werden, werden sofern sie einem Objekt direkt zuordenbar sind, dem Objekt zugeordnet (Abbildung 51). Hierbei wird u.a. auch berücksichtigt, dass Daten, die einem Objekt zugeordnet sind, immer einen bestimmten Zustand des Objektes repräsentieren.

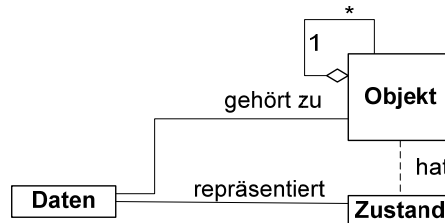


Abbildung 51: Zuordnung von Daten zu Objekten und zu einem bestimmten Objektzustand

Im Weiteren wird berücksichtigt, dass Daten neben dem Objekt, dessen Attribute sie repräsentieren, auch ihrem Ursprung zuordenbar sind (Abbildung 52).

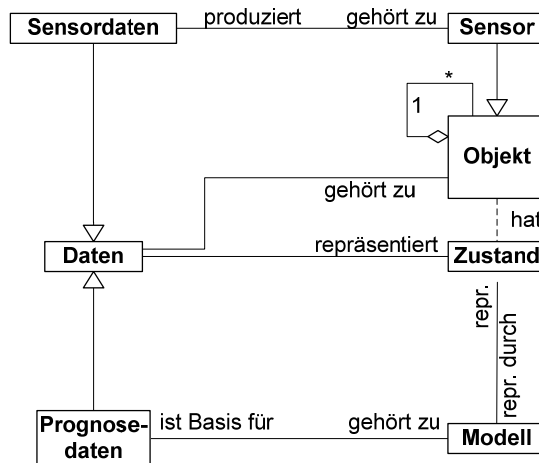


Abbildung 52: Zuordnung von Daten zu Objekten und zu einem bestimmten Objektzustand

Messdaten resultieren aus Sensoren, wobei ein Sensor wiederum ein Objekt entsprechend der hier benutzten Objektdefinition ist. Prognosedaten werden durch Simulation mit Modellen erzeugt, die die Eigenschaften und das Verhalten von Objekten – bei einem bestimmten Zustand – repräsentieren.

Nach diesem Metamodell besteht ein Prozess aus i Aktivitäten und $i+1$ Ereignissen, wobei i mindestens eins ist. Aktivitäten haben jeweils ein Ereignis als Vorgänger und als Nachfolger. Ereignis und Aktivität wechseln sich jeweils ab. Die direkte Folge zweier oder mehrerer Aktivitäten bzw. Ereignisse wird ausgeschlossen. Der Prozess ergibt also einen bipartiten gerichteten Graphen, der syntaktisch identisch mit dem Modell der Petrietze ist. Desweiteren sind Verzweigungen durch einen „UND“-Konnektor möglich. Die in Kap. 4.1.2 im Rahmen der EPK vorgestellten „ODER“-Konnektoren werden für das beschreibungslogikbasierte Metamodell nicht weiter berücksichtigt, da sie für die Wissensrepräsentation material- und energietransformierender Prozesse im Rahmen des hier eingeführten Verfahrens unnötig sind. Bei den angesprochenen Prozessen handelt es sich um Bau- und Messprozesse, die weitgehend festgelegt sind und in denen Entscheidungsmöglichkeiten nur durch aktiven Ingenieureingriff bestehen.¹² Zur Beschreibungslogikrepräsentation weiterer, hier nicht genutzter EPK-Konzepte wird auf (Scherer, Katranuschkov, & Rybenko, 2008) verwiesen.

Die Nutzung von Prozessmodellen ist nur dann effizient möglich, wenn (1) zur Konfiguration der Prozessmodelle wiederverwendbare Module den Aufwand der Modellbildung reduzieren können und (2) die Prozesse in unterschiedlichen Granularitätsstufen abgebildet werden können, d. h. wenn Prozesse von einer groben Granularitätsstufe in eine feinere Granularitätsstufe detailliert werden können. Beide Anforderungen können durch die Aggregation mehrerer Prozesselemente zu EINEM Prozesselement erfüllt werden.

Geht man von dem oben eingeführten, Prozessmetamodell mit den Grundelementen Ereignis, Aktivität und Konjunktion aus, so kommt hier nur die Aggregation einer Prozesskette zu einer Aktivität in Betracht. Als Erweiterung wird also ein Prozessmodul vorgeschlagen, bei dem eine Aktivität wiederum aus mindestens zwei Aktivitäten und mindestens einem Ereignis bestehen kann.

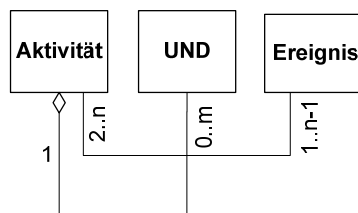


Abbildung 54: Definition eines Prozessmoduls

Dies entspricht prinzipiell dem Gedanken der Detaillierung von EPK-Funktionen, vgl. Tabelle 2, wobei die EPK-Detaillierung lediglich eine Referenz auf eine weitere EPK ist und keine Semantik zur tatsächlichen Umsetzung einer Aggregation von Teilelementen zu einem Aggregat über Beziehungen der Art „ist Teil von“ definiert.

¹² Hiervon zu unterscheiden sind die Prozesse der Datenauswertung, die nicht mit den hier entwickelten Wissensmodellen abgebildet werden, sondern mit Prozessausführungssprachen, bei denen zur algorithmischen Umsetzung selbstverständlich die Nutzung erweiterter Entscheidungsbedingungen möglich ist.

Ein Prozess-Modul PM_i

$$PM_i = \{a_{i,1} \dots a_{i,n}, e_{i,1} \dots e_{i,n-1}\} \quad (22)$$

besteht aus

- n Aktivitäten $a_{i,1}$ bis $a_{i,n}$, die die Aktivität a_i detaillieren,
- n-1 Ereignissen $e_{i,1}$ bis $e_{i,n-1}$

Das aggregierte Prozessmodul beginnt und endet dabei jeweils mit einer Aktivität. Es sei vorsorglich darauf hingewiesen, dass dadurch die Grundregel der EPK, nach der ein Prozess mit jeweils einem Ereignis beginnt und endet, nicht verletzt wird, da die Module zur Detaillierung einer Aktivität genutzt werden, die bereits jeweils ein Ereignis als Vorgänger und Nachfolger hat. Es kann damit eine Bibliothek von Prozessmodulen aufgebaut werden, die nach Bedarf einer grobgranularen Aktivität zugeordnet werden. Eine Instanz eines Prozessmoduls könnte also wie folgt aussehen:

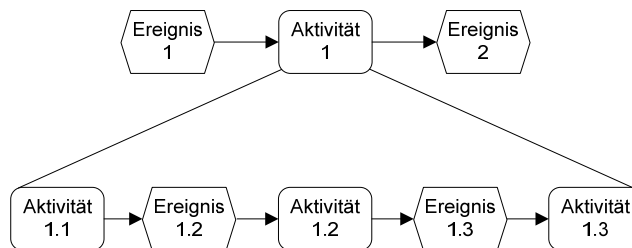


Abbildung 55: Instanz eines Prozessmoduls

Betrachten wir als einfaches Beispiel die Herstellung einer Verbauwand, die in grober Granularität durch folgenden Prozess repräsentiert wird.



Abbildung 56: High-Level-Modell eines Beispielprozesses

Die Aktivität "Verbauwand installieren" ist wiederum ein Prozess, der als Prozessmodul vorliegen kann. Es können Prozessmodule für unterschiedliche Bauverfahren vorliegen, wie z.B. das Verfahren zur Herstellung der Verbauwand als Schlitzwand, vgl. Abbildung 57.



Abbildung 57: Detaillierung der Prozessaktivität „Verbauwand installieren“

Die Aktivität "Verbauwand installieren" aus Abbildung 56 wird dabei jedoch nicht einfach durch das Prozessmodul in Abbildung 57 ersetzt. Die Aggregation wird so umgesetzt, dass die Elemente des Prozessmoduls über die Aggregationsbeziehung „ist_Teil_von“

mit der Aktivität „Verbauwand installieren“ verbunden werden. Durch diese informationserhaltende Detaillierung der Prozessaktivitäten können im Rahmen des verfügbaren Informationsgehalts Modellsichten mit beliebiger Granularität erzeugt werden.

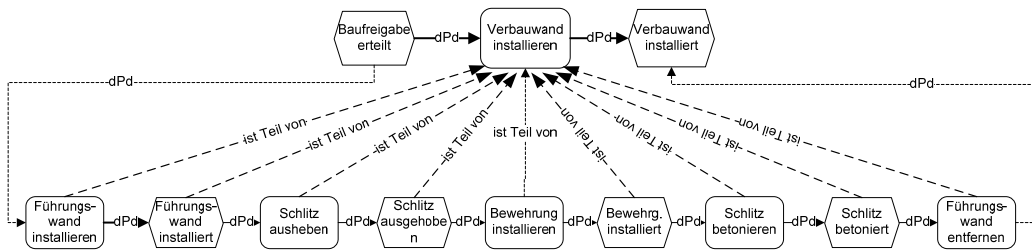


Abbildung 58: Informationserhaltende Detaillierung der Prozessaktivität durch Aggregation

Die Einbindung in den Prozess, d. h. die Herstellung der Vorgänger/Nachfolger-Beziehungen an den Schnittstellen des Prozessmoduls ist bei Implementierung der Modelle als Beschreibungslogik durch Inferenz möglich. Das hierfür anwendbare Verfahren wird weiter unten in diesem Kapitel eingeführt.

Berücksichtigung der Zeit

Insbesondere für die Überwachung ist die zeitliche Einordnung von Prozesselementen erforderlich. Diese zeitliche Einordnung kann sowohl qualitativ im Rahmen der Prozess-topologie erfolgen, als auch quantitativ durch Erfassung der Uhrzeit. Unter der Annahme, dass eine Aktivität zur Transformation von Material, Energie und Information eine bestimmte Zeitdauer beansprucht, wird die Zuordnung einer Zeit so definiert, dass Aktivitäten zu jeweils einem bestimmten Zeitpunkt beginnen und enden. Ereignisse werden im Rahmen dieser Arbeit so betrachtet, dass sie zu einem bestimmten Zeitpunkt eintreten und nicht von Dauer sind. Üblicherweise wird die gesamte Prozesskette für ein Bauprojekt in Sub-Prozesse, also Bauphasen, strukturiert. Während einer Bauphase wird eine wesentliche Änderung des Zustands des entstehenden Bauwerks realisiert. Bauphasen werden so definiert, dass sowohl deren Beginn als auch deren Ende Ereignisse sind. Mit diesen Annahmen ergibt sich folgendes Prozess-Meta-Modell (Abbildung 59):

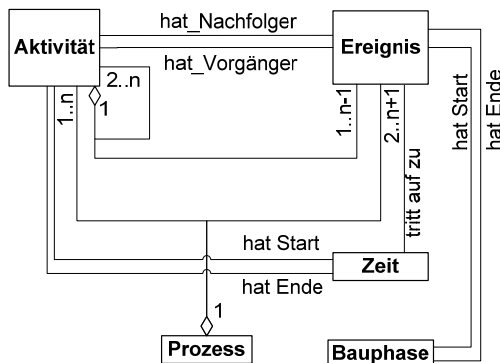


Abbildung 59: Prozess-Meta-Modell

5.3.3. Integration von Produkt- und Prozessmodell

Das Prozessmodell ist erst in Verknüpfung mit dem Produktmodell für die Überwachung sinnvoll einsetzbar. Diese Verknüpfung erfolgt mit der „behandelt_durch“-Beziehung (Faschingbauer & Scherer, 2008), die im Prinzip durch Aufspaltung der Bezeichner der Aktivitäten in ihre atomaren Bestandteile hergestellt wird. So verbleibt im Konzept Aktivität lediglich die tatsächliche Aktivität (Verb), ohne die Information auf welches Objekt (Nomen) sich die Aktivität bezieht. Das Objekt wird also abgespalten und mit der „behandelt_durch“-Beziehung wieder mit der Aktivität verbunden wird. Das Objekt wird zur Ressource für die Aktivität.

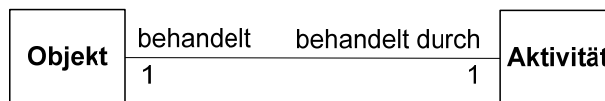


Abbildung 60: Objekt-Aktivität-Einheit

Dieses Konzept wird nachfolgend als Objekt-Aktivität-Einheit (OAE) eingeführt.

$$OAE_i = \{a_i, o_i, R(a_i, o_i)\} \quad (23)$$

Eine OAE besteht aus

- 1 Aktivität a ,
- 1 Objekt o ,
- 1 Beziehung $R(a,o)$, die ein Objekt mit einer Prozessaktivität verknüpft.

Auch bei dieser Erweiterung können unterschiedliche Granularitätsstufen durch Aggregation modelliert werden, d.h. eine Aktivität kann eine Aggregation mehrerer Prozesselemente sein. Ein Objekt kann eine Aggregation mehrerer Objekte sein. Da bei dieser Detaillierung mehrere Sub-Objekte und Sub-Aktivitäten entstehen stellt sich die Frage nach deren Verknüpfung untereinander. Da jeder Aktivität durch die „behandelt“-Verknüpfung ein Objekt zugeordnet wird und diese Prädikate jeweils eine Objekt-Aktivität-Einheit (OAE) darstellen, ist es konsequent, diese Objekt-Aktivität-Einheit auch bei der Detaillierung beizubehalten. Hierbei ist eine dritte Aggregation notwendig: die der „Behandlung“-Verknüpfung. D. h. eine grobgranulare Handling-Verknüpfung kann durch eine Aggregation von Verknüpfungen, die jeweils zur Aggregation von Objekt und Aktivität passen müssen, detailliert werden. Zur Detaillierung werden Produkt-Prozess-Module eingeführt, die eine Objekt-Aktivität-Einheit OAE detaillieren und ihrerseits jeweils wiederum eine Einheit darstellen. Das entsprechende Schema ist nachfolgend in Abbildung 61 gegeben:

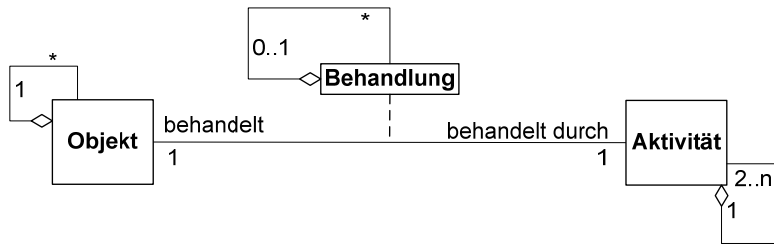


Abbildung 61: Objekt-Aktivität-Einheit mit Aggregation der „Behandlung“-Beziehung

Ein Produkt-Prozess-Modul PPM_i

$$PPM_i = \{a_{i,1} \dots a_{i,n}, e_{i,1} \dots e_{i,n-1}, o_{i,1} \dots o_{i,m}, R(a_{i,x}, o_{i,y}) \subseteq R(a_{i,j}, o_{i,k}) \forall j = 1 \dots n, \forall k = 1 \dots m\} \quad (24)$$

besteht aus

- n Aktivitäten $a_{i,1}$ bis $a_{i,n}$, die die Aktivität a_i detaillieren,
- n-1 Ereignissen $e_{i,1}$ bis $e_{i,n-1}$,
- m Objekten $o_{i,1}$ bis $o_{i,m}$, die das Objekt o_i detaillieren und
- $(\geq m, \leq m \times n)$ Beziehungen $R(a_{i,x}, o_{i,y})$, die die Objektdetails mit den Prozessdetails verknüpfen.

Das Konzept der PPM ist in Abbildung 62 dargestellt. Auch hier gilt, entsprechend der Vorgehensweise, die bereits bei der Detaillierung einfacher Prozessmodelle gezeigt wurde, dass die zu detaillierenden Objekte und Aktivitäten nicht durch ihre jeweiligen Sub-Elemente ersetzt, sondern über die Aggregationsbeziehung „ist Teil von“ verknüpft werden.

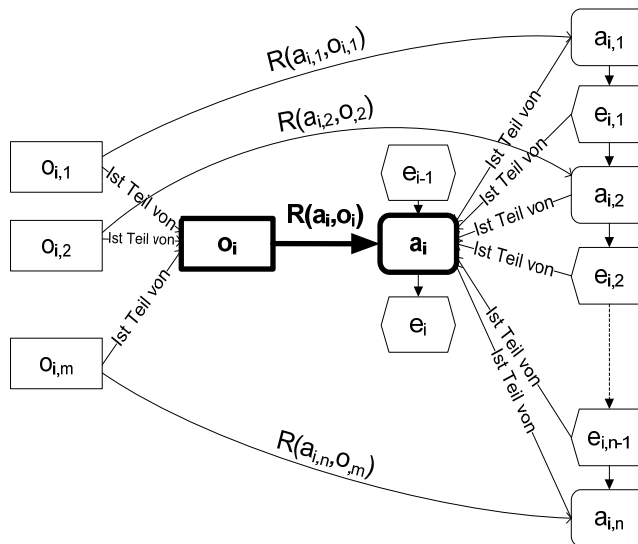


Abbildung 62: Produkt-Prozess-Modul

Diese Modellierungsmethode ermöglicht die Konfiguration von Produkt-Prozess-Modellen nach dem Top-Down-Ansatz. Sie ist für Bauprojekte anwendbar, die sich in diskrete Ereignisse und Aktivitäten herunterbrechen lassen.

Beispiel: Produkt-Prozess-Modell zur Herstellung einer Baugrube

In Abbildung 63 sind die ersten Schritte zur Herstellung einer Baugrube modelliert. Die Herstellung des Verbaus wird dabei zunächst in grober Granularität durch die Objekt-Aktivität-Einheit *behandelt_durch(Verbauwand, installieren)* repräsentiert.

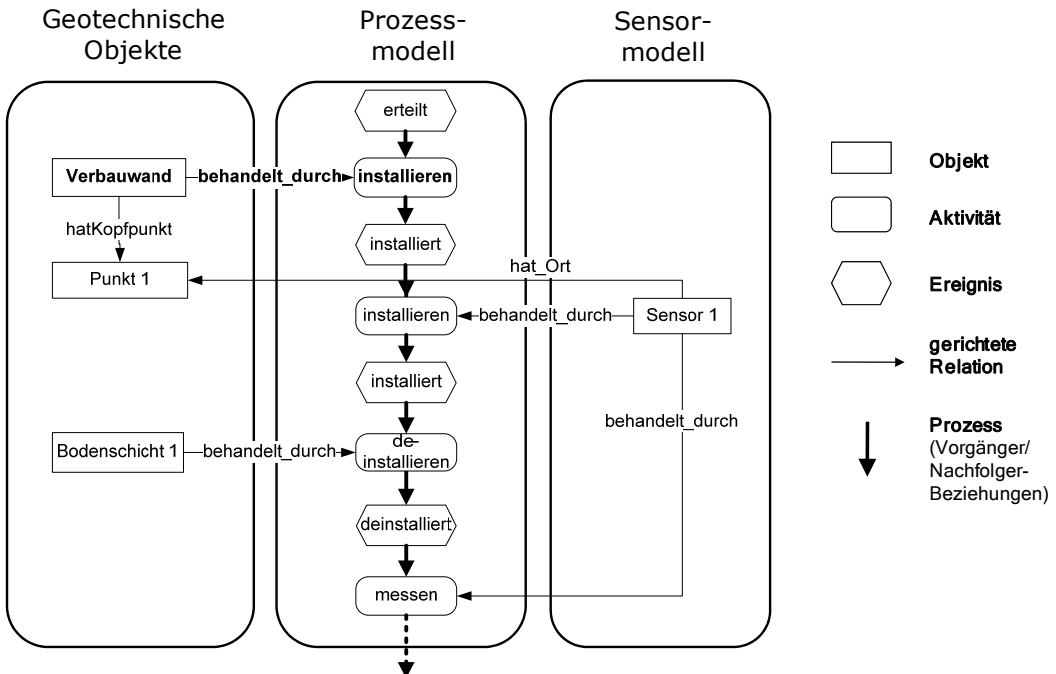


Abbildung 63: Produkt-Prozess-Modell – Herstellung einer Baugrube

Die Detaillierung dieser Objekt-Aktivität-Einheit kann nun durch die Anwendung eines passenden Produkt-Prozess-Moduls vorgenommen werden. Das Produkt-Prozess-Modul ist dabei auf einen bestimmten Typus von Verbauwand sowie auf ein dafür mögliches Bauverfahren abgestimmt. Abbildung 64 zeigt ein Produkt-Prozess-Modul zur Herstellung der Verbauwand als Schlitzwand.

