

Schriftenreihe Bauwirtschaft

I Forschung 7

Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft an der Universität Kassel

kassel
university



press

**Integration von CAD und Simulation
auf Basis von Produktmodellen im Erdbau**

Racha Chahrour

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel

Weitere Mitglieder der Promotionskommission:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt

Prof. Dr.-Ing. Peter Racky

Tag der mündlichen Prüfung

14. Dezember 2006

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2006

ISBN 978-3-89958-290-1

URN: urn:nbn:de:0002-2904

© 2007, kassel university press GmbH, Kassel

www.upress.uni-kassel.de

Umschlaggestaltung: Melchior von Wallenberg, Nürnberg

Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel

Printed in Germany

Vorwort des Herausgebers

Die Simulation ermöglicht eine stochastische und dynamische Analyse komplexer Prozesse durch Experimente an einem digitalen Modell. Dabei können verschiedene Varianten untersucht werden, um den realen Prozessablauf zu verbessern. Voraussetzung zur Simulation ist die realitätsnahe Abbildung des zu untersuchenden Arbeitssystems in einem ablauffähigen Modell.

Um die Simulation im Bauwesen erfolgreich einsetzen zu können, muss der Prozess der Modellbildung und die Datenerfassung vereinfacht werden, damit der Arbeitsvorbereiter einer Baufirma bzw. die Bauleiter auf der Baustelle die Vorteile einer dem realen Prozess vorgeschalteten Analyse nutzen können. Da sich die CAD zur Planung von Bauprojekten im Bauwesen seit Jahren etabliert hat, sollte auch bei der Modellierung auf diese weit verbreitete Planungsmethode zurückgegriffen werden. Ferner sollten alle bereits vorhandenen und für die Simulation erforderlichen Daten ohne nochmalige Eingabe zur Modellbildung zur Verfügung gestellt werden. Hierzu können die in den vergangenen Jahren entwickelten Produktmodelle, die dazu beitragen sollen, alle projektrelevanten Daten über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks einheitlich und zentral zu archivieren, in den Modellierungsprozess integriert werden.

Die vorliegende Arbeit stellt eine Verknüpfung her zwischen den bekannten Strukturen eines Produktmodells, einem CAD-System und einer Petri-Netz-basierten Simulationsentwicklungsumgebung. Damit wird erstmals im Bauwesen ein integriertes simulationsrelevantes Produktmodell entwickelt und zum Nachweis der Machbarkeit für Prozesse im Erdbau ein dialogorientiertes Simulationstool in ein CAD-System implementiert. Zum Beweis der Funktionalität werden abschließend Experimente auf Basis einer konkreten Baumaßnahme durchgeführt.

Kern der Arbeit ist die Fragestellung: Welche Strukturen müsste ein simulationsrelevantes Produktmodell haben, dessen Daten in ein CAD-System integriert werden sollen und das zur Simulation mittels einer Petri-Netz-basierten Simulationsentwicklungsumgebung eingesetzt werden kann? Der exemplarische Einsatz bei Erdbauprozessen im Straßenbau wurde deswegen verwendet, weil diese Prozesse besonders geräteintensiv sind und logistische

Sachverhalte enthalten, die im Zuge der Simulation besonders gut verbessert werden können. Im Prinzip sind jedoch die Ergebnisse dieser Arbeit auch auf alle anderen Prozesse im Bauwesen übertragbar.

Die Arbeit ist entstanden im Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel und wurde betreut durch Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Franz vom Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren. Zweite Betreuerin war Frau Prof. Dr.-Ing. S. Wenzel vom Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Produktionsorganisation und Fabrikplanung. Der Autorin, Frau Dr.-Ing. R. Chahrour, sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt für ihre sehr ausführliche und akribisch recherchierte Arbeit, ihren Einsatz in den vergangenen sechs Jahren in verschiedenen Forschungsprojekten und ihre besonders erfolgreiche Mitarbeit im Institut.

Kassel, im Februar 2007

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz
(Direktor des IBW)

Vorwort der Verfasserin

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren am Institut für Bauwirtschaft (IBW) der Universität Kassel.

Die Arbeit behandelt die Entwicklung eines Ansatzes zur Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Dieser Ansatz wurde außerdem in Form eines Software-Tools implementiert und an einem realen Projekt evaluiert.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof.-Dr.-Ing. V. Franz für die Betreuung und die vielseitige Unterstützung meiner Arbeit sowie für die Übernahme des Referates im Promotionsverfahren. Frau Prof. Dr.-Ing. S. Wenzel danke ich für ihre konstruktive Kritik, die zur Steigerung der Arbeitsqualität beigetragen hat, sowie für die Übernahme des Koreferates. Für ihre Mitwirkung in der Promotionskommission bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Racky und Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Bargstädt. Auch Herrn Prof. D.W. Halpin, Ph.D. und Herrn Prof. S.M. AbouRizk, Ph.D. möchte ich meinen herzlichen Dank für ihre Begutachtung der Arbeit aussprechen.