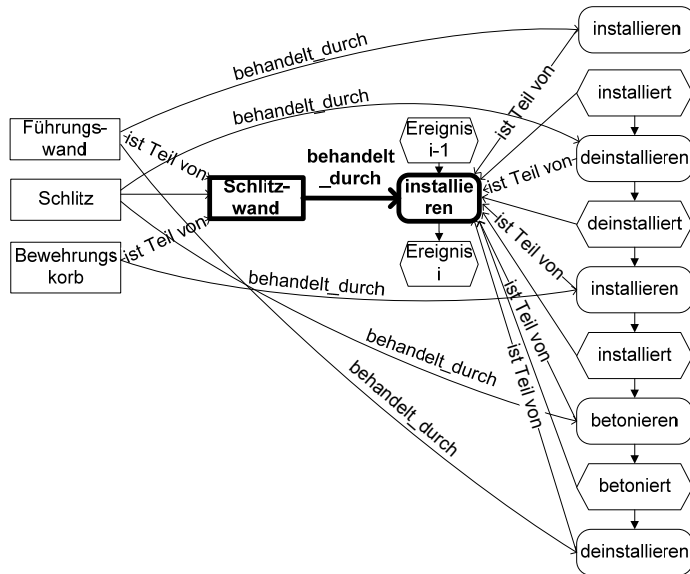


Abbildung 64: Produkt-Prozess-Modul – Herstellung Schlitzwand

Die Herstellung der Verbauwand wird damit als Aggregation der hierfür notwendigen Objekte, Aggregation von Prozessschritten sowie einer Aggregation der Relation repräsentiert. Es entsteht also eine Menge weiterer Objekt-Aktivität-Einheiten, wie z.B. *behandelt_durch(Führungswand, installieren)*. Die Herstellung einer temporären Führungswand gehört zum Bauverfahren der Schlitzwandherstellung. Auch dies kann wiederum durch ein Produkt-Prozess-Modul detailliert werden, vgl. Abbildung 65.

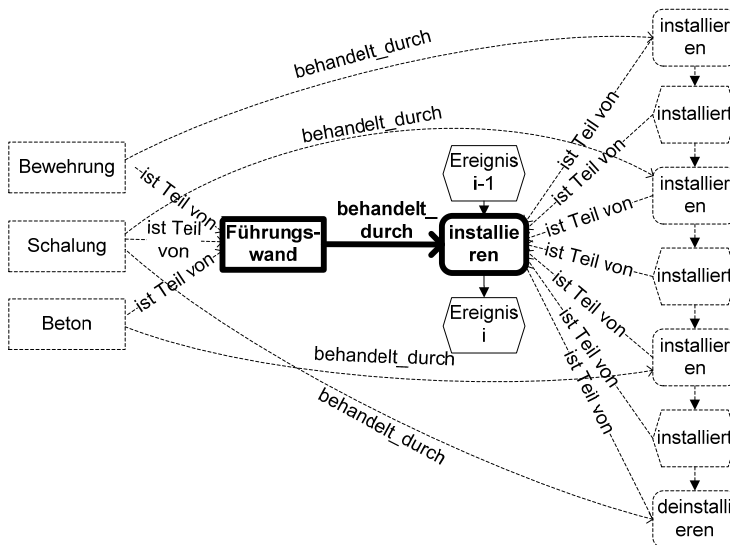


Abbildung 65: Produkt-Prozess-Modul – Herstellung einer Führungswand in Ortbetonbauweise

Die Referenzierung mit dem PPM der Schlitzwandherstellung resultiert schließlich in dem in Abbildung 66 dargestellten Graphen.

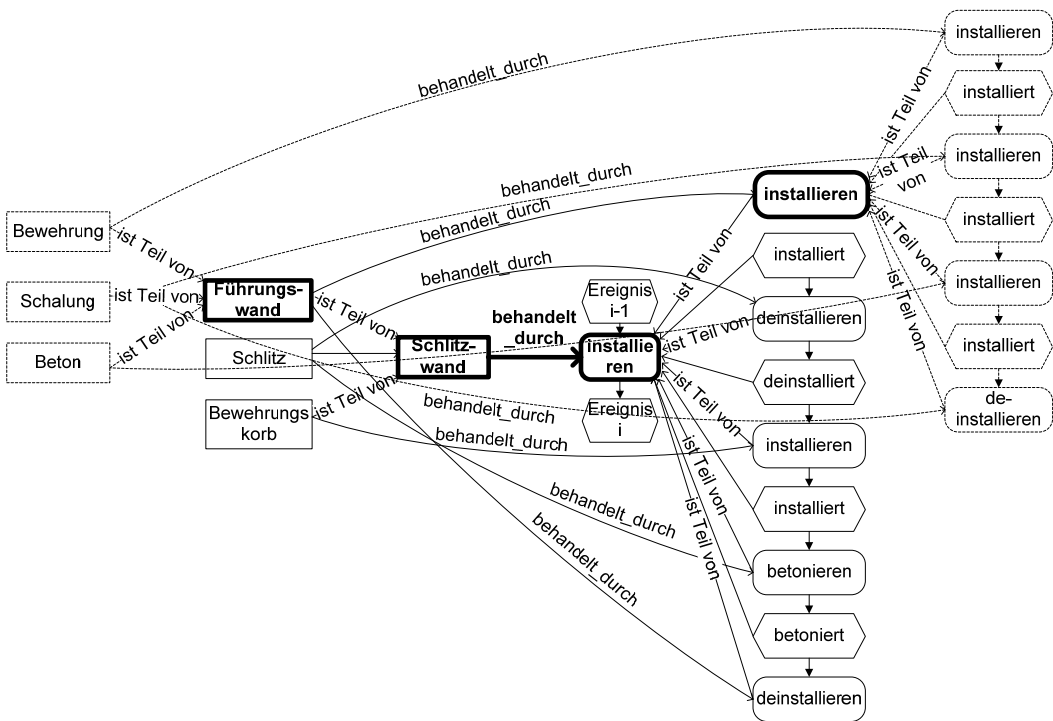


Abbildung 66: Nutzung des PPM Führungswand im PPM Schlitzwand

Modellierung von Zustandsänderungen

Der Zustand von Objekten bleibt insbesondere während der Bauausführung, wie bereits in Abschnitt 0 kurz erwähnt, nicht immer konstant. Bei bauprozessstationären Objekten ist davon auszugehen, dass sie in dem Zustand, in dem sie sich befinden, verbleiben. Damit wäre die Zuordnung von Objekt zu Zustand nach Abbildung 50 und die Zuordnung von Objekt zu Prozesselement wie in Abbildung 60 in diesem Fall ausreichend, um sowohl den Zustand des Objektes, als auch die Aktivität, die auf das Objekt ausgeführt wird, hinreichend zu beschreiben. Im Fall bauprozessinstationärer Objekte, z.B. temporärer Bauwerkselemente oder aber auch bei Sensoren dynamischer Sensornetze ist diese Art der Modellierung jedoch nicht ausreichend, um den Zustand eines Objektes in Abhängigkeit der ausgeführten Aktivität abzubilden, da z.B. bei Sensoren eine Verschiebung an einen anderen Ort im Laufe des Bauprozesses notwendig sein kann. Die Information über die Zustandsänderung soll daher mit erfasst und damit zur Nachvollziehbarkeit von Änderungen im System genutzt werden können. Primär geht es letztendlich darum, einem Objekt in Abhängigkeit der Prozessaktivitäten unterschiedliche Zustände, z.B. unterschiedliche Orte zuordnen zu können. Im Weiteren soll daher berücksichtigt werden, dass der Zustand eines Objektes durch die Aktivitäten eines Prozesses verändert werden kann. Hierzu wäre es prinzipiell notwendig, 3-stellige Prädikate einzuführen, die die Verknüpfung von Prozesselement, Objekt und Objektzustand (z.B. Ort) er-

lauben. Da die Modelle als Beschreibungslogik implementiert werden sollen ist jedoch die Nutzung 3-stelliger Prädikate nicht möglich. Das dreistellige Prädikat wird daher durch die Repräsentation zweier zweistelliger Prädikate mit Schlussfolgerung des dritten Prädikats realisiert (Abbildung 67).

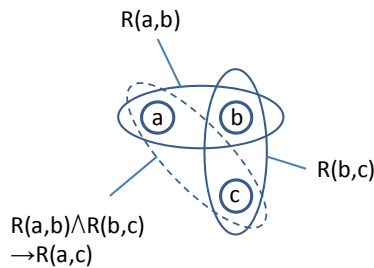


Abbildung 67: Beschreibungslogik-Repräsentation eines 3-stelligen Prädikates durch Nutzung der Transitivität

Dieses Konzept wird beim vorliegenden Problem so realisiert, dass der Zustand des Objektes durch die Aktivität, die das Objekt behandelt gesetzt wird (Abbildung 68). Die Tatsache, dass das Objekt dann diesen Zustand hat, wird durch eine entsprechende Deduktionsregel abgebildet.

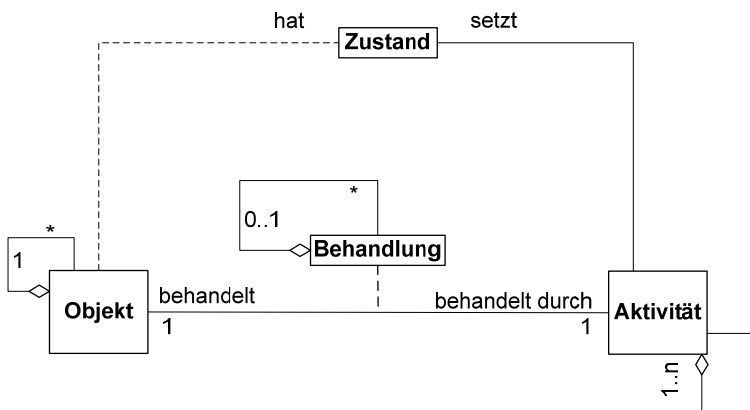


Abbildung 68: Aktivitätsinduzierte Zustandsänderung von Objekten

Änderungen lassen sich damit explizit erfassen, sind als solche gespeichert und können im Zusammenhang mit dem Bauprozess logisch ausgewertet werden. Diese Art des „Änderungsmanagements“ erfordert jedoch, dass Änderungen, die in der Realität vorgenommen werden (z.B. Umsetzung eines Sensors) auch im Modell aufgenommen werden.

Als Beispiel kann die Modellierung von Sensoren und ihre Aus-/Einbauaktivitäten herangezogen werden. Die explizite Beschreibung der Ein- und Ausbauaktivitäten eines Sensors als Prozessaktivität ist deswegen vorteilhaft, damit nachvollziehbar ist, wie mit dem Sensor verfahren wurde. Dies ist insbesondere wichtig, wenn Sensoren verschoben werden. Wird ein Sensor von Ort A nach Ort B verschoben, so misst er demzufolge die Messgröße an einem anderen Ort. Die Darstellung des Verschiebens über die Aktivitäten „ausbauen/einbauen“ ermöglicht es, die Identität des Sensors beizubehalten und ihm trotzdem nach dem Verschieben einen anderen Ort zuzuweisen.

In dem in der nachfolgenden Abbildung 69 gegebenen Beispiel wird durch die „Aktivität2“ (installieren) das Objekt „Sensor1“ behandelt und dessen Ort auf „Punkt 1“ gesetzt. Mit „Aktivität5“ wird dieser Sensor deinstalliert und mit „Aktivität6“ auf einen anderen Ort (Punkt 2) gesetzt. Auf diese Art und Weise können dem Objekt mehrere Orte zugeordnet werden, deren Gültigkeit vom betrachteten Prozessschritt abhängig ist.

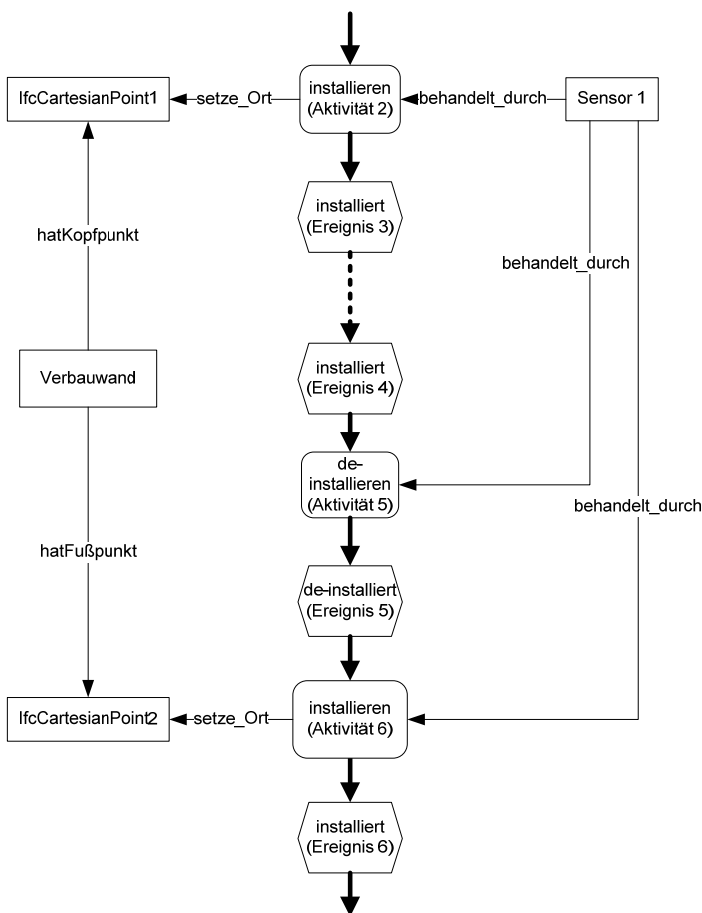


Abbildung 69: Beispiel – Verschiebung eines Sensors

Die Information, dass genau dieser Sensor zuvor an einem anderen Ort am Bauwerk eingesetzt wurde, geht damit nicht verloren und ist auch später noch nachvollziehbar. Diese Informationen sind unter anderem dann von Wert, wenn später z.B. Unklarheiten bezüglich der Datenqualität (Messfehler) auftreten und Änderungen im Sensorsystem nachvollzogen werden sollen. Gleiches gilt für die Kalibrierung von Sensoren. Die Änderung muss dann nicht mühsam durch den Vergleich unterschiedlicher Sensormodellversionen (soweit überhaupt vorhanden) identifiziert werden, weil sie explizit im gemeinsamen Produkt-Prozess-Modell vorhanden ist.

Ebenso ist es bei pfadabhängigen Stoffgesetzen der Fall, dass für unterschiedliche Bauphasen im gleichen Stoffgesetz Parameter variieren, z.B. Abhängigkeit der Steifigkeit von der Spannung. Auch hier ist die Erfassung unterschiedlicher Zustände des Objektes „Stoffgesetz“ ein wesentlicher Faktor bei der Simulation und bei der Datenverwaltung.

Die Existenz der zusätzlichen Prozesselemente führt jedoch dazu, dass die Komplexität des Graphen durch zusätzliche Knoten steigt und damit bei der Suche nach Informationen ein umfangreicherer Graph durchlaufen werden muss. Das Problem hierbei ist, dass die Information, die letzten Endes abgefragt werden soll meist nicht direkt vorliegt, sondern implizit im Graphen durch transitive Beziehungen gegeben ist.

Dieses Problem ist durch Inferenz lösbar, bedingt allerdings, dass das Produkt-Prozessmodell durch eine entscheidbare Logik repräsentiert wird.

5.3.4. Beschreibungslogikbasiertes Metamodell und Deduktionskalkül

Aufbauend auf den vorigen Überlegungen wird ein Metamodell und ein Deduktionskalkül entwickelt, die die Modellierung des Boden-Bauwerks-Systems und des Messsystems mit ihren Beziehungen zum Bauprozess und letztlich die deduktive Komplettierung der Beziehungen durch Inferenz erlauben. Das Metamodell ist in Abbildung 70 dargestellt.

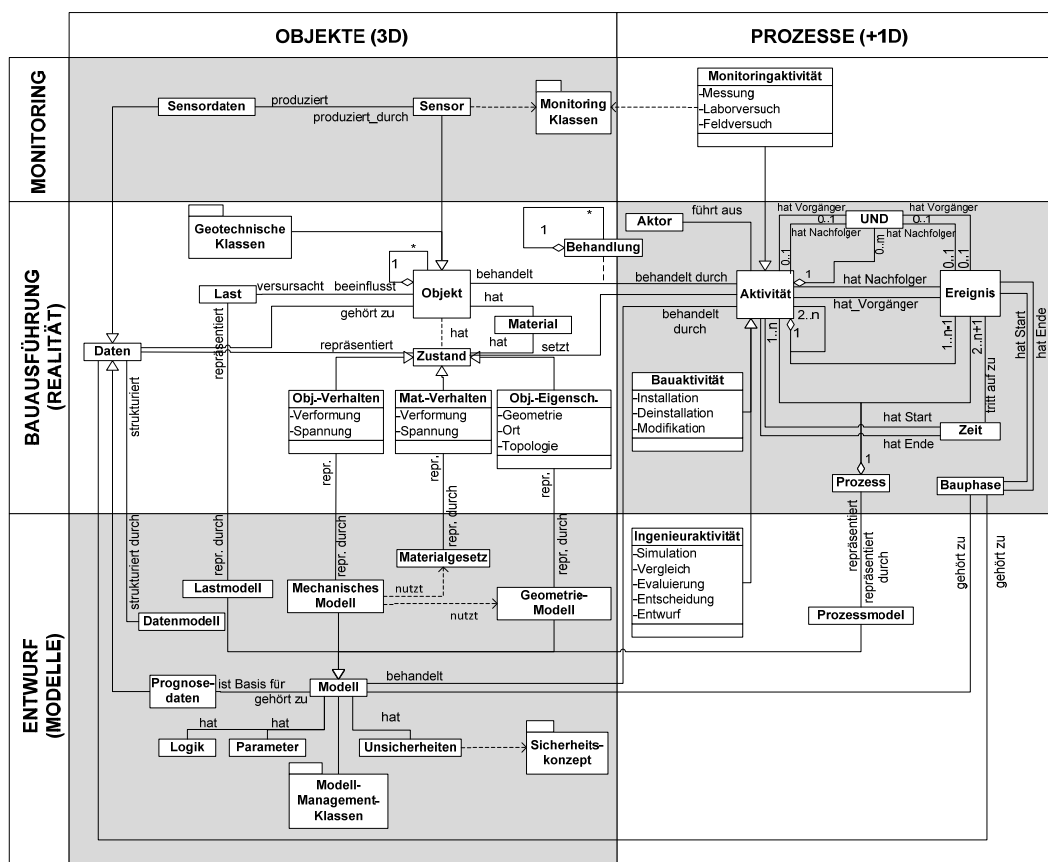


Abbildung 70: Produkt-Prozess-Metamodell

Die Zuordnung von Objekten zu Prozesselementen ermöglicht es, auf dieser Basis ein dynamisches Systemmodell zu erstellen, das unter anderem zur Simulation des Produktionsprozesses als auch zur Simulation des Bauwerksverhaltens für unterschiedliche Bauzustände genutzt werden kann. Desweiteren ist die Repräsentation von Maßnahmenplänen und deren prozessorientierte Ausführung im Notfall hier von großer Bedeutung.

In Kap. 2.1 wurde dargestellt, dass Aktivitäten des Bauens und der Informationsverarbeitung auf die „atomaren“ Aktivitäten Transport und Transformation heruntergebrochen werden können. Dies hat den Vorteil darin, dass Produkt-Prozess-Modelle, die auf dieser

Annahme basieren, einen hohen Grad der Wiederverwendung, insbesondere der maschinellen Verarbeitung ermöglichen.

Zur Semiautomatisierung der oben beschriebenen monitoringbasierten Produktionsadaptation werden Bauwerk, Messsysteme, Bauprozesse und Messprozesse in einem Systemmodell abgebildet. Eine besondere Bedeutung kommt dem Umstand zu, dass dieses Systemmodell keinen statischen Zustand abbildet, sondern eben auch die Veränderung eines sich im Bau befindlichen Ingenieursystems mit abbildet.

Die Einsatzmöglichkeiten dieser Logik sind vielfältig. Sowohl das Metamodell als auch der Deduktionskalkül sind für diverse Anwendungsfälle erweiterbar. Exemplarisch wird nachfolgend ein Kalkül entwickelt, der die Frage nach der Vergleichbarkeit von Sensor- und Prognosedaten beantworten soll.

Es sind nur Daten vergleichbar, die

- (1) zum gleichen Ort gehören,
- (2) zur gleichen Bauphase (= gleicher Bauzustand) gehören,
- (3) die gleiche physikalische Größe repräsentieren und
- (4) richtungsgleich sind.

Diese scheinbar trivialen Vergleichbarkeitskriterien produzieren derzeit bei der praktischen Arbeit einen hohen Aufwand. Die Vergleichbarkeit von Daten lässt sich auf der Basis des in Beschreibungslogik repräsentierten kombinierten Bauwerks-, Sensor- und Prozessmodells (kurz: 4D-Wissen) deduktiv automatisch ableiten. Dies erspart die manuelle Suche, Sortierung und den manuellen Vergleich der Daten.

Eine wesentliche Eigenschaft des entwickelten Produkt-Prozess-Metamodells ist, dass es nicht nur als Datenstruktur konzipiert wurde, sondern dass die Entwicklung eines logischen Systems im Vordergrund steht, das durch Inferenz die Explikation implizit repräsentierten Wissens erlaubt sowie die Prüfung auf Konsistenz im logischen Gesamtsystem des Bau- und Überwachungsprozesses, Boden-Bauwerkssystems und des Sensorsystems ermöglicht. Insofern unterscheidet sich der Ansatz von aktuellen Ansätzen in der automatischen Bauablaufplanung und 4D-Visualisierung, die auf Basis von Case-Based-Reasoning Methoden (Mikulakova, König, Tauscher, & Beucke, 2010) und Suchalgorithmen (Richter, Huhnt, & Wotschke, 2009), (Huhnt W. , 2009), (Huhnt & Richter, 2010) realisiert werden.

Die Formalisierung der Produkt-Prozess-Logik wird nachfolgend, beginnend mit der Prozesslogik und anschließender Erweiterung um die Produktlogik gezeigt. Im Fokus liegt dabei immer als Ziel die Entwicklung einer entscheidbaren Logik, die durch Inferenz die Explikation von Wissen ermöglicht.

Gegeben sei z. B. die folgende einfache Prozesskette:

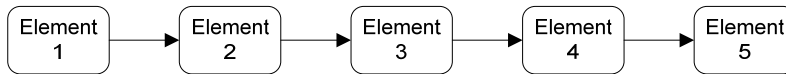


Abbildung 71: Prozesskette

Die Beziehungen zwischen den Prozesselementen sind Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen. Bei Vorgängern und Nachfolgern ist zwischen direkten und indirekten Beziehungen zu unterscheiden. So ist z. B. Element 2 ein direkter Nachfolger von Element 1 und ein indirekter Vorgänger von Element 4.

Nachfolgend werden Prädikate mit den folgenden Abkürzungen verwendet:

$Pd(a,b)$:= a ist mittelbarer oder unmittelbarer Vorgänger von b

$Sc(a,b)$:= a ist mittelbarer oder unmittelbarer Nachfolger von b

$dPd(a,b)$:= a ist direkter Vorgänger von b

$dSc(a,b)$:= a ist direkter Nachfolger von b

Bei den Prädikaten Pd und Sc bleibt also noch offen, ob es sich um einen direkten oder transitiven Vorgänger / Nachfolger handelt. Mit dieser Beziehung kann also allgemein definiert werden, ob ein Prozesselement vor oder nach einem anderen Prozesselement auftritt, ohne die endgültige Reihenfolge der Prozesselemente zu kennen. Damit können für jedes Prozesselement notwendige Vorgänger, also die Voraussetzungen für dessen Ausführung, definiert werden, ohne die genaue Reihenfolge definieren zu müssen. Die direkten Vorgänger/Nachfolger-Beziehungen, sowie die inversen Beziehungen können durch logische Schlussfolgerung abgeleitet werden.

Als Beispiel sei folgender Graph gegeben, der eine Anforderung der notwendigen Vorgänger/Nachfolger darstellt:

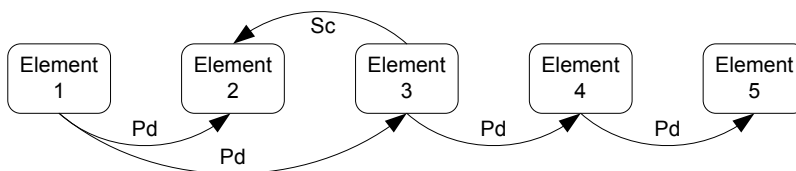


Abbildung 72: Prozesskette mit Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen

Es ist hierbei gegeben, dass Element1 ein Vorgänger (eine Voraussetzung) von Element2 und für Element3 ist. Element3 ist Nachfolger von Element2 und Vorgänger von Element4. Element 4 ist Vorgänger von Element 5. Auch wenn aus der Abbildung schon das Resultat der Prozesskette graphisch zu erkennen ist, geben die definierten Beziehungen die endgültigen direkten Verknüpfungen der Prozesskette formal erst indirekt wieder. Das Wissen, dass Element1 ein direkter Vorgänger von Element2 ist, ist bisher

nur implizit enthalten. Ebenso das Wissen darüber, dass Element2 Vorgänger von Element 3 ist, ist nicht explizit gegeben.

Zur Ableitung weiterer Beziehungen, die das Prozessmodell vervollständigen sollen, werden folgende Regeln verwendet:

$$\frac{Pd(a,b)}{Sc(b,a)} R_{inv1} \quad (25)$$

$$\frac{Sc(a,b)}{Pd(b,a)} R_{inv2} \quad (26)$$

$$\frac{Pd(a,b) \wedge Pd(b,c)}{Pd(a,c)} R_{transPd} \quad (27)$$

Die inverse Regel zu $R_{transPd}$ ist nicht notwendig, da dies schon durch R_{inv1} abgedeckt wird. Die Anwendung der Schlussregeln R_{inv1} , R_{inv2} und $R_{transPd}$ erzeugt die transitive Hülle des Prozessgraphen (Abbildung 73).

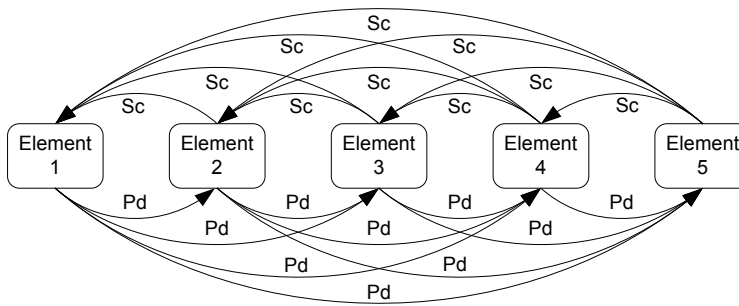


Abbildung 73: Transitive Hülle des Prozessgraphen

Die transitive Hülle (Pahl & Damrath, 2000) enthält für jedes Prozesselement die Information, welche Elemente des gesamten Prozesses vor oder nach ihm liegen. Im Weiteren ist nun noch interessant, welche dieser Vorgänger/Nachfolger-Beziehungen direkte Vorgänger bzw. Nachfolger sind, da dies für die endgültige Konfiguration des Prozesses von Bedeutung ist. Die Entscheidung, ob eine Vorgängerbeziehung das Merkmal eines direkten Vorgängers erfüllt, wird unter der Prämisse, dass wenn a Vorgänger von b ist und kein Prozesselement x existiert, das Vorgänger von b und Nachfolger von a ist (also zwischen a und b liegt) mit folgender Regel entschieden:

$$\frac{Pd(a,b) \wedge \neg \exists x \mid (Pd(x,b) \wedge Sc(x,a))}{dPd(a,b)} R_{dPd} \quad (28)$$

Die Ableitung der direkten Nachfolgerbeziehungen dSc kann daraus über die Regel

$$\frac{dPd(a,b)}{dSc(b,a)} R_{inv3} \quad (29)$$

erzeugt werden.

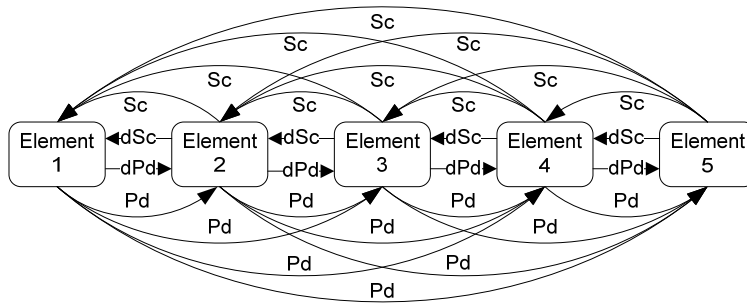


Abbildung 74: Prozess mit direkten Vorgänger/Nachfolger-Beziehungen

Bei der Instanziierung eines PPM werden jeweils folgende Beziehungen zwischen der OAE und dem PPM hinzugefügt:

$$\begin{aligned}
 & \text{ist_Teil_von}(o_{i,x}, o_i) \quad \forall x = 1 \dots m \\
 & \text{ist_Teil_von}(a_{i,y}, a_i) \quad \forall y = 1 \dots n \\
 & \text{ist_Teil_von}(e_{i,y}, a_i) \quad \forall y = 1 \dots n - 1
 \end{aligned} \tag{30}$$

Die prozessuale Einordnung des PPM in das Gesamtmodell erfolgt wiederum deduktiv mit den Regeln

$$\frac{\text{ist_Teil_von}(a_{i,1}, a_i) \wedge \text{Pd}(e_{i-1}, a_i)}{\text{Pd}(e_{i-1}, a_{i,1})} R_{PPM1} \tag{31}$$

$$\frac{\text{ist_Teil_von}(a_{i,m}, a_i) \wedge \text{Sc}(e_i, a_i)}{\text{Sc}(e_i, a_{i,m})} R_{PPM2} \tag{32}$$

5.3.5. Deduktionskalkül zur Inferenz vergleichbarer Sensor- und Prognosedaten

Auf Basis der transitiven Hülle des Prozessmodells kann durch Nutzung weiterer logischer Abhängigkeiten die Vergleichbarkeit von Sensor- und Prognosedaten deduktiv ermittelt werden. Der nachfolgend gegebene Deduktionskalkül ist nur eines von vielen möglichen Beispielen für den Einsatz der Beschreibungslogik zur Ableitung produkt- und prozessmodellbasierten Wissens.

1. Zuordnung aller Prozessaktivitäten und –ereignisse P zu ihrer Bauphase C

$$\frac{\text{hat_Start}(C, P_1) \wedge \text{hat_Ende}(C, P_2) \wedge \text{Pd}(P_1, P_x) \wedge \text{Sc}(P_2, P_x)}{\text{gehört_zu}(P_x, C)} R_{P2C} \quad (33)$$

2. Zuordnung des Sensordatums D zum Sensor S

$$\frac{\text{produziert_von}(D, A) \wedge \text{behandelt}(A, S)}{\text{gehört_zu}(D, S)} R_{SD2S} \quad (34)$$

3. Zuordnung der Physikalischen Größe B zum Sensordatum D

$$\frac{\text{produziert_durch}(D, A) \wedge \text{behandelt}(A, S) \wedge \text{misstPhysikalischeGröße}(S, B)}{\text{repräsentiert}(D, B)} R_{SD2B} \quad (35)$$

4. Zuordnung des Sensordatums D zum Messort P
(Hier kommt auch die Berücksichtigung veränderlicher Objektzustände zum Einsatz. Es wird logisch geprüft, an welchem Ort sich der Sensor zum Zeitpunkt der Messaktion befindet und demzufolge das Sensordatum dem Messort zugeordnet.)

$$\frac{\begin{aligned} &\text{Aktivität}(A) \wedge \text{Aktivität}(A_x) \wedge \text{Objekt}(O) \wedge \text{Sensordaten}(D) \\ &\wedge \text{behandelt}(A, O) \wedge \text{setze_Ort}(A, P) \wedge \text{produziert_durch}(D, A_x) \wedge \text{Pd}(A, A_x) \wedge \\ &(\forall y)(\neg \exists x) | (Pd(x, A_x) \wedge Sc(x, A) \wedge \text{setzeOrt}(x, y)) \end{aligned}}{\text{gehört_zu}(D, P)} R_{SD2P} \quad (36)$$

5. Zuordnung des Sensordatums D zur Bauphase C

$$\frac{\text{produziert_durch}(D, A) \wedge \text{gehört_zu}(A, C)}{\text{gehört_zu}(D, C)} R_{SD2C} \quad (37)$$

6. Zuordnung des Prognosedatums D zur Bauphase C

$$\frac{ist_Basis_für(M,D) \wedge gehört_zu(M,C)}{gehört_zu(D,C)} R_{PD2C} \quad (38)$$

7. Entscheidung über die Vergleichbarkeit von Sensordaten D_2 und Prognosedaten D_1

$$\frac{Prognosedaten(D_1) \wedge Sensordaten(D_2) \wedge Ort(P) \wedge Bauphase(C) \wedge \\ PhysikGröße(G) \wedge gehört_zu(D_1,P) \wedge gehört_zu(D_1,C) \wedge gehört_zu(D_2,P) \wedge \\ gehört_zu(D_2,C) \wedge repräsentiert(D_1,G) \wedge repräsentiert(D_2,G)}{vergleichbar(D_1,D_2)} R_{PD2SD} \quad (39)$$

Zur Verifikation des Modellierungsansatzes und des Deduktionskalküls sei die Produkt-Prozess-Modell-Instanz in Abbildung 75 gegeben.

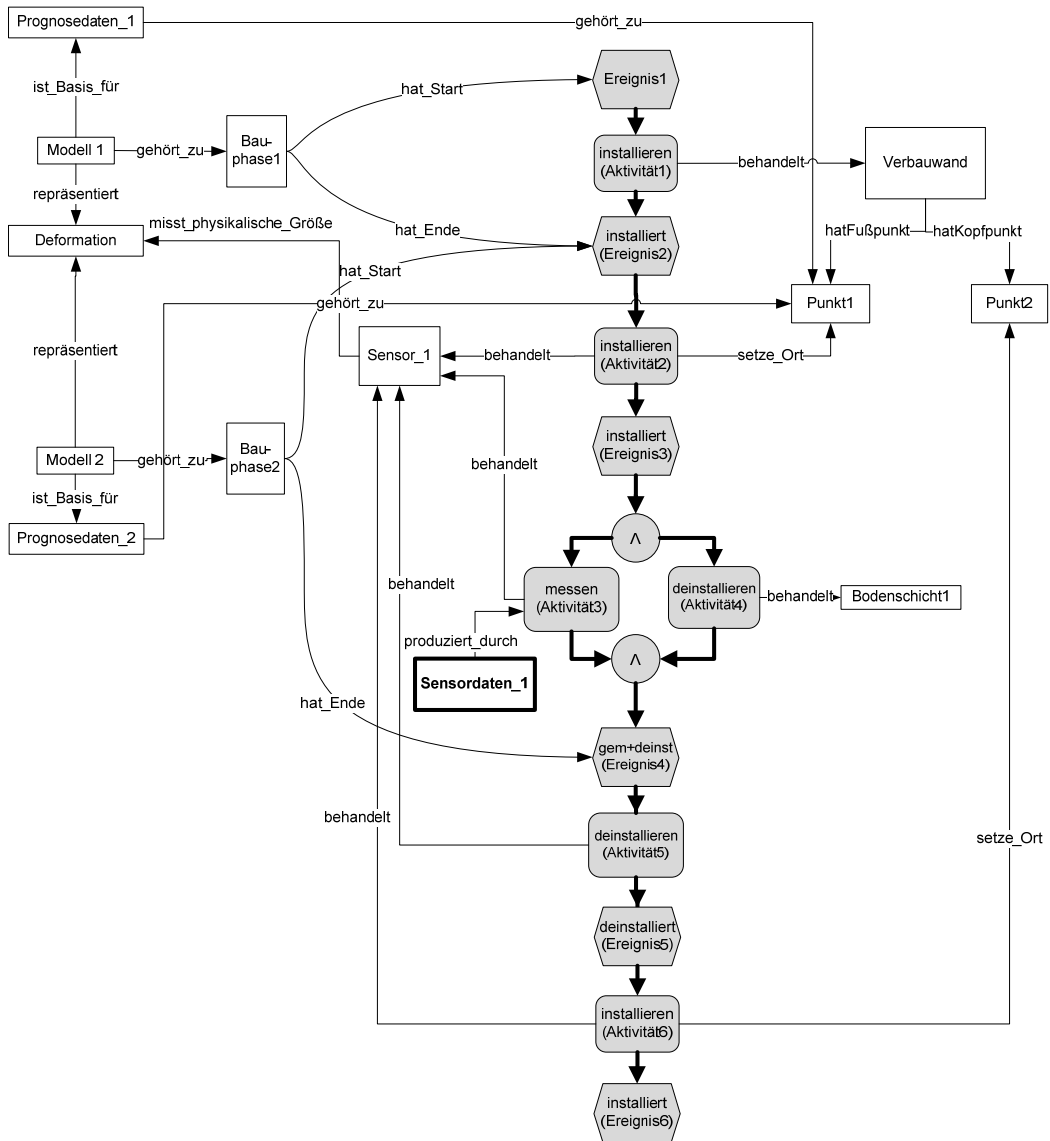


Abbildung 75: Produkt-Prozess-Modell zur Herstellung und Überwachung einer Baugrube

Eine mögliche Fragestellung an dieses Modell wäre, mit welchen Prognosewerten die Sensordaten vergleichbar sind, also z.B. welche physikalische GröÙe durch ‚Sensordaten_1‘ repräsentiert wird und zu welcher Bauphase und zu welchem Ort des Bauwerks dieses Sensordatum gehört.

Die Frage nach der Vergleichbarkeit von Sensor- und Prognosedaten wird schließlich durch Anwendung des Deduktionskalküls beantwortet, das aus den implizit bereits gegebenen Relationen weitere Relationen ableitet.