Die erfolgreiche Implementierung des entwickelten Ansatzes ist auf das große Engagement von Herrn Martin Kugler und die tatkräftige Unterstützung von Herrn Ralph Meyer zurückzuführen. Auch allen anderen Mitarbeitern des Institutes danke ich für ihre Hilfsbereitschaft und die vielen anregenden Diskussionen. Für die Mithilfe bei der Korrektur und der Schlusslesung der Arbeit danke ich Herrn Dr.-Ing. Jens Utsch und Frau Rita Schröder ganz herzlich. Bei Frau Christiane Heiss möchte ich mich für die Korrektur der im Rahmen dieser Arbeit veröffentlichten englischen Texte ebenfalls bedanken.

Für die Förderung dieser Arbeit sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem syrischen Hochschulministerium gedankt.

Nicht zuletzt möchte ich bei meinem Mann und meinem Sohn für ihre Motivation und Unterstützung und bei den Eltern in der Heimat für ihren Rückhalt und Beistand bedanken.

Racha Chahrour

**Bewertung der Arbeit durch Herrn Daniel W. Halpin¹, Ph.D., Hon. M.
ASCE und Herrn Simaan M. AbouRizk², Ph.D., P.Eng.**

**Comments
For
Dr.-Ing. Dissertation
Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produkt Modellen im Erdbau
Presented by
Dipl.-Ing. Racha Chahrour**

INTRODUCTION

This work addresses the application of simulation methods in a CAD supported environment to analyze earthwork operations at the process level. The author has been able to exploit the repetitive nature of earthwork operations at the process level to create a user friendly prototype for use by construction managers. The well understood “cut, fill, select fill and waste” nature of earthwork operation provides a framework for this development. This builds on concepts typical of all earthwork processes in which cut and fill must be balanced and optimization attempts to minimize haul distance and haul truck cycle times. This leads to higher productivity at lower cost. Simulation offers an improved level of accuracy when evaluating both travel and cycle times.

LITERATURE

An excellent literature review is presented which chronicles progress in the area of simulation applied to construction problems over the past 30 years. The survey identifies those systems which have been developed recently to utilize a building block (Baustein) approach in developing stylized systems to analyze particular construction operations. Considerable work on this direction has been done by Abourizk et. al. at the U. of Alberta in Canada. In addition, the work attempting to integrate CAD with simulation systems is

¹ **Daniel W. Halpin** ist ein emeritierter Professor an der Purdue Universität, Construction Engineering and Management, West Lafayette, Indiana, USA

² **Simaan M. AbouRizk** ist ein Professor an der Alberta Universität, Construction Engineering and Management, Kanad

discussed in detail. The work by Mather and Abourizk is particularly of interest to this thesis which deals with CAD simulation integration.

DISCUSSION

The proposed system utilizes network concepts which have been graphically integrated on to a 2D representation of the work site. This has the effect of establishing a user friendly and familiar context for practitioners in the field. As presented, use of simulation allows a refinement of the IST analysis.

The job site is characterized by a data structure which plays the role of “product model” representation of the work site. Excavation (cut), fill as well as select fill and material storage areas are modeled in a flow network context. PACE, a Petri network environment, is used to perform simulation of haul truck loading, travel, and placement at the work site. The author correctly notes that product models in construction tend to be complex and typically do not provide data required for simulation at the operational level.

“Diese zunehmende Komplexität macht das Modell unwirtschaftlich und stellt somit das ganze Verfahren in Frage...” (Kapitel 4, p. 50).

In addition, the transfer of data and data compatibility between CAD, simulation system and product model presents a major challenge. Since existing product modeling environments (e. g. OKSTRA, etc.) do not provide the data support from simulation, the author proposes the development of an SRM which augments the data available from product models and is viewed as “ein Teilproduktmodell”.

As described in the thesis, simulation allows comparison of a simulated system with the IST layout of the work as well as the examination of variations of the original plan. A prototype is designed and validated in the context of an actual project (apportion of a linear earthwork project in the Ilmenau vicinity between Ebensfeld and Erfurt). This work site consists of 6 major “cut” areas and 9 “fill” areas. Site information for this project was available in a Diplomarbeit prepared by Szopa. Data for modeling load and transport times were collected using a PDA. The simulation times were generated using Beta functions representing actual field data.

Comparison of simulated versus observed performance indicated an actual project duration of 4191 hours versus a simulated duration of 3440 hours based on 9 hour days of which one hour was allocated to break or personal time. One simplification which was

adopted was the use of constant load factor of 0.75 for all excavation. (Of course, actual materials would have varying load factors leading to varying loose volume amounts during loading and hauling activities). This does not seem to have impacted the results of the simulation in a significant way.

One variation of the original process used on the project was modeled to reflect the ability of this approach to analyze varying options or alternatives. In the original process 3 types of loaders (CAT 375, 345 and 325) were used to achieve the results noted above. The “variant” model utilized only 2 large loaders (CAT 375) supported by 7 Mercedes 4146 haulers. The alternative resulted in a total project time of 3457 (similar to the simulation of the original system). However, the number of loading cycles and the mileage traveled was significantly reduced. This reflects the capability of the prototype system to consider different alternatives and seek improved performance and production.