Durch die gegebenen Informationen, dass Sensordaten_1 von Aktivität_3 produziert wurde, Aktivität_3 den Sensor_1 „behandelt“ und Sensor_1 eine Deformation misst, wird das Axiom „Sensordaten_1 ist eine Deformation“ abgeleitet. Desweiteren kann die Zuordnung zur Bauphase über die Schlussfolgerung der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen und anschließend durch Zuordnung der Bauphase in ähnlicher Weise erfolgen. Die Schlussfolgerung erfolgt durch Schlussregeln, die als Teil der Logik implementiert werden.

Durch logische Schlussfolgerung kann jetzt wiederum, weil die Zustandsänderung des Objektes „Sensor_1“ erfasst wurde, das Sensordatum, das zu dem Zeitpunkt erzeugt wurde, an dem der „Sensor_1“ auf „Punkt1“ war, einem Prognosewert an „Punkt1“ zugeordnet werden sowie entsprechend später „Punkt2“.

5.3.6. Logikbasierte Modellkomposition

Während des Bauvorhabens wird kontinuierlich gemessen und das Prognosemodell ist automatisch unter Berücksichtigung der definierten Anwendungs- und Parametergrenzen so anzupassen, dass eine möglichst gute Übereinstimmung von Prognose und Messung erreicht wird. Damit ist es möglich z.B. nach der 2. Aushubphase mit einem verbesserten Modell wesentlich bessere Vorhersagen für das Verhalten während des restlichen Bauprozesses zu treffen. Bereits die Messungen der ersten (i.d.R. unkritischen) Bauphasen können zur Validierung des Modells und ggf. zur Anpassung des Prognosemodells genutzt werden. Die Systemidentifikation, also die Identifikation eines gültigen Prognosemodells, das beobachtete Messwerte bestmöglich erklärt, ist im einfachsten Fall durch die Variation der Modellparameter realisierbar. Treten jedoch an Boden oder Bauwerk Effekte auf, die sich durch den aktuellen Modellansatz, insbesondere durch das gewählte Stoffgesetz, nicht mehr erklären lassen, soll eine Simulation mit einem oder mehreren anderen Stoffgesetzen durchgeführt werden.

Üblicherweise sind die Stoffgesetze in der Finite-Elemente-Software direkt implementiert oder werden numerisch in sogenannten Materialschnittstellen formuliert, die dann als Subroutinen der FEM-Programme aufgerufen werden. Dies ist auch heute praktisch schon möglich, muss jedoch manuell durchgeführt werden. Der besondere Anspruch dieser Arbeit besteht darin, dezentral im Web gespeicherte Stoffgesetzimplementierungen anderer Autoren zu suchen, zu integrieren und zu nutzen. Eine Initiative der führenden Geotechniker Europas hat bereits erste Schritte unternommen, Stoffgesetzsubroutinen im Internet zur Verfügung zu stellen und auf einer Webseite zu verlinken (<http://www.soilmodels.info/>). Die Verfügbarkeit der Stoffgesetzroutinen alleine ist jedoch im Rahmen des Verfahrens noch nicht ausreichend. Wie (Gudehus G. , 2001) anführt, möchte der Anwender wissen, „welches Stoffgesetz wann geeignet ist, wie die Stoffgesetzkenngößen praktisch und zuverlässig zu bestimmen sind, welche Anfangs- und Randwertbedingungen damit verträglich sind und welche numerische Diskretisierung und Iteration dem Problem angemessen ist.“ Diese Aussage ist mit Sicht auf den Einsatz der Stoffgesetze in der Planungsphase (Vorhersage) getroffen. Umgekehrt stellt

sich für den Einsatz bei der Systemidentifikation die Frage, welche Stoffgesetze die durch die Messungen beobachteten Effekte repräsentieren können und welche Qualität dabei zu erwarten ist. Für beide Anwendungen fehlen praktikable Möglichkeiten, um gezielt nach Stoffgesetzen zu suchen, sie zu finden und sie anwenderfreundlich zu integrieren. Bei der Realisierung des adaptiven Bauverfahrens ist dies umso wichtiger. Es ist nicht nur zielführend, sondern notwendig, Wissen über die verfügbaren Stoffgesetzeroutinen zu formalisieren und damit eine semantische Suche und eine relativ zügige – vor allem aber korrekte – Integration der Stoffgesetze zu realisieren.

Die Nutzung der Vielfalt existierender Stoffgesetzimplementierungen ist jedoch bisher nicht ohne Weiteres automatisch möglich, da (a) die Stoffgesetzimplementierungen nicht gesammelt zur Verfügung stehen, (b) bisher ausreichende Möglichkeiten fehlen, Stoffgesetze formal zu beschreiben und sie so auffindbar zu machen und in brauchbarer Form für andere Anwender zur Verfügung zu stellen, und (c) ihre Integration in FEM-Software bei erstmaliger Nutzung einen gewissen Aufwand bedeutet, da häufig sowohl unterschiedliche Termini als auch Definitionen für Stoffgesetzparameter verwendet werden, die den Einsatz von Stoffgesetzen anderer Autoren insofern erschweren, dass die Bedeutung der Stoffgesetzparameter vor der Einbindung in das FEM-Programm erst analysiert werden muss und evtl. auch entsprechende Transformationen der Parameter aus den Laboruntersuchungen durchgeführt werden müssen, um die passenden Eingabeparameter für das Stoffgesetz zur Verfügung zu stellen.

Die fehlende Unterstützung der Beschreibung, Veröffentlichung, Suche, Auswahl, Integration und Anwendung von Modellen macht es insbesondere den praktisch tätigen Ingenieuren schwer, komplexe Stoffgesetze, die in bestimmten Anwendungsfällen extreme Vorteile hinsichtlich ihrer Realitätsnähe bieten, in einem für sie wirtschaftlich vertretbaren Rahmen zu nutzen.

Es sind daher Methoden notwendig, die Stoffgesetze allgemein verfügbar, formal beschreibbar und leichter in die Berechnungen integrierbar machen.

Als Beispiel sei folgende Stoffgesetzs subroutine (Roddemann, 1999) aufgeführt:

```

c-----
      subroutine umat(stress,statev,ddsdde,sse,spd,scd,
&   rpl,ddsddt,drplde,drpldt,
&   stran,dstran,time,dtime,temp,dtemp,predef,dpred,cmname,
&   ndi,nshr,ntens,nstatv,props,nprops,coords,drot,pnewdt,
&   celent,dfgrd0,dfgrd1,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
c
c Abaqus routine for hypoplastic stress calculation.
c
c Programmed by: Dennis Roddeman
c               Institut fuer Geotechnik und Tunnelbau
c               Universitaet Innsbruck
c
c Essential input:
c   stress  - stresses at old time
c   dstran  - increment of strains
c   statev  - old porosity
c Essential output:
c   stress  - stresses at new time
c   statev  - new porosity
c             new size of time substeps (for postprocessing only)
c             mobilised friction angle
c
c-----
c      von Wolffersdorff, Karlsruher sand, Dimensions: [m], [n]
      phic = 30.0d0 * ( 2.d0 * PI / 360.d0 )
      hs   = 5.8d9
      ec0  = 0.84d0
      ed0  = 0.53d0
      ei0  = 1.00d0
      n    = 0.28d0
      alfa = 0.13d0
      beta = 1.05d0
      cohesion = 1.d3
      if ( nprops.gt.0 ) then
         phic = props(1)
         hs   = props(2)
         ec0  = props(3)
         ed0  = props(4)
         ei0  = props(5)
         n    = props(6)
         alfa = props(7)
         beta = props(8)
         cohesion = props(9)
      end if
c

```

Abbildung 76: Ausschnitt aus einer in Fortran programmierten Stoffgesetzs subroutine (Roddemann, 1999)

Hinsichtlich der Nutzung dieser Subroutine ergeben sich für den Anwender folgende Fragestellungen:

- (1) Für welche Böden / Situationen ist das implementierte Stoffgesetz einsetzbar?
- (2) Was bedeuten die Variablen?
- (3) Welche Abhängigkeiten bestehen zwischen den hier verwendeten Parametern und anderen (gängigen) geotechnischen Parametern?

Um diese Fragen für den Anwender zu beantworten, bzw. um Stoffgesetze gezielt nach Kriterien zu suchen, ist es notwendig, die Stoffgesetze hinsichtlich ihrer Eigenschaften, Anwendungsbereiche und Anwendungsgrenzen zu klassifizieren, formal zu beschreiben und ein Modellmanagement aufzubauen, das (1) die Stoffgesetzsbroutinen und deren logische Beschreibung verwaltet und das (2) gezielt nach logischen Kriterien abgefragt werden.

Die logikbasierte Wissensrepräsentation wird als Beschreibungslogik realisiert. In dieser Beschreibungslogik können für jedes Stoffgesetz die Anwendungsbereiche durch den Stoffgesetzautor beschrieben werden. Diese Beschreibung betrifft sowohl die Zuordnung von Stoffgesetzen zu bestimmten Bodenarten (z.B. Eignung für feinkörnige oder grobkörnige Böden, etc.), als auch die formale Beschreibung der physikalischen Effekte (Drainiertes/Undrainiertes Materialverhalten, Zyklische Belastungen, Druck- und Dichteabhängigkeit von Steifemoduln und Reibungswinkel, etc.), die das Stoffgesetz berücksichtigen kann. Desweiteren müssen die Stoffgesetzparameter, inklusive ihrer sinnvollen Wertebereiche für bestimmte Böden, beschrieben und einer allgemeinen Parameterontologie zugeordnet werden. Die freie Wahl der Variablen für Stoffgesetzparameter bei der Programmierung von Stoffgesetzsbroutinen hat zur Folge, dass die Bedeutung der Stoffgesetzparameter alleine aus deren Bezeichnung nicht erkennbar ist. Mit der Vielzahl an Stoffgesetzen entstehen so Synonyme, die die Verarbeitung von Stoffgesetzen unnötig erschweren. Die Zuordnung zu einer allgemeinen Parameterontologie ermöglicht hier ein gemeinsames Verständnis für gleiche Parameter mit synonymen Bezeichnungen. Die Repräsentation des Wissens über die Stoffgesetze und deren Parameter durch eine Beschreibungslogik ermöglicht die deduktive Ermittlung von Stoffgesetzen, die in der vorliegenden Situation, also die vor Ort vorliegenden Böden und die durch Beobachtung festgestellten physikalischen Effekte an Boden und Bauwerk, nutzbar sind. Dieses projektspezifische Wissen ist in der Projektwissensbank mit dem beschreibungslogikbasierten Produkt-Prozess-Modell verbunden. Durch Deduktion wird das Wissen aus der „globalen“ Wissensbasis mit diesem projektspezifischen Wissen derart verknüpft, dass die für das spezifische Problem theoretisch anwendbaren Stoffgesetze und die für diese Stoffgesetze anwendbaren Gleichungslöser und Integrationsmethoden den Böden des zu untersuchenden Bauvorhabens zugeordnet werden. Die logikbasierte Wissensrepräsentation mit Deduktion gewährleistet – korrekte Umsetzung der Beschreibung vorausgesetzt – eine notwendig korrekte Schlussfolgerung der anwendbaren Stoffgesetze. Stoffgesetze, die für das Problem aus logischen Gründen nicht anwendbar sind, werden damit für die Systemidentifikation von vornherein ausgeschlossen.

Das in Abbildung 77 dargestellte Konzept stellt die Basiskonstrukte zur Beschreibung von Stoffgesetzen zur Verfügung.

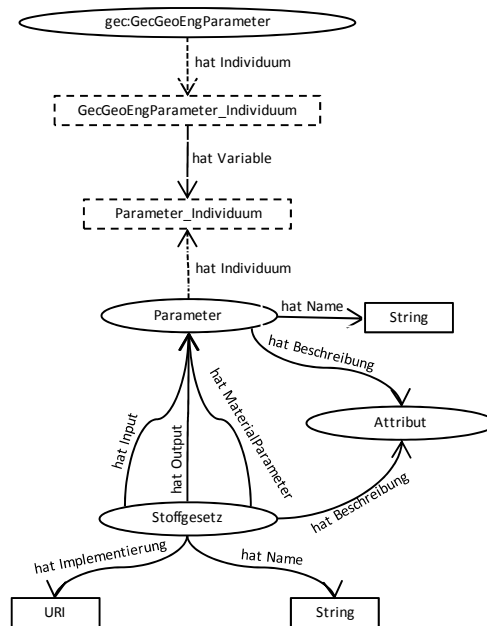


Abbildung 77: Konzept zur Beschreibung von Stoffgesetzen

Ein Stoffgesetz ist dabei eine Instanz der Klasse „Stoffgesetz“ mit einem Namen sowie mit einer URI, die den Ort zum Download der Stoffgesetzsubroutine angibt. Desweiteren werden dem Stoffgesetz seine Input-, Output- und Materialparameter zugeordnet. Die Stoffgesetzparameter werden einer allgemeingültigen Parameterontologie zugeordnet, wobei jeder Parameter ein Individuum der Klasse Parameter ist, und dieses Individuum einem Individuum der Klasse GecGeoEngParameter über die Beziehung „hat Variable“ zugeordnet wird. Sowohl das Stoffgesetz als auch dessen Parameter werden durch Attribute (Anwendungsfälle, Anwendungsgrenzen) beschrieben. Das Nutzungsszenario sieht vor, dass der Stoffgesetzersteller seine Stoffgesetzsubroutine auf einem beliebigen Server zum Download zur Verfügung stellt und mithilfe des in Abbildung 77 dargestellten Ontologiekonzeptes formal in der Wissensbank beschreibt (vgl. Abbildung 78).

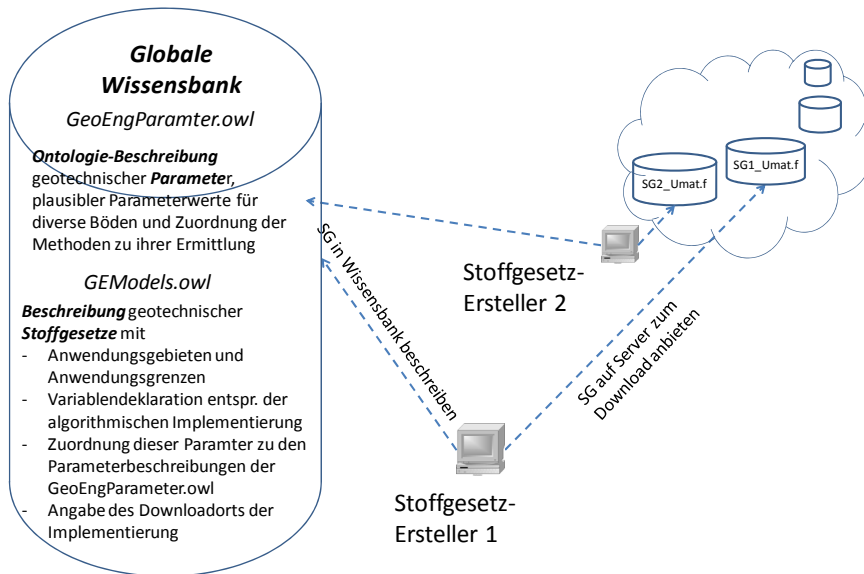


Abbildung 78: Konzept zur Verfügbarmachung von Stoffgesetzen

Für die in Abbildung 76 dargestellte Fortran-Subroutine eines hypoplastischen Stoffgesetzes ergibt sich auf Basis des Konzeptes in Abbildung 77 eine Ontologiebeschreibung, die in Abbildung 79 grafisch dargestellt ist.



Das Ontologiekonzept ist in den Ontologien GeoEngParameter.owl und GEModels.owl (vgl. 5.3.7) enthalten. GeoEngParameter.owl ermöglicht dabei die Ontologiebeschreibung einer gemeinsamen Definition der Bodenkenngrößen, denen sowohl plausible Parameterwerte für bestimmte Böden als auch Methoden zu ihrer Ermittlung zugeordnet werden können. GEModels.owl ermöglicht die Beschreibung von Stoffgesetzen mit ihren Anwendungsgebieten und Anwendungsgrenzen, d.h. mit Zuordnung der physikalischen Effekte, die sie repräsentieren können, sowie der qualitativen Annahmen, die bei der Aufstellung des Stoffgesetzes getroffen wurden. Desweiteren sind die in der Stoffgesetzs subroutine verwendeten Variablen beschreibbar und können einer mit GeoEngParameter.owl definierten Bodenkenngröße zugeordnet werden. Abbildung 80 zeigt die exemplarische Beschreibung einer Stoffgesetzs subroutine des hypoplastischen Stoffgesetzes sowie deren Einbindung in den Systemidentifikationsprozess.

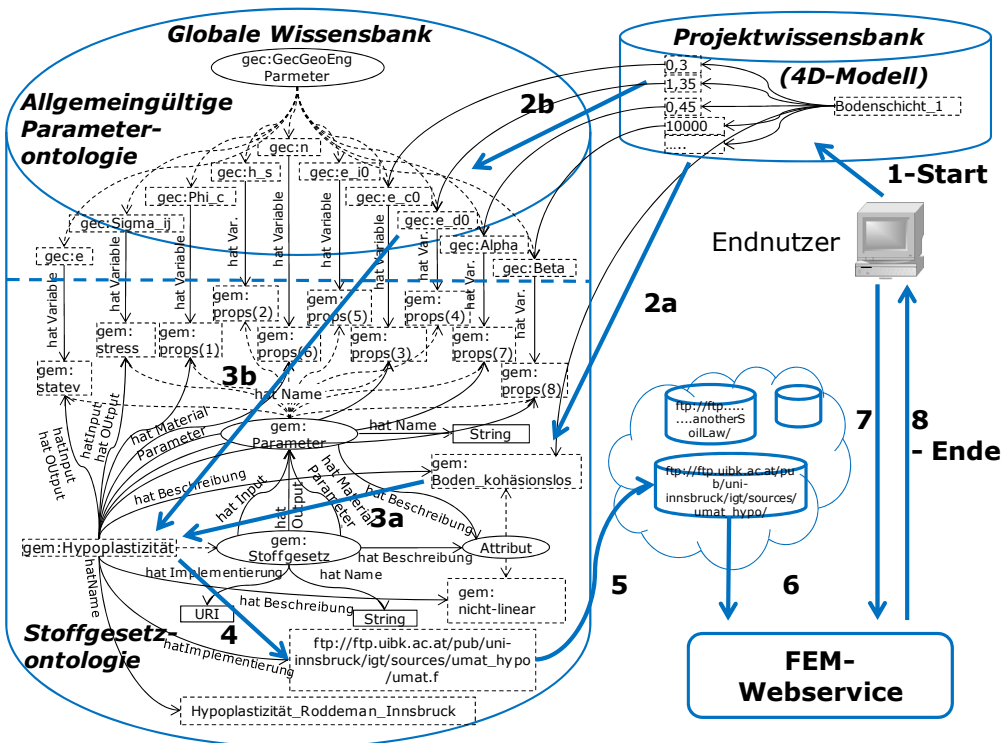


Abbildung 80: Beispiel Beschreibung und Einbindung von Stoffgesetzen

Der Prozessablauf von Suche, Einbindung und Aufruf ist wie folgt:

- (1) Start der Suche nach möglichen Stoffgesetzen
- (2) Aus den Informationen aus der Projektwissensbank wird geschlussfolgert, welche physikalischen Effekte vorliegen (2a) und welche Stoffgesetzparameter in der globalen Wissensbank direkt vorhanden (2b) oder aus dem gegebenen Informationsgehalt ermittelbar sind
- (3) Für die nach (2a) ermittelten physikalischen Effekte und die nach (2b) ermittelten Stoffgesetzparameter werden in der globalen Wissensbank anwendbare Stoffgesetze gesucht
- (4) Aus der Menge der gefundenen Stoffgesetzkandidaten wird durch den Ingenieur eine Auswahl von einem oder mehreren Stoffgesetzen getroffen. Die Server-URI der Stoffgesetzs subroutine wird ausgelesen
- (5) Die nach (4) ermittelte Adresse wird aufgerufen
- (6) Die entsprechende Stoffgesetzs subroutine wird in den Rechenwebservice (z. B. FEM-Webservice) integriert
- (7) Der Simulationsprozess wird durch einen SOAP-Aufruf mit den entsprechenden Input-Parametern aus der Projektwissensbank gestartet
- (8) Die Simulationsergebnisse werden zurückgegeben und anhand einer Modellmetrik bewertet.

5.3.7. Prototyp der OWL-DL-Wissensbasis

Die Relation der Messdaten mit den jeweiligen Bauwerkselementen wird durch objektorientierte Modellierung des Messsystems als Teil des ebenfalls objektorientierten Bauwerksmodells hergestellt. Die Grundlage für diese Modelle ist das in Abschnitt 5.3.4 eingeführte Metamodell. Dieses Metamodell wurde in der Ontologiesprache OWL-DL implementiert. Zu Evaluierungszwecken wurde über die Klassen des Metamodells hinaus noch domänenspezifische Klassen zur Modellierung von Grundbauwerken, Böden und Sensoren eingeführt. Durch die Modellierung der Sensoren als Objekte mit ihren jeweiligen Messgrößen, ihrer Position, Richtungsinformation usw. als Attribute und durch Verknüpfung mit dem Bauwerks-Objektmodell besteht eine eindeutige Zuordnung der Messdaten zum Bauwerk. Aus Standardisierungsarbeiten in der Produktmodellierung unter Federführung der International Alliance for Interoperability (IAI) sind die Industry Foundation Classes (IFC) als Referenzdatenmodell zur Modellierung von Bauwerken des Hochbaus hervorgegangen. Dieses bekannte, mittlerweile von den Markführern unter den Softwareherstellern genutzte, Referenzdatenmodell wurde von (Beetz, 2009), (Beetz, van Leeuwen, & de Vries, 2009) aus dem EXPRESS Schema in eine OWL-DL Ontologie transformiert. Die IFC enthalten bereits eine Vielzahl von Konzepten zur Beschreibung von Bauwerken mit unterschiedlichen Aspekten: Lokation, Geometrie, teilweise das mechanische Verhalten. D. h. die IFC bilden eine gute Basis für die Entwicklung ähnlicher domänenspezifischer Modelle. Insbesondere die OWL-DL-Implementierung bietet die Möglichkeit zur Nutzung der Konzepte zur Implementierung der hier anvisierten Modelle. Bei der Implementierung des Metamodells wurden daher auch teilweise Konzepte aus den IFC genutzt. Insbesondere die IFC-Klassen zur Definition von Lokation und Geometrie können zur Modellierung von Grundbauwerken und Sensorsystemen.

Das Gesamtmodell wurde in vier Teilontologien strukturiert und in OWL-DL implementiert:

- (1) Modellkern zur Produkt- und Prozessmodellierung (ppmCore.owl)
- (2) Grundbauklassen (GeoEngClasses.owl)
- (3) Geotechnische Modelle (GEModels.owl)
- (4) Monitoring Klassen (MonClasses.owl)

Ausgewählte Elemente dieser Ontologien sind in Abbildung 81 grafisch dargestellt. Hierbei ist insbesondere die Referenzierung der Ontologien untereinander wesentlich für die Modellierung des gesamten Ingenieursystems. Die Implementierung wurde in englischer Sprache durchgeführt. Die Abbildungen sind daher nachfolgend in Englisch.

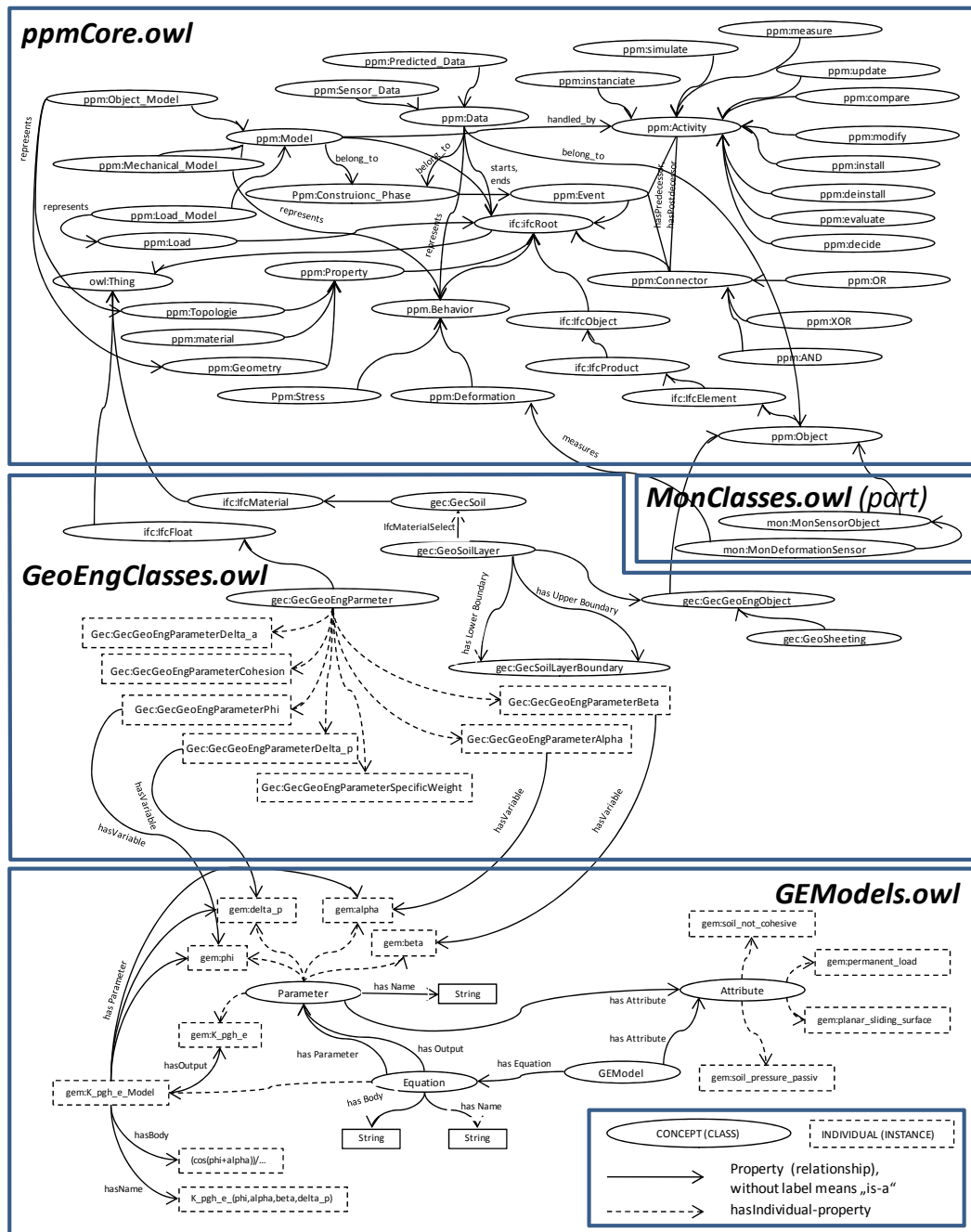


Abbildung 81: Implementierung des Metamodells in OWL-DL

Der **Produkt- und Prozessmodellierungskern (ppmCore.owl)** ist die Kernontologie, die sowohl die kombinierte Modellierung des Ingenieurprodukts und der Ausführungsprozesse als auch die Integration der verschiedenen Ingenieurdomänen (Bauwerk, mechanische Modellierung und Monitoring) ermöglicht. ppmCore.owl referenziert die Ifc-Datenstruktur in der IfcOWL-Implementierung. Das Konzept „Objekt“ des hier eingeführten Metamodells ist dabei äquivalent zum Konzept „IfcElement“ aus den IFC. Dieser Ansatz ermöglicht sowohl die Nutzung der Vererbung geometrischer und topologischer Beschreibungskonzepte aus den IfcOWL auf die zu modellierenden Grundbau- und Sensorobjekte als auch die Zuordnung von Prozesselementen zu diesen Objekten.

Die Ontologie **Grundbauklassen (GeoEngClasses.owl)** enthält Klassen zur Modellierung geotechnischer Strukturen, z.B. Bodenschichten und Grundbauelemente wie Verbaulemente, Stützwände sowie Bodenparameter (physikalische Größen), die zu verschiedenen Stoffgesetzen für Böden gehören. Auch für die Definition dieser Konzepte wurden Referenzen zu IfcOWL erstellt (siehe Abbildung 81).

Die Ontologie **Geotechnische Modelle (GEModels.owl)** beschreibt mechanische Modelle, oder deren Komponenten, zur Berechnung des Bodenverhaltens. Die geotechnischen Modelle werden entsprechend ihrer Outputs, Parameter und Anwendungsgrenzen klassifiziert und durch ihren Namen, die Outputs, Parameter und klassifizierende Attribute beschrieben. Die Berechnungsvorschriften der geotechnischen Modelle können dabei, im Fall analytisch lösbarer Modelle in der Ontologie als String vorgehalten und zur Auswertung an einen Formelparser übergeben werden. Bei Nutzung komplexerer Stoffgesetze, die in Finite-Elemente-Modellen implementiert sind, ist die Berechnungsvorschrift in einer Stoffgesetzsbroutine implementiert, die auf einem Server vorgehalten wird und durch einen Finite-Elemente-Webservice ausgewertet werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurden beide Möglichkeiten konzeptuell vorgesehen, zur Evaluierung implementiert wurde die Einbindung einfacher Modelle. Das Anwendungsszenario umfasst die Suche eines Modells durch eine SPARQL-Abfrage der Ontologien anhand der Klassifikationsattribute, die Zuweisung der Berechnungsvorschrift zu einem Simulationswebservice und die Zuweisung der Parameterwerte aus einer Instanz der Grundbauklassen-Ontologie.

Die Ontologie **„Monitoringklassen“ (MonClasses.owl)** besteht aus Konzepten zur Bauwerksüberwachung, z.B. Sensoren, die Subklassen der Klasse Objekt aus ppmCore.owl sind. Die Ontologie ist die Grundlage für die formale Spezifikation von Messsystemen. Ihre Verknüpfung mit ppmCore, die wiederum direkt mit GeoEngClasses verbunden ist, ermöglicht die Definition direkter Relationen von Sensoren und Sensorsystemen mit dem Modell des Grundbauwerks und die Integration mit dem Bauprozess. Damit ist es letztendlich möglich, Sensordaten und zugehörige Prognosedaten sowie Grenzwerte für ein bestimmtes Objekt unter Berücksichtigung der zu analysierenden Bauphase abzufragen und an Webservices zur Datenauswertung zu übergeben.

Die Anwendung wird erneut anhand des Beispiels in Abbildung 75 demonstriert. Das Beispiel wird unter Nutzung der in Abbildung 81 skizzierten Ontologien instanziiert. Eine automatisch erzeugte Visualisierung des instanziierten Modells ist in Abbildung 82 gegeben.

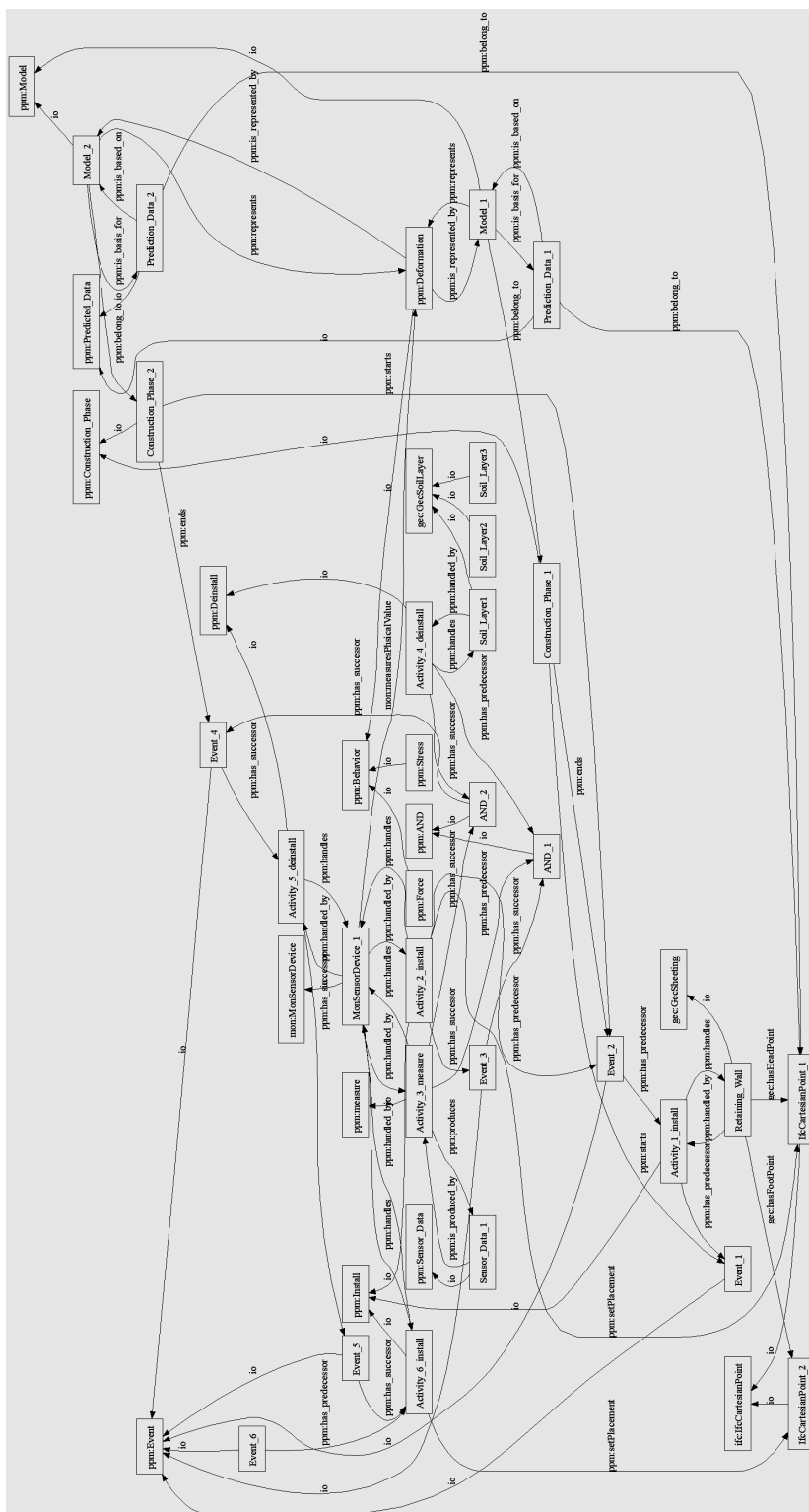


Abbildung 82: Instanz des Baugrubenbeispiels – vor Wissensexplikation

Die Inferenz mit dem zuvor beschriebenen Deduktionskalkül resultiert in folgendem Graphen (Abbildung 83), dem im Vergleich zu dem in Abbildung 82 dargestellten 164 direkte Beziehungen hinzugefügt wurden. Die Grafik dient lediglich der Darstellung der erreichten Komplexität.

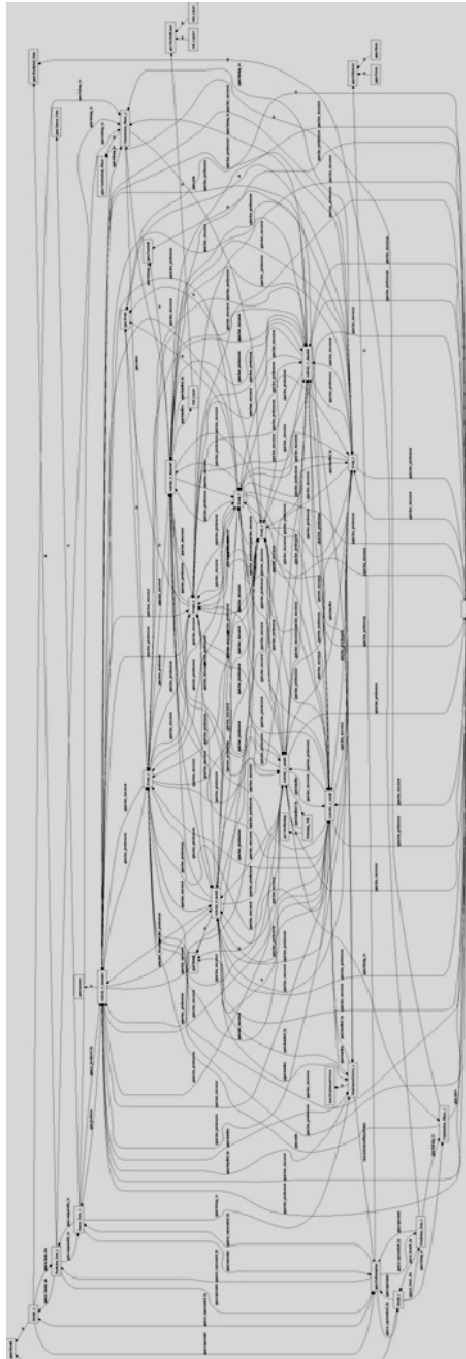


Abbildung 83: Graph des Beispiels nach der Wissensexplikation

Wesentlich in Abbildung 83 ist der kleine Ausschnitt in Abbildung 84. Die Anwendung des Deduktionskalküls ermöglicht es, die vielen transitiven Zusammenhänge, also die impliziten Beziehungen zu explizieren, und damit direkte Zusammenhänge zwischen Objekten zu ermitteln.

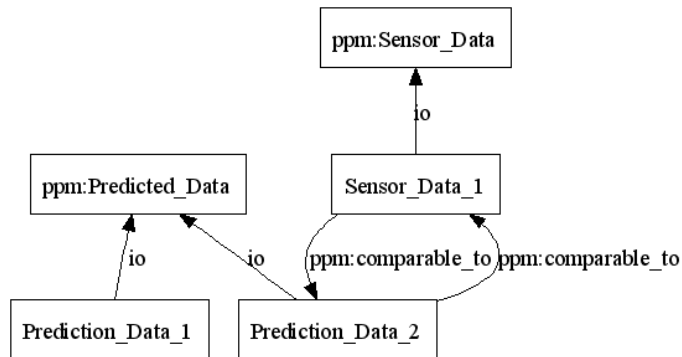


Abbildung 84: Vergleichbare Vorhersage- und Prognosedaten

Die Explikation des Graphen ermöglicht es nun, vergleichbare Daten sehr direkt mit einer kurzen SPARQL-Abfrage der Form

```
SELECT ?subject ?object
```

```
WHERE {?subject ppm:comparable_to ?object}
```

zu ermitteln.

5.4. SOA-System

Wie bereits eingangs erwähnt, soll das Informationssystem flexibel konfigurierbar sein. Dies betrifft sowohl die Einbindung beliebiger Analysesoftware als auch die Konfiguration der Prozesslogik des Überwachungsprozesses. Das Gesamtsystem ist daher hinsichtlich der verwendeten Berechnungssoftware sowie der geotechnischen Ingenieurmodelle modular, d.h. komponentenbasiert als Webservice-SOA, aufgebaut. Der Einsatz der SOA ist eine innovative technologische Lösung, ein verteiltes, komponentenbasiertes Softwaresystem zu realisieren. Die generische Gestaltung der logischen und algorithmischen Komponenten ermöglicht ihre Wiederverwendbarkeit zur Lösung verschiedener (ähnlicher) Problemstellungen durch effiziente Kombination sowie durch Erweiterung um zusätzliche Komponenten. Der komponentenbasierte Ansatz ermöglicht durch Orchestrierung die Realisierung eines kohärenten Laufzeitsystems, sowie gleichzeitig die Festlegung von Ein- und Ausgangsmodellen und -daten.

Die parallele, zeitnahe Berechnung mehrerer komplexer nichtlinearer mechanischer Modelle für die Anpassung von Modellparametern sowie für die Ermittlung aktuell bester Modellkandidaten wird durch die Dekomposition bestehender Simulationsmodelle und -verfahren in Softwarekomponenten, ihre Implementierung als Rechen-Webservices und deren flexible Komposition und logische Steuerung durch prozessmodellbasierte Informationslogistik-Services ermöglicht. Die Rechen-Services können auf mehreren Servern installiert werden, und ermöglichen so die Parallelisierung der Berechnung der Modellkandidaten. Die Zuführung der Modellkandidaten mit ihren Parametern zu den Webservices, sowie die spätere Zusammenführung der Modellergebnisse zum Modellvergleich anhand der Modellmetrik werden durch Orchestrierung der Services erreicht. Hierbei werden neben den Rechen-Services die Services zur Abfrage der entsprechenden Parameter aus der Wissensbank eingebunden. Dieser komponentenbasierte, prozessgesteuerte Ansatz ist die Voraussetzung für die Parallelisierbarkeit von Berechnungen und damit für effiziente die Nutzung verteilter Rechenressourcen, wie z. B. Cloud- oder Grid-Computing zur simulationsbasierten Systemidentifikation. Die damit mögliche parallele und wiederholte Berechnung konkurrierender geotechnischer Modelle ermöglicht einen hohen Grad an automatischer wissensbasierter Interpretation der Monitoring-Daten sowie den automatischen Vergleich der Ergebnisse verschiedener mechanischer Modellansätze.

Der Prototyp realisiert den Monitoringprozess mit Vergleich der Abweichung von Mess- und Prognosewerten mit einem definierten Grenzwert sowie die Systemidentifikation einer definierbaren Anzahl von Parametervarianten, mit geringstmöglicher Abweichung zwischen Mess- und Prognosewerten.

Die Informationsschnittstellen des Monitoringprozesses sind in Abbildung 85 dargestellt.

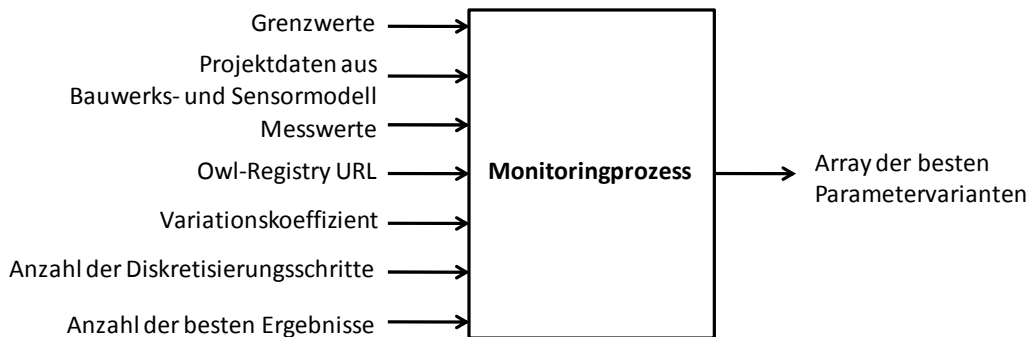


Abbildung 85: Schnittstellen des Monitoringprozesses

Die Inputs sind die geforderten Grenzwerte in Form einer maximalen Soll-Ist-Differenz, das in OWL repräsentierte Bauwerks- und Sensormodell des Überwachungsprojektes mit den enthaltenen Mess- und Prognosewerten, sowie die Festlegung der Diskretisierung, die Festlegung von Ober- und Untergrenze der Wertebereiche zur Parametervariation und die gewünschte Anzahl n der gewünschten n -besten Ergebnisse. Der zu realisierende Output ist schließlich die Prioritätsliste der n besten Parametervarianten mit dem jeweiligen Simulationsergebnis.

Die zur Realisierung dieses Prozesses notwendigen Webservices lassen sich grundsätzlich drei Gruppen zuordnen:

- a) Managementservices dienen der Durchführung der
 - Speicherung,
 - Verwaltung und
 - Abruf von Daten und Modellen
- b) Ingenieurservices bilden die Analysefunktionen im Überwachungsprozess in Softwarekomponenten ab, d.h.
 - den Vergleich von Mess- und Prognosewerten,
 - die Bildung von Parametervarianten,
 - die Durchführung der Modellkomposition,
 - die Simulation des Systemverhaltens,
 - die Priorisierung der Modellkandidaten anhand von Distanzmaßen
- c) Informationslogistikservices bilden die Informationslogistik, d. h. die Kommunikation der Daten zwischen den Management- und Ingenieurservices ab.

5.4.1. Managementservices

Der QueryProcess realisiert die Abfrage von Daten aus der verteilten OWL-DL-Wissensbasis durch Einbindung eines Webservice für SPARQL-Abfragen (Hollmann, 2008). Der SOAP-Aufruf des SPARQL-Webservice erfolgt nach dem Schema in Abbildung 86.

```
<soap:Envelope xmlns:soap="http://www.w3.org/2003/05/soap-
envelope" xmlns:prot="http://prototype.sparql.hollmann.tu">
  <soap:Header/>
  <soap:Body>
    <prot:executeQueryAll>
      <!--Optional:-->
      <prot:queryStr>?</prot:queryStr>
      <!--Optional:-->
      <prot:owlURL>?</prot:owlURL>
    </prot:executeQueryAll>
  </soap:Body>
</soap:Envelope>
```

Abbildung 86: SOAP-Request des verwendeten SPARQL-Webservice

Das Attribut <queryStr> stellt die als String übergebene SPARQL-Abfragelogik dar und das Attribut <owlURL> die URL der abzufragenden OWL-Ressource. Der SPARQL-Service ist mehrfach in den QueryProcess so eingebunden, dass parallel mehrere Informationen gezielt mit einer SPARQL-Abfrage aus verteilten OWL-DL-Modellen ausgelesen werden und wiederum parallel als Input in den Systemidentifikationsprozess übergeben werden können.

5.4.2. Ingenieurservices

Erzeugung von Stoffparameterkandidaten

Die Stoffgesetzparameter des zu nutzenden Stoffgesetzes werden durch Eingabe der Abfragelogik mit dem SPARQL-Webservice aus der Projektwissensbank abgefragt und an den Diskretisierungsservice übergeben.

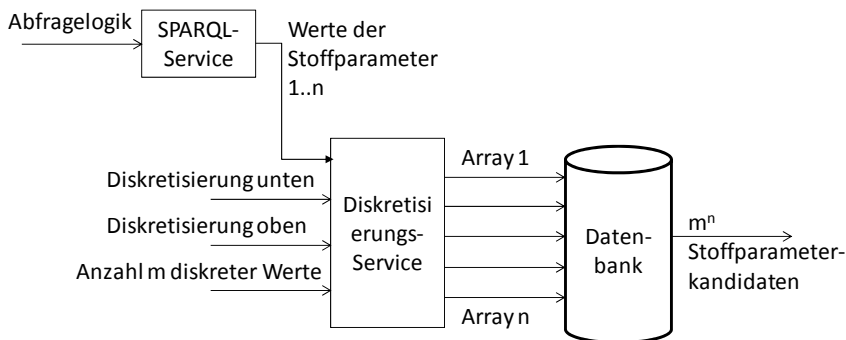


Abbildung 87: Bildung der Parametervarianten

Der Diskretisierungsservice diskretisiert die Stoffparameter in einem vorgegebenen Bereich um den bisherigen angenommenen Wert mit einer vorgegebenen Schrittweite. Es wird für jeden Parameter ein Array der diskretisierten Werte erzeugt. Jedes Array wird in einer eigenen Tabelle mit je nur einer Spalte in einer relationalen Datenbank zwischengespeichert.

Die Kreuzproduktabfrage aller Tabellen (vgl. Kap. 4.2.1) ergibt schließlich eine Tabelle mit den Stoffparameterkandidaten. Die Nutzung einer relationalen Datenbank hat sich als sinnvolle Variante zur Bildung des Kreuzproduktes und zur Zwischenspeicherung der Stoffparameterkandidaten ergeben.

Modellkomposition

Der Modellkompositionsservice führt die zuvor durch den Diskretisierungsservice und die Kreuztabellenabfrage der relationalen Datenbank erzeugten Stoffparameterkandidaten mit den bauwerks- und bauprozessspezifischen Informationen aus dem Produkt-Prozess-Modell zusammen. Die Bauwerks-/Prozessinformationen werden wiederum über eine SPARQL-Abfrage aus der Projektwissensbank abgefragt. Das statische System wird jeweils abhängig von den Bauzuständen gewählt. Die statischen Systeme werden mit den Stoffparameterkandidaten der Bodenschichten kombiniert und als mechanische Modellkandidaten abgespeichert.

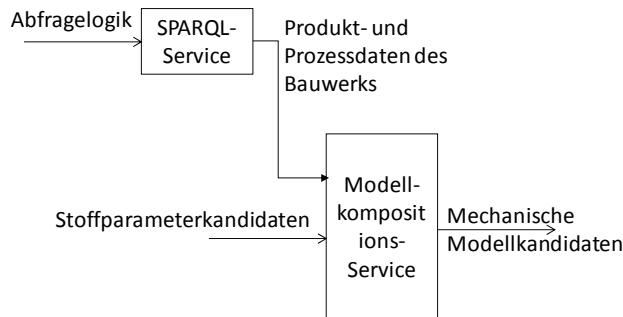


Abbildung 88: Modellkomposition

Die Speicherung der Modellkandidaten muss dabei in dem Format erfolgen, das die Software, die zur Simulation des Systemverhaltens eingesetzt wird, erfordert. Bei Auswertung durch Finite-Elemente-Software kann dies z.B. eine Steuerdatei sein, ggf. aber auch eine relationale Datenbank. Im Rahmen der Validierung dieser Arbeit wurden die Modellkandidaten in einer relationalen Datenbank gespeichert und dort jeweils durch logische Abfragen dem Simulationsservice zugeordnet, der das entsprechende statische Modell implementiert hat.

Simulation des Systemverhaltens

Zur Simulation des Systemverhaltens sind analytische und numerische Verfahren, die in entsprechender Software implementiert sind, einsetzbar.

Ein Vorteil, der hier eingeführten Methodik ist, dass beliebige Software in den Berechnungsprozess eingebaut werden kann. Das wünschenswerte Endziel ist die im vorliegenden Prototypen noch nicht realisierte Integration von FEM-Software. Im Rahmen dieser Arbeit werden zur Simulation des Systemverhaltens analytische Berechnungsmethoden in Webservices umgesetzt, die die Analyse einer einfach verankerten, im Boden fest eingespannten Spundwand ermöglichen. Dabei implementiert der Webservice direkt das statische System. Am Beispiel eines Baugrubenverbau wurde die statische Berechnung für (a) einen Kragarm und (b) einen Träger auf zwei Stützen mit einseitiger Auskragung (T2StmK) als Webservice, jeweils mit vorgeschalteter Erddruckermittlung realisiert. Der Kragarmservice wird dabei im Produkt-Prozess-Modell den Bauzuständen vor Einbau des Ankers zugeordnet. Der T2StmK-Service entspricht den Bauphasen nach Einbau des Ankers mit einer Aushubkote unterhalb des Ankers, wobei die Ortslage der Auflager für das statische System in Abhängigkeit der Aushubkote automatisch aus dem Produkt-Prozess-Modell ermittelt wird. Die auf diese Weise aus der Stoffparametervariation und aus Bauwerks- und Prozessinformationen aufgestellten Modellkandidaten werden parallel an den auf mehreren Servern installierten Kragarm- bzw. T2StmK-Service zur Simulation übergeben. Die erzielten Simulationsergebnisse werden wiederum temporär in der Datenbank gespeichert.

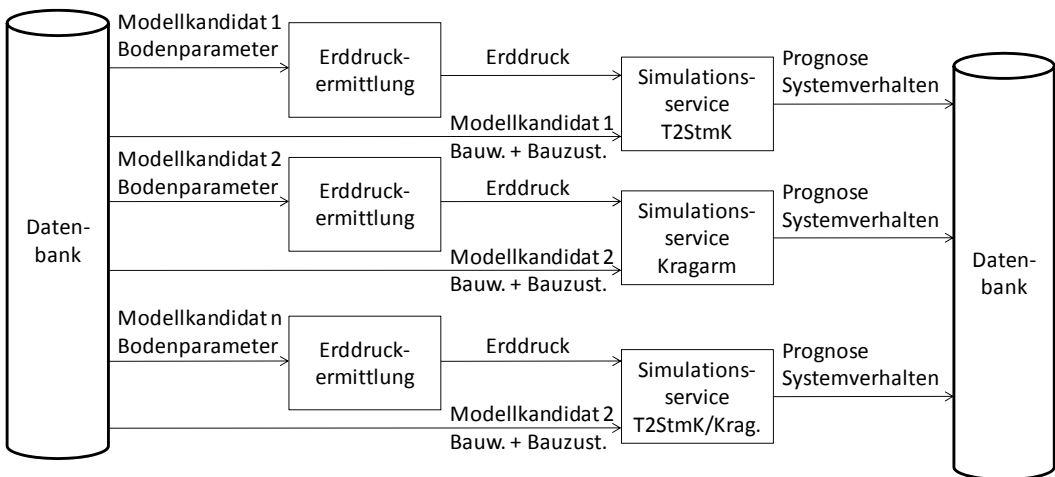


Abbildung 89: Einbindung der Simulations-Webservices

Priorisierung der Modellkandidaten

Die in der relationalen Datenbank gespeicherten Simulationsergebnisse der Modellkandidaten werden anhand des in Kap. 3.3.2 gegebenen gewichteten Distanzmaßes priorisiert. Zur Verminderung des Kommunikationsaufwandes und in Anbetracht der einfachen mathematischen Beziehungen im Testbeispiel wird das Distanzmaß direkt in der

Datenbank durch entsprechende SQL-Statements berechnet. Für reale Anwendungsfälle wird die Priorisierung durch Webservices mit Parallelisierung im Rahmen einer Grid- oder Cloud-Computing-Umgebung vorgeschlagen.

5.4.3. Informationslogistikservices

Die Informationslogistik zwischen den entwickelten Webservices wurde entsprechend der in Kap. 4.4.2 vorgestellten Methodik in BPEL zu einem Gesamtprozess zur Systemidentifikation orchestriert. Der daraus resultierende orchestrierte Webservice steht auf dem Applikationsserver des Instituts für Bauinformatik der TU Dresden unter <http://141.30.165.8:9762/active-bpel/services/MonitoringProcessService?wsdl> zur Ausführung zur Verfügung.

Ein Beispiel für den entsprechenden SOAP-Aufruf ist auszugsweise nachfolgend gegeben:

```
<soapenv:Envelope xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
  xmlns:sim="http://www.tu-dresden.de/Faschingbauer/Simulationsbeispiel/">
  <soapenv:Header/>
  <soapenv:Body>
    <sim:monitoringProcess>
      <sparqlquery_Grenzwerte>
        PREFIX
gOWL:<http://141.30.165.8:9762/webdav/OWL_Grenzwerte/Grenzwerte.owl#>;
PREFIX fdc:
<http://141.30.165.8:9762/webdav/Formula/FormulaDefinitionClasses.owl#>;
SELECT ?grenzwert
WHERE
{gOWL:Grenzwert01 fdc:hasData ?grenzwert.}
      </sparqlquery_Grenzwerte>
      <sparqlquery_Projekt1>
        <wichte_SPARQL>
PREFIX ifc: <http://141.30.165.8:9762/webdav/ifcOWL/ifc2_2.owl#>;
SELECT ?wichte1?wichte2
WHERE
{<http://141.30.165.8:9762/webdav/Projects/Project1#Wichte1>; ifc:FloatValue
?wichte1.
<http://141.30.165.8:9762/webdav/Projects/Project1#Wichte2>; ifc:FloatValue
?wichte2.}
        </wichte_SPARQL>
      ...
      </sparqlquery_anzahl_der_Diskretisierungsschritte>
      <anzahl_der_besten_Ergebnisse>5</anzahl_der_besten_Ergebnisse>
    </sim:monitoringProcess>
  </soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>
```

Abbildung 90: Auszug aus SOAP-Aufruf des Monitoringprozesses

Die Eingabe der Daten in den Prozess erfolgt hier durch Formulierung von SPARQL-Abfragen im SOAP-Request, d. h. die Daten werden aus der Beschreibungslogik direkt an den Schnittstellen des Monitoringprozesses übergeben und intern durch die Orchestrierung an die beteiligten Webservices weitergeleitet. Die technische Umsetzung der Orchestrierung resultiert in umfangreichem Quellcode (ca. 20 Seiten DIN A4), der hier nicht dargestellt werden kann.

6. Schlussfolgerungen

6.1. Zusammenfassung

Der Umfang des Wissens über das reale Boden- und Bauwerksverhalten bei komplexen Baumaßnahmen im geotechnischen Ingenieurbau kann durch die kombinierte, baubegleitende Auswertung von modellbasierter Simulation und Beobachtungsdaten kontinuierlich erhöht und zur gezielten Steuerung des Bauverfahrens verwendet werden.

Die Art und Weise, wie das erworbene Wissen zur Steuerung des Bauverfahrens eingesetzt werden kann, hängt, wie in Kap. 2.2 beschrieben, vom Bauverfahren ab. Während bei maschinellen Bauverfahren eine automatisierte Regelung möglich ist, sind bei manuellen Bauverfahren aktive Entscheidungen, die i.d.R. die Wahl einer anderen Ausführungsvariante bedeuten, erforderlich. In jedem Fall jedoch, soll die Steuerung auf Basis einer modellbasierten Prognose des Systemverhaltens erfolgen, um die Auswirkungen der Steuerungsmaßnahmen vorher abzuschätzen. Die Qualität der Steuerung hängt damit von der Realitätsnähe des mechanischen Modells ab. Prinzipiell ist eine realitätsnahe, zustandsabhängige Modellierung des physikalischen Verhaltens von Böden durch fortgeschrittene Stoffgesetze möglich (vgl. Kap. 3.1), jedoch erlaubt jedes Stoffgesetz erst zusammen mit abgesicherten Stoffparametern eine zuverlässige Vorhersage des Bodenverhaltens. Die kontinuierliche Anpassung der Stoffparameter, bzw. des Stoffgesetzes, kann theoretisch im Rahmen der Beobachtungsmethode durch die Auswertung von Messungen erfolgen, jedoch ist dies mit den derzeit verfügbaren Informationssystemen praktisch nicht durchführbar. Die Realisierung der Beobachtungsmethode kann nur durch Umsetzung einer kontinuierlichen Systemidentifikation gelingen. Der Informationsfluss der Beobachtungsmethode wird daher in Kap. 3.2.1 grob formalisiert und durch eine Systemidentifikation ergänzt. Da aufgrund der Nichtlinearität realitätsnaher bodenmechanischer Modelle als auch der Unbestimmtheit des Systems eine Systemidentifikation auf analytischem Wege nicht möglich ist, wird in Kap. 3.3 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 in Kap. 5.3.6 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 10^6 erfordert sowohl die Einbindung verteilter Rechenressourcen als auch eine semiautomatische Bewertung der Simulationsergebnisse. Zur Einbindung verteilter Rechenressourcen wird in Kap. 5.4 ein webservicebasiertes Softwarekonzept vorgeschlagen, das für den Einsatz von Grid- und Cloud-Computing notwendig ist und die parallele Simulation der Modellkandidaten ermöglicht. Die bei der hohen Anzahl an Simulationen entstehende Datenflut der Simulationsergebnisse ist manuell nicht mehr auswertbar und muss daher automatisch vorpriorisiert werden, sodass eine überschaubare Selektion der unter physikalischen und zeitlichen Konsistenzkriterien besten Modellkandidaten als Entscheidungsgrundlage für den Ingenieur möglich ist. Die Qualität dieser Priorisierung hängt von der zugrundeliegenden Modellmetrik ab. Im Rahmen der simulationsbasierten Systemidentifikation in Kap. 3.3 wird

gezeigt, dass die Nutzung des mittleren Fehlerquadrats zwischen Messung und Prognose als Modellmetrik keine zufriedenstellende Priorisierung erlaubt. Um die Qualität der Priorisierung zu erhöhen, werden daher Gewichtungsfaktoren zur Normierung der Modellmetrik bezüglich der Betragsgrößen der physikalischen Größen, zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Mess- und Simulationen, sowie zur Berücksichtigung systemischer Abhängigkeiten zwischen Messwerten in die Modellmetrik eingeführt.

Das anvisierte adaptive Bauverfahren mit kontinuierlicher simulationsbasierte Systemidentifikation ist innerhalb der erforderlichen engen Zeitgrenzen nur dann möglich, wenn neben der algorithmischen Umsetzung der Simulation und der Bewertung der Simulationsergebnisse auch der Datenfluss durch die Integration der Informationen und Anwendungen in einem Gesamtinformationssystem durchgängig abgebildet werden kann und der automatische Zugriff auf die Daten gegeben ist. Auf Basis der in Kap. 4.1.2 dargestellten Methoden wird der Überwachungsprozess als Prozessmodell in Kap. 5.1 detailliert ausgearbeitet und damit die notwendigen Komponenten des Rahmeninformationssystems sowie die Informationsflüsse spezifiziert. Der notwendige automatische Zugriff auf die Daten erfordert deren Abbildung in einem Datenmodell. Eine besondere Problematik stellt hierbei der Bezug der informationstransformierenden Prozesse der Messdatenauswertung zu den materialtransformierenden Prozessen der Bauausführung sowie zum Systemverhalten des dabei entstehenden Boden-Bauwerk-Systems dar. Die Kopplung von Handlungs- und Objektsystem in Kap. 2.1.3 ist die konzeptuelle Basis zur Entwicklung des integrierten Produkt-Prozess-Metamodells in Kap. 5.3.3, mit dem das entstehende Bauwerk und das Messsystem, jeweils mit ihrem Bezug zu den Prozessaktivitäten in 4D modelliert werden können. Um die Komplexität bei der Modellierung in Grenzen zu halten und damit die Handhabbarkeit für den Modellersteller zu gewährleisten, wird das kombinierte Produkt-Prozess-Metamodell so modularisiert, dass die Komplexität der hochvernetzten transitiven Beziehungen durch automatisches logisches Schlussfolgern hergestellt werden kann. In Kap. 5.3.1 werden hierfür Konzepte zur objektorientierten Modellierung von Objektzuständen und in Kap. 5.3.2 Konzepte zur modularen Prozessmodellierung für material- und energietransformierende Prozesse eingeführt. Die Produkt- und Prozessmodellkonzepte werden schließlich in Kap. 5.3.3 zu einem kombinierten Produkt-Prozess-Metamodell integriert, das es erlaubt, Zustandsänderungen von Bauwerken und Sensorsystemen zusammen mit dem Bauprozess zu modellieren, und damit formal zu repräsentieren.

Die hohe Komplexität der vernetzten, transitiven Beziehungen zwischen Objekten einerseits, Prozesselementen andererseits sowie zwischen Objekten und Prozesselementen untereinander ist manuell nicht mehr auswertbar. Aus den transitiven, impliziten Beziehungen müssen daher durch Methoden des automatischen logischen Schließens explizite Beziehungen abgeleitet werden. In Kap. 5.3.4 wird daher das entwickelte Produkt-Prozess-Metamodell in Beschreibungslogik beschrieben und durch einen Deduktionskalkül ergänzt. Die Beschreibungslogik zur 4D-Modellierung, sowie die weiter oben beschriebene logikbasierte Modellkomposition werden prototypisch in der Ontologiesprache OWL-DL als Wissensbasis umgesetzt (vgl. Kap. 5.3.7), und mit den Webservices in Kap. 5.4 zu einem Gesamtinformationssystem integriert.

6.2. Ergebnis

Die in dieser Arbeit 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.

Insbesondere für eine umfassende, modellbasierte Analyse der erfassten Messdaten werden in dieser Arbeit die methodischen Grundlagen gelegt. Ein steuernder Eingriff in das Bauverfahren ist nur durch eine umfängliche Interpretation von Messdaten durch eine Systemdiagnose auf der Basis physikalisch begründbarer Modelle möglich. 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. Damit ist eine semiautomatische Erstellung von Modellkandidaten für die simulationsbasierte Systemidentifikation möglich.

Die simulationsbasierte Systemidentifikation mit Nutzung mehrerer Stoffgesetze und Variation der Stoffparameter resultiert für jeden Auswertezyklus in einer sehr hohen Anzahl an Modellkandidaten. Eine zeitnahe Simulation und Auswertung wird durch den parallelen Einsatz verteilter Ressourcen mit einer durchgängigen Anwendungs- und Informationsintegration ermöglicht, der durch Entwicklung eines serviceorientierten Architekturkonzepts mit Webservices realisiert wird. Die bisher realisierte Parametervariation durch die Kombination der Parametervarianten über das Kreuzprodukt m^p der Variation m über die Parameter p resultiert bei einer Diskretisierung des Informationsraums in einer äußerst hohen Anzahl an Modellkandidaten (z.B. 10^{15} Modellkandidaten bei $m=10$ Variationen und $p=15$ zu variierender Parameter). Dies sprengt natürlich auch bei paralleler Berechnung alle verfügbaren Möglichkeiten. Als Grenze des Möglichen mit Grid-Computing ist für die nächsten 3 Jahre eine Größenordnung von 10^5 bis 10^6 paralleler Simulationen realistisch. Bei geschickter Einschränkung der tatsächlich zu simulierenden Modelle auf eine Teilmenge des Kreuzproduktes, wie in Kap. 6.3 dargestellt, können schon mit den heutigen Möglichkeiten der Parallelisierung qualifizierte simulationsbasierte Identifikationen durchgeführt werden.

Die automatische Zuführung der Informationen zu den Analysealgorithmen ist ein wesentliches Problem bei der Realisierung der durchgängigen Auswertung. Als Kern des Informationssystems wird daher ein auf Beschreibungslogik basierendes Produkt-Prozess-Metamodell eingeführt, das die 4D-Modellierung komplexer Bauwerke und Messsysteme ermöglicht. Die Modellierungsmethode ist dabei so modularisiert, dass der Modellersteller nicht mit der hohen Komplexität der hochvernetzten transitiven Zusammenhänge belastet wird. Es ist also eine einfache Durchführung der Modellierung und trotzdem die Erschließung der komplexen Zusammenhänge möglich. Die Schlussfolgerungsfähigkeit des Beschreibungslogikansatzes ermöglicht die Deduktion komplexer Zusammenhänge und damit deren Vereinfachung durch automatische Explikation direkter Beziehungen. Dadurch ist letzten Endes die Abfrage komplexer Zusammenhänge durch einfache Abfragelogiken möglich. Die Abbildung von Zustandsänderungen der zu erstellenden und zu überwachenden Systeme in einem kombinierten Produkt-

Prozess-Modell ermöglicht die logische Nachvollziehbarkeit von Systemänderungen und ist daher eine wesentliche Voraussetzung zur Realisierung eines adaptiven Bauverfahrens. Das logikbasierte, schlussfolgerungsfähige und modular aufgebaute 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. Die auf dem Metamodellansatz instanziierten 4D-Modelle erlauben beispielsweise die direkte Abfrage vergleichbarer Mess- und Prognosedaten oder die Identifikation von Vorgänger- und Nachfolgeraktivitäten im Bauprozess. Dies ist unter anderem dann von Interesse, wenn die Daten in Bezug zu allen abgearbeiteten Aktivitäten im Bauprozess ausgewertet, oder aktualisierte Prognosen für die noch auszuführenden Bauzustände erstellt werden sollen.

Der Unikatcharakter geotechnischer Problemstellungen erfordert eine hohe Flexibilität nicht nur bei der Modellierung und Organisation der Daten, sondern auch bei der Konfiguration der Auswertelgorithmen. Der Ansatz der Serviceorientierten Architektur ermöglicht die flexible Einbindung von Software Dritter mittels Webservice-Technologie. Services zur Abfrage von Daten, Services zum Vergleich von Mess- und Prognosedaten, zur Simulation des Boden-Bauwerk-Verhaltens, zur Modellkomposition, zur simulationsbasierten Systemidentifikation können durch Definition der Informationslogistik mit einer Orchestrierungssprache nahezu beliebig kombiniert und gesteuert werden. Webservices ermöglichen durch die Realisierung des komponentenbasierten Ansatzes und durch ihre Fernaufruffähigkeit die Komposition von Softwarekomponenten zu integrierten, bauprojektspezifischen Softwaresystemen, die Verteilung der Rechenlast in Cloud- und Grid-Computing und damit erst die Durchführung der simulationsbasierten Systemidentifikation in brauchbarer Rechenzeit.

Zur vollständigen Umsetzung der Beobachtungsmethode mit Anpassung des ursprünglichen geotechnischen Entwurfsmodells an die vor Ort angetroffenen, durch Messungen festgestellten Zustände werden die Informationsbrüche der Datenverarbeitung zwischen der Datenerfassung und der Verfahrenssteuerung durch den hier vorgestellten Ansatz geschlossen. Damit werden die in der Norm verankerten Anforderungen an die Beobachtungsmethode im Grundbau, die bisher in der Praxis nicht zufriedenstellend erfüllt werden konnten, realisierbar.

Die hier eingeführte Methodik ermöglicht es schließlich, Veränderungen im Systemverhalten von Boden und Bauwerk zeitnah festzustellen, deren Ursachen zu diagnostizieren, sie physikalisch zu begründen und steuernd in das Bauverfahren einzugreifen.

6.3. Ausblick

Über den erreichten Ergebnisstand hinaus ist auf Basis der hier eingeführten Methodik Forschungspotenzial vorhanden. Ein Ausblick auf anstehende Forschungsarbeiten ist nachfolgend unterschieden nach Themen gegeben.

Erweiterte Methoden zur Erzeugung von Modellkandidaten für die simulationsbasierte Systemidentifikation

Bei der simulationsbasierten Systemidentifikation ist noch erhebliches Potenzial zur Verkürzung der effektiven Rechenzeit, bzw. zur Erhöhung des Informationsgewinns vorhanden. Durch die Auswahl besonders realitätsnaher Modellkandidaten als Teilmenge des Kreuzproduktes kann bei Ausnutzung der erreichten Parallelisierungsmöglichkeiten eine wesentliche weitere Erhöhung der Qualität der Systemidentifikation erreicht werden.

Bei der Erstellung von Stoffparameterkandidaten sollten hierfür auch die Abhängigkeiten der Stoffparameter untereinander berücksichtigt werden, sodass vorrangig Kombinationen mit höherer Plausibilität erzeugt werden. Hierfür ist die Erforschung der Abhängigkeiten der Stoffparameter untereinander und die Formulierung entsprechender funktionaler Zusammenhänge erforderlich. Die Integration dieser funktionalen Zusammenhänge mit der beschreibungslogikbasierten Repräsentation sinnvoller Parameterwerte erfordert die weitere Kombination wissensbasierter Methoden mit kombinatorischen Algorithmen. Auch der Einsatz maschineller Lernverfahren zur Umsetzung einer intelligenten Kombinatorik ist denkbar. Zur weiteren Effizienzsteigerung wird vorgeschlagen, die logikbasierte Beschreibung von Stoffgesetzen und Stoffparametergrenzen durch ein fallbasiertes System zu ergänzen. Aus der Menge der bei der Systemidentifikation untersuchten Stoffgesetze sollen automatisch ausgewählte Stoffgesetze, die mindestens befriedigende Ergebnisse geliefert haben, mit den Attributen, die die zu untersuchende Situation beschreiben, sowie einem Maß der erreichten Simulationsqualität in einer Fallbasis gespeichert werden. Damit kann eine Fallbasis aufgebaut werden, die ein erhebliches Erfahrungswissen für die situationsabhängige empirische Auswahl von Stoffgesetzen zur Verfügung stellt. Die Umsetzung dieses Verfahrens erfordert den Aufbau eines Klassifikationsschemas physikalischer Effekte, die eine bestimmte Situation beschreiben, sowie die Entwicklung von Ähnlichkeitsmaßen, mit denen von einer zur Bauzeit vorliegenden Situation auf ähnlich gelagerte Situationen früherer Projekte geschlossen werden kann.

Desweiteren könnten die Methode des Importance-Sampling und die Response-Surface-Methode in Analogie auf die simulationsbasierte Systemidentifikation übertragen und in den Prozess der Modellkandidatenerzeugung integriert werden, so dass bei Bedarf eine schrittweise Verfeinerung der Parameterkandidaten mit Gewichtung besonders erfolgversprechender Bereiche erreicht werden kann. Zur Identifikation dieser erfolgversprechenden Bereiche sollte ebenfalls die Abhängigkeit zwischen Parametern sowie das Erfahrungswissen der Fallbasis berücksichtigt werden, um die Anzahl der Verfeinerungsschritte so gering wie möglich zu halten, da jede schrittweise Verfeinerung des Informationsraums eine Sequenzialisierung der Systemidentifikation, und damit eine Verlängerung der Zeitdauer bis zur endgültigen Identifikation eines Modellkandidaten bedeutet.

Erforschung von Modellmetriken zur Priorisierung von Modellkandidaten

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Priorisierung von Modellkandidaten. Das hier vorgeschlagene Modelldistanzmaß sollte durch Erforschung der Gewichtungsfaktoren für unterschiedliche bodenmechanische Anwendungen so ausformuliert werden, dass eine fundierte Priorisierung als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl durch den Ingenieur ermöglicht wird. Insbesondere sind hier die Abhängigkeiten der physikalischen Größen untereinander zu untersuchen und in die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren einzubeziehen.

Detaillierte domänenspezifische Daten- und Wissensmodelle

Das Gewicht bei der Daten- und Wissensmodellierung liegt in dieser Arbeit auf der domänenübergreifenden Modellierung auf Meta-Ebene. Das hier eingeführte beschreibungslogikbasierte Produkt-Prozess-Metamodell stellt die notwendigen Konstrukte zur Entwicklung detaillierter Domänenmodelle zur Verfügung. Ziel künftiger Forschung sollte es sein, aufbauend auf dem hier eingeführten Modellierungsansatz domänenspezifische Daten- und Wissensmodelle, insbesondere zur detaillierten Repräsentation geotechnischer Bauwerksobjekte und geotechnischer Messinstrumente zu entwickeln.

Steuerung maschineller Bauverfahren

Ein weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Ableitung von Regelgrößen für maschinelle Bauverfahren. Regelgrößen sollten bei bekannten physikalischen Zusammenhängen, die durch mathematische Modelle formalisierbar sind, aus diesen Modellen abgeleitet werden. Sind die physikalischen Zusammenhänge nicht bekannt, ist auch die mathematische Formalisierung auf der Basis empirischer Studien oder der Einsatz maschineller Lernverfahren, wie z. B. künstlicher Neuronaler Netze oder Methoden des fallbasierten Schließens denkbar.

Einsatz der Produkt-Prozessmodellierung in anderen Fachgebieten

Die Methode der Produkt-Prozessmodellierung auf Basis des hier eingeführten Metamodells ist nicht nur im Rahmen der Bauwerksüberwachung zur Abfrage von Informationen über topologische Produkt- und Prozesszusammenhänge nutzbar, sondern insbesondere durch die Möglichkeiten der automatischen Inferenz auch für die Planung von Prozessen, d. h. für die automatische Ableitung von Produkt-Prozessmodellen auf der Basis vorher definierter notwendiger Vorgänger-Nachfolger-Bedingungen. Die Anwendbarkeit für diese Problemstellung konnte durch erste Tests bestätigt werden. Die Prozesskomposition durch logische Schlussfolgerung ergibt Prozessmodelle mit größtmöglicher Parallelität. D. h. die Methode kann im ersten Schritt der Planung von Bauausführungsprozessen vor der Berücksichtigung von Bereitstellungs- und Ressourcenproblemen eingesetzt werden.

7. Literaturverzeichnis

Aamodt, A., & Nygard, M. (1995). Different Roles and mutual dependencies of data, information and knowledge. *Data & Knowledge Engineering* (16), S. 191-222.

Akinci, B., & al., e. (Februar 2006). A Formalism for Utilization of Sensor Systems and Integrated Project Models for Active Construction Quality Control. *Automation in Construction* (Vol. 15, No. 2), S. 124-138.

Arslan, U., Quick, H., Moormann, C., & Reul, O. (1999). Geotechnische in-situ Messungen an Hochhausgründungen und baubegleitende Qualitätssicherungsmaßnahmen. *"Hochhäuser" Darmstädter Statik-Seminar*. Technische Universität Darmstadt, Institut für Statik, Eigenverlag.

Arslan, U., Zimmer, C., Quick, H., & Meissner, S. (2006). Monitoring und Qualitätssicherung in der geotechnischen Ingenieurpraxis. In *Sicherheitsgewinn durch Monitoring?* (S. 25-47). Selbstverlag, Freunde des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt e.V. .

Baader, F. (2009). Description Logics. *Reasoning Web: Semantic Technologies for Information Systems, 5th International Summer School 2009, Lecture Notes in Computer Science* (5689), S. 1–39.

Baader, F., & Nutt, W. (2003). Basic Description Logics. In F. Baader, & e. al., *The Description Logic Handbook - Theory, Implementation and Applications* (S. 43-95). University Press, Cambridge.

Becker, P. (2009). Zeit- und spannungspfadabhängiges Verformungsverhalten bei Baugruben in weichen Böden. *Schriftenreihe Geotechnik , Heft 22* . (H.-G. Kempfert, Hrsg.) Universität Kassel.

Beetz, J. (2009). Facilitating distributed collaboration in the AEC/FM sector using Semantic Web Technologies, Dissertation, Eindhoven University of Technology. Eindhoven.

Beetz, J., van Leeuwen, J. P., & de Vries, B. (2009). IfcOWL: A case of transforming EXPRESS schemas into ontologies. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* (23, Special Issue 01), S. 89-101.

Björk, B.-C. (1995). Requirements and information structures for building product models. *Ph.D. Thesis* . Technical Research Centre of Finland, VTT-Publications 245.

Bolle, G., & Berndt, R.-D. (2003). Innovatives Informationsmanagement bei Monitoring-Untersuchungen. In B. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung -BAM- (Hrsg.), *Beiträge zur Fachtagung Sonderkapitel aus dem Brücken- und Ingenieurbau*. (S. 87-91). Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.

Borchert, K.-M., Deterding, K., & Trobisch, S. (2005). Setzungsprognosen und Setzungsmessungen für eine große und tiefe Tunnelbaugrube in Berlin. *20. Christian Veder Kolloquium*. Graz.

- Bossel, H. (2004). *Systeme, Dynamik, Simulation - Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Norderstedt: Books on Demand GmbH.
- Bücker, K., Assenmacher, S., Köster, S., & Otten, B. (2006). Nord-Süd Stadtbahn Köln/D, Teil III-Schildfahrt. *Tunnel* (7).
- Chen, P. P.-S. (2002). Entity Relationship Modeling - Historical Events, Future Trends, and Lessons Learned. In M. Broy, & E. Denert, *Software Pioneers: Contributions to Software Engineering, Lecturing Notes in Computer Sciences* (S. 100-114). Springer Verlag, Berlin.
- Chen, P. P.-S. (1976). The Entity Relationship Model-Toward a Unified View of Data. *ACM Transactions on Database Systems* (1(1)), S. 9-36.
- Codd, E. F. (13. 06 1970). A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. *Communications of the ACM*, 377-387.
- Codd, E. F. (1990). *The Relational Model for Database Management* (2. Ausg.). Reading u. a.: Addison-Wesley.
- DIN 1319-1. (Januar 1995). Grundlagen der Meßtechnik, Teil 1: Grundbegriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 1319-3. (05 1996). Grundlagen der Meßtechnik, Teil3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit. Beuth Verlag.
- DIN 5473. (1992). Logik und Mengenlehre, Zeichen und Begriffe. Beuth Verlag.
- Dunnicliff, J. (1988). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Eastman, C. (1999). *Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Farrar, S., & Langendoen, T. (2009). An OWL-DL Implementation of GOLD: An ontology for the Semantic Web. In A. Witt, & D. Metzing, *Linguistic modeling of information and Markup Languages. Contributions to language technology*. Dordrecht: Springer.
- Faschingbauer, G., & Scherer, R. J. (2008). An information management system for monitoring of geotechnical engineering structures. *ECPPM 2008 - eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, Proceedings of 7th European Conference on Product and Process Modelling*. Taylor & Francis Group.
- Gajo, A., & Muir Wood, D. (1999). Severn-Trent sand: a kinematic hardening constitutive model for sands: the q-p formulation. *Geotechnique* (49 No. 5), S. 595-614.
- Glötzl. (2010). *GLÖTZL Gesellschaft für Baumeßtechnik mbH*. Abgerufen am 30. 09 2010 von http://www.gloetzl.de/web/fileadmin/produkte/6_Software_und_Server/P_190.01_GLA_Auswertesoftware_de.pdf
- Gordon, C., Akinci, B., & Garrett, J. H. (2004). An Approach for Planning Sensor-Based Inspection of the Built Environment. *Xth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. Weimar.

- Gordon, C., Akinci, B., & Garrett, J. H. (2008). Automated planning support for on-site construction inspection. *Automation in Construction* (17), S. 705–718.
- Grabe, M. (2005). *Measurement Uncertainties in Science and Technology*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. In B. R. Gaines, & J. H. Boose (Hrsg.), *Knowledge Acquisition, Volume 5. Special issue: Current issues in knowledge modeling*, (S. 199 – 220).
- Gudehus, G. (1996). A comprehensive constitutive equation for granular materials. *Soil and foundations*, S. 1-12.
- Gudehus, G. (2004). Prognosen bei Beobachtungsmethoden. *Bautechnik* (81, Heft 1), 1-8.
- Gudehus, G. (2001). Stoffgesetze für Böden aus physikalischer Sicht. In U. Smoltczyk, *Grundbau-Taschenbuch* (6. Auflage Ausg., Bd. 1, S. 203-254). Ernst & Sohn.
- Herle, I. (2003). Numerical predictions and reality. In D. Kolymbas, *Advanced Mathematical and Computational Geomechanics* (S. 167-194). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Herle, I., & Masin, D. (2005). Einfluss von bodenmechanischen Aspekten auf numerische Ergebnisse. In J. G. (ed.) (Hrsg.), *FEM in der Geotechnik (Qualität, Prüfung, Fallbeispiele), Veröffentlichungen des Arbeitsbereiches Geotechnik und Baubetrieb, Heft 10* (S. 53-66). TU Hamburg-Harburg.
- Hitzler, P., Krötzsch, M., Rudolph, S., & Sure, Y. (2008). *Semantic Web*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hoffmann, M. (1999). Problems with Peirce's Concept of Abduction. *Foundations of Science* (4), 271–305.
- Hollmann, A. (2008). *Klassifizierung und Suche semantischer Ressourcen in verteilten Systemen, Diplomarbeit*. Technische Universität Dresden.
- Holstein, A. (2006). *Business Rules: Modellierung von Geschäftsregeln*. Norderstedt: GRIN Verlag.
- Huhnt, W. (2009). Process Modelling in Civil Engineering. *Structural Engineering International 1/2009: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)* (19), S. 91-101.
- Huhnt, W., & Richter, S. (2010). Visualization of construction process models. In W. Tizani (Hrsg.), *omputing in Civil and Building Engineering, Proceedings of the International Conference* (S. 35 ff). Nottingham, UK: Nottingham University Press.
- IEEE, I. o. (1998). IEEE Std 1320.1-1998. *IEEE Standard for Functional Modeling Language—Syntax and Semantics for IDEF0*. US.
- ISO 10303-11:2004. (2004). Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual.

ISO PAS 16739. (2005). Industry Foundation Classes, Release 2x, Platform Specification (IFC2x Platform).

JCSS. (08 2001). PROBABILISTIC MODEL CODE. Joint Committee on Structural Safety.

Katzenbach, R., & Bachmann, G. (2006). Sicherheit und Systemoptimierung durch Monitoring in der Geotechnik. *Sicherheitsgewinn durch Monitoring?* (S. 251-265). Selbstverlag, Freunde des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt e.V.

Katzenbach, R., & Giere, J. (2005). Supporting Geotechnical Design with Petri-Net-Based Process Patterns. *Proc. 22nd Conference on Information Technology in Construction CIB-W78*. Dresden.

Katzenbach, R., & Waberseck, T. (2003). Mängel und Mangelbeseitigung im Grundbau und im Tunnelbau. *6. Berlin-Darmstädter Baurechts-Kolloquium am 30.10.2003* (S. 13-23). Darmstadt: Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 67.

Katzenbach, R., Rüppel, U., Meißner, U. F., Giere, J., & Wagenknecht, A. (2006). A Process-oriented Cooperation Model for Distributed Civil Engineering Construction Works. *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, (S. 3266-3275). Montreal, Canada.

Katzmann, A. (2006). *Standardsicherheit einer tiefen Baugrube - Einfluss der Stoffgesetze auf FEM-Berechnungen*, Diplomarbeit. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik, Professur für Bodenmechanik und Grundbau.

Kolymbas, D., & Herle, I. (2008). Stoffgesetze für Böden. In K. J. Witt, *Grundbau-Taschenbuch, Teil 1 Geotechnische Grundlagen, 7. Auflage* (S. 243-287). Berlin: Ernst & Sohn.

Kripakaran, P., & Smith, I. F. (2009). Configuring and enhancing measurement systems for damage identification. *Advanced Engineering Informatics* (23), S. 424–432.

Ljung, L. (1999). *System Identification - Theory for the User* (2nd Edition Ausg.). New Jersey: Prentice Hall PTR.

Manzari, M. T., & Dafalasis, Y. F. (1997). A Critical State Two-Surface Plasticity Model for Sands. *Geotechnique* (49 No. 2), S. 252-272.

Marton Geotechnical Services Ltd. (2009). *Geosense Viewer Web-based Software*. Abgerufen am 10. 10 2010 von <http://www.mgs.co.uk/geotechnical-instrumentation/software/212/geotechnical-instrumentation-software.html>

Masin, D. (2005). A hypoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (29(4)), S. 311–336.

Masin, D., & Khalili, N. (2008). A hypoplastic model for mechanical response of unsaturated soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (32(15)), S. 1903–1926.

Meier, J., & Maier, C. (2006). Schildvortrieb unter der Kölner Altstadt - Kompensationsinjektion als Gebäudesicherung im Zuge des Baus der Nord-Süd

- Stadtbahn. In N. Vogt (Hrsg.), *Beiträge zum 5. Geotechnik-Tag in München, Geotechnik beim Verkehrswegebau* (S. 55-81). München: Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München.
- Mikulakova, E., König, M., Tauscher, E., & Beucke, K. (2010). Knowledge-based schedule generation and evaluation. *Advanced Engineering Informatics* (24), S. 389-403.
- Nagel, F., Stascheit, J., & Meschke, G. (2008). Numerische Simulation von Schildvortrieben als Teil eines integrierten Entwurfsunterstützungssystems für den Tunnelbau. *10. Fachtagung Baustatik-Baupraxis*. Karlsruhe.
- Nagel, R. N., Braithwaite, W. W., & Kennicott, P. R. (1980). Initial Graphics Exchange Specification IGES. (*Version 1.0, NBSIR 80-1978*) . Washington DC: National Bureau of Standards.
- Nellessen, P. (2005). *Vortriebssynchrone Prognose der Setzungen bei Flüssigkeitsschildvortrieben auf Basis der Auswertung der Betriebsdaten mit Hilfe eines Neuro-Fuzzy-Systems*. Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Niemunis, A., & Herle, I. (1997). Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials* (2(4)), S. 279-299.
- OASIS. (11. 04 2007). *Web Services Business Process Execution Language Version 2.0, OASIS Standard*. Abgerufen am 23. 08 2010 von <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.html>
- OASIS. (11. 04 2007). *Web Services Business Process Execution Language Version 2.0, OASIS Standard*. Abgerufen am 6. 10 2010 von <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.html>
- Object Management Group (OMG). (Februar 2009). *Documents associated with UML Version 2.2*. Abgerufen am 18. 10 2010 von <http://www.omg.org/spec/UML/2.2/>
- Object Management Group, 2010. (kein Datum). *Business Process Model and Notation (BPMN)*. Abgerufen am 6. 10 2010 von <http://www.omg.org/spec/BPMN/>
- Pahl, P. J., & Damrath, R. (2000). *Mathematische Grundlagen der Ingenieurinformatik*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Peck, R. B. (1969). Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics. *Geotechnique* 19, No. 2 .
- Peil, U. (Hrsg.). (Mai 2006). Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung. *Berichtskolloquium 2006, Sonderforschungsbereich 477, Technische Universität Carolo-Wilhelmina* . Braunschweig.
- Peirce, C. S. (1905). *Collected Papers of Charles Sanders Peirce, CP 8.209* (Bd. 8). (A. W. Burks, Hrsg.) Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1960.
- Pernul, G., & Unland, R. (2003). *Datenbanken im Unternehmen: Analyse, Modellbildung und Einsatz*. Oldenbourg.

- Pestana, J. M., & Whittle, A. J. (1999). Formulation of a unified constitutive model for clays and sands. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (23), S. 1215-1243.
- Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. Schriften des Instituts für Instrumentelle Mathematik, Universität Bonn, Bonn.
- Powderham, A. (2002). The Observational Method - Learning from Projects. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering* (115).
- Raphael, B., & Smith, I. F. (2003). A direct stochastic algorithm for global search. *Journal of Applied Mathematics and Computation* (146, No. 2-3), S. 729-758.
- Reed, K. A. (1988). Product modeling of buildings for data exchange standards: from IGES to PDES/STEP and beyond. In P. Christiansson, & H. Karlsson (Hrsg.), *Conceptual modelling of buildings, CIB W74+W78*. Lund University and the Swedish Building Centre.
- Richter, S., Huhnt, W., & Wotschke, P. (2009). Applying a New Approach for Generating Construction Schedules to Real Projects. *Computing in Engineering: EG – ICE Conference 2009*, (S. 234-241). Berlin.
- Robert-Nicoud, Y., Raphael, B., & Smith, I. F. (2005). System identification through model composition and stochastic search. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*.
- Roddemann, D. (30. 09 1999). *ftp-Server der Universität Innsbruck*. Abgerufen am 07. 10 2010 von ftp://ftp.uibk.ac.at/pub/uni-innsbruck/igt/sources/umat_hypo/
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie - Eine Systemtheorie der Technik* (3., überarbeitete Auflage Ausg.). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Rudolph, D., Stürznickel, T., & Weissenberger, L. (1993). *Der DXF-Standard*. München: Rossipaul Verlag.
- Rüppel, U., Meissner, U. F., & Greb, S. (2004). Modeling Processes and Processing Product Model Information based on Petri Nets. In A. Dikbas, & R. J. Scherer (Hrsg.), *ECPPM 2004 - eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, Istanbul*. Balkema.
- Saitta, S., Kripakaran, P., Raphael, B., & Smith, I. F. (2008). Improving System Identification Using Clustering. (ASCE, Hrsg.) *JOURNAL OF COMPUTING IN CIVIL ENGINEERING*, S. 292-302.
- Salmon, W. C. (1973). *Logik* (Second edition Ausg.). Prentice Hall: Englewood Cliffs, N. J.
- Scheer, A.-W. (2000). *ARIS - Business Process Modeling* (3. Auflage Ausg.). Berlin: Springer.
- Scheer, A.-W. (2001). *ARIS - Modellierungsmethoden, Metamodelle, Anwendungen* (4. Auflage Ausg.). Berlin Heidelberg: Springer.
- Scherer, R. J. (2006). Integrierte dynamische Produkt- und Prozessmodellierung mit dem Ziel der Risikobewertung von Bauprojekten. In S. Wenzel (Hrsg.), *Simulation in*

Produktion und Logistik 2006, 12. ASIM Fachtagung. Kassel: SCS Publishing House e.V., San Diego - Erlangen.

Scherer, R. J., Katranuschkov, P., & Rybenko, K. (2008). Description Logic Based Collaborative Process Management. In Y. Rafiq, P. de Wilde, & M. Borthwick (Hrsg.), *ICE08 – Proc. 15th workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE)*, (S. 291-302). Plymouth, UK.

Scherer, R. J., Schapke, S.-E., & Katranuschkov, P. (2010). Concept of an information framework for management, simulation and decision making in construction projects. In K. Menzel, & R. J. Scherer (Hrsg.), *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the* (S. 97-104). Cork, Ireland: Taylor & Francis Group.

Schmidt-Schauß, M., & Smolka, G. (1991). Attributive concept descriptions with complements. *Artificial Intelligence* (48(1)), S. 1-26.

Schröder, T., Savidis, S., & Holz, K.-P. (2007). Praxiseinsatz einer Internetbasierten Informationsplattform für die Bauausführung im Spezialtiefbau. *Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft Nr. 41*, (S. 49-61). Berlin.

Schueller, G. I., & Stix, R. (1987). A critical appraisal of methods to determine failure probabilities. *Structural Safety* (4), S. 293-309.

Smith, I. (2005). Sensors, Models and Videotape. *Computing in Civil Engineering, Proceedings of the 2005 ASEC Computing Conference*. Cancun, Mexico: American Society of Civil Engineers, Reston VA, USA.

Solso, R. (2005). *Kognitive Psychologie*. Heidelberg: Springer.

Sowa. (2000). Ontology, Metadata and Semiotics. In B. Ganter, & G. W. Mineau, *ICCS '00 Proceedings of the Linguistic on Conceptual Structures: Logical Linguistic, and Computational Issues* (S. 55 - 81).

Sowa, J. F. (06. 08 2003). *Ontology*. Abgerufen am 06. 08 2010 von <http://www.jfsowa.com/ontology/index.htm>

Stengel, R. F. (1994). *Optimal Control and Estimation*. New York: Dover Publications, Inc.

Thatte, S. (2001). *XLANG - Web Services for Business Process Design*. (M. Corporation, Hrsg.) Abgerufen am 01. 09 2010 von <http://xml.coverpages.org/XLANG-C-200106.html>

Thut, A. (2001). Geotechnische Messverfahren. In U. Smolczyk, *Grundbau-Taschenbuch* (6. Auflage Ausg., Bd. 1, S. 555-612). Berlin: Ernst & Sohn.

van Deventer, C., Clarke, W. A., & Hazelhurst, S. (2010). BOINC and CUDA: Distributed High-Performance Computing for Bioinformatics String Matching Problems. *Proc. of Southern Africa Telecommunication Networks and Applications Conference (SATNAC)*. Stellenbosch, South Africa.

VDI/VDE 3685, B. 1. (Mai 1990). VDI/VDE 3685, Blatt 1. *VDI/VDE-Richtlinie: Adaptive Regler - Begriffe und Eigenschaften*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI/VDE 3685, B. 2. (Januar 1992). VDI/VDE 3685, Blatt 2. *VDI/VDE-Richtlinie: Adaptive Regler - Erläuterungen und Beispiele*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- von Wolffersdorff, P.-A. (1997). *Verformungsprognosen für Stützkonstruktionen*. Habilitationsschrift, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Karlsruhe.
- W3C. (10. February 2004). *OWL Web Ontology Language Reference, W3C Recommendation*. Abgerufen am 18. 10 2010 von <http://www.w3.org/TR/owl-ref/>
- W3C Working Group. (11. 02 2004). *Web Services Glossary, W3C Working Group Note 11 February 2004*. Abgerufen am 07. 06 2009 von <http://www.w3.org/TR/ws-gloss/>
- Weise, M. (2006). *Ein Ansatz zur Abbildung von Änderungen in der modell-basierten Objektplanung*. Dresden: Dissertation, Institut für Bauinformatik, Technische Universität Dresden.
- Wesley, A. (01. 01 2002). *WSFL in action, Part 1*. (IBM, Hrsg.) Abgerufen am 01. 09 2010 von <http://www.ibm.com/developerworks/webservices/library/ws-wsfl1/#resources>
- WFMC. (10. 08 2008). *XPDL 2.1 Complete Specification*. Abgerufen am 06. 08 2010 von <http://www.wfmc.org/xpdl.html>
- Whitehead, A. N., & Russell, B. (1910). *Principia Mathematica* (Bd. I). Cambridge: Cambridge University Press.
- Wiener, N. (1963). *Kybernetik - Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine*. Düsseldorf und Wien: Econ-Verlag GmbH.
- Wikipedia. (23. 09 2010). *Logik*. Abgerufen am 06. 10 2010 von <http://de.wikipedia.org/wiki/Logik>
- Wörn, H., & Brinkschulte, U. (2009). *Echtzeitsysteme: Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen*. Berlin: Springer.
- Zins, C. (2007). Conceptual Approaches for Defining Data, Information, and Knowledge. *Journal of the American Society for Information Science and Technology* (58 (4)), S. 479–493.

Bisher erschienene Dissertationen, Habilitationen und Hefte des Instituts für Bauinformatik¹³

Christoph Meinecke	Ein objektorientiertes Konstruktions- expertensystem mit Regelmethoden	Selbstverlag Karlsruhe, 07/1995
Markus Hauser	Eine kognitive Architektur für die wissensbasierte Unterstützung der frühen Phasen des Entwurfs von Tragwerken	logos Verlag Berlin, 06/1998
Martin Zsohar	Stochastische Größen der Resonanzfrequenzen und der Verstärkung seismischer Wellen im horizontal geschichteten zufälligen Medium	Shaker Verlag Aachen, 07/1998
Christian Steurer	Modellierung und Berechnung des Ermüdungsriß- fortschritts mit stochastischen Differential- gleichungen	Selbstverlag, 02/1999
Peter Katranuschkov	A Mapping Language for Concurrent Engineering Processes	Heft 1, 02/2001
Karsten Menzel	Methodik zur nachhaltigen, rechnergestützten Ressourcenverwaltung im Bauwesen	Heft 2, 11/2003
Michael Eisfeld	Assistance in Conceptual Design of Concrete Structures by a Description Logic Planner	Heft 3, 11/2004
Matthias Weise	Ein Ansatz zur Abbildung von Änderungen in der modellbasierten Objektplanung	Heft 4, 11/2006
Jörg Bretschneider	Ein wellenbasiertes stochastisches Modell zur Vorhersage der Erdbebenlast	Heft 5, 12/2006
Martin Keller	Informationstechnisch unterstützte Kooperation bei Bauprojekten	Heft 6, 06/2007
Kamil Umut Gökce	IT Supported Construction Management	Heft 7, 06/2008

¹³ Bis September 2003 Lehrstuhl für Computeranwendung im Bauwesen