CONTRIBUTION

This is an impressive thesis and develops a prototypical simulation system (SRM) which uses product modeling concepts as a data structure and has been able to integrate flow modeling and simulation concepts with CAD representations of the work site. This work provides a system design approach which can be adapted to utilize the improved accuracy and “what-if” analysis characteristics of simulation to a wide range of earthwork and heavy construction projects. The work establishes a “proof of concept” which can form the basis for a practice oriented tool for use by field engineers.

Dipl.-Ing. Chahrour has developed an interesting insight which exploits the application of parameterization to a basic construction process, earthmoving, to achieve access to the power of quantitative analysis in the context of simulation. Since the basic aspects of excavation, transport, and placement can be modeled in a fairly simplistic network as discussed in Chapter 5 (figure 5.5, etc.), this basic context can be adapted through the use of parameters to a wide variety of real-world situations. Moreover, this graphical modeling can be linked to CAD representations of the physical topography of the site to reflect to the user a very clear idea of the analysis being used. This interface supports the logical nature of the analysis which is complex, but does not burden the user with anything beyond defining the parameters to be used.

CONCLUSIONS

This work is both theoretically sound as well as attractive from the point of view that it can be readily adapted to actual real-world projects. In my opinion, it constitutes a unique and significant contribution to the body of work related to construction simulation.

*Daniel W. Halpin, Ph.D., Hon. M. ASCE
W. Lafayette, IN, USA
18 December 2006*

*Simaan M. AbouRizk, Ph.D.
Alberta, Kanada
18 December 2006*

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Hintergründe.....	2
1.2.1	Einschränkungen der Methoden zur Analyse von Erdbauprozessen	2
1.2.2	Einschränkungen der Modellbildungsmethoden	3
1.2.3	Das Potenzial der produktmodellbasierten Integration	5
1.3	Konkretisierung der Zielsetzung	6
1.4	Abgrenzung der Forschungsarbeit.....	7
1.5	Arbeitsumfang und Methodik.....	8
1.6	Aufbau/Struktur der Arbeit.....	9
2	Stand der Forschung	11
2.1	Der Erdbau in Literatur und Praxis	11
2.2	Simulationstechnik im Baubetrieb	13
2.2.1	Einleitung zur Simulation.....	13
2.2.2	Entwicklungstrends in der baubetrieblichen Simulation.....	15
2.2.3	Baubetriebliche Simulation in Deutschland	20
2.3	Integration der Simulation mit CAD und Visualisierungstools	27
2.3.1	Integration von CAD mit anderen Systemen.....	27
2.3.2	Allgemeine Integrationsformen.....	28

2.3.3	Integrationsansätze der CAD-Systeme mit Simulation	29
2.4	Definition des Forschungsbedarfs	32
3	Konzept der produktmodellbasierten Integration	34
3.1	Lösungsarchitektur	34
3.2	Forschungsrichtungen.....	36
3.2.1	Konzipierung der Forschungsrichtungen	36
3.2.2	Petri-Netz-basierte Simulation von Erdbauprozessen auf Straßenbaustellen	36
3.2.3	Produktmodellbasierte Integration	38
3.3	Implementierung.....	39
4	Das simulationsrelevante Produktmodell	41
4.1	Einheitliche Datenstruktur als Ausgangspunkt und Ziel	41
4.2	Untersuchung vorhandener Schnittstellen und Produktmodelle	43
4.2.1	Schnittstellen für den Straßenbau.....	43
4.2.2	Produktmodelle für den Hochbau.....	46
4.2.3	Produktmodelle für den Straßenbau	47
4.2.4	Paradigmen der Produktmodelle	50
4.3	Argumentation der Entwicklung eines simulationsrelevanten Produktmodells..	51
4.4	Beschreibung des simulationsrelevanten Produktmodells SRM.....	54
4.4.1	Architektur des SRM.....	54
4.4.2	Klassendiagramm des SRM.....	55

4.4.3	Umsetzung des SRM in ein XML-Schema	59
4.5	Anbindungsmöglichkeiten an OKSTRA	60
4.6	Zusammenfassung	65
5	Aufbau des Petri-Netz-basierten Simulationssystems.....	66
5.1	Die Modellierungsumgebung	66
5.2	Zeitmodellierung und Stochastik.....	68
5.2.1	Grundlagen der Zeitmodellierung	68
5.2.2	Statistische Eigenschaften der Prozessdauern im Erdbau	70
5.2.3	Bestimmung der Verteilungsfunktionen ausgehend von Erfahrungswerten.....	74
5.3	Das Modellierungskonzept.....	76
5.4	Nahtlose Datenmodellierung	78
5.4.1	Datenmodellierung auf der Systemebene	78
5.4.2	Datenmodellierung auf der Simulationsebene.....	79
5.5	Modellierung des Schnittstellenmoduls	81
5.5.1	Konzeption der Anbindung in der Simulationsumgebung	82
5.5.2	Der ‚XMLManager‘	85
5.6	Modellierung des Systems.....	88
5.6.1	Festlegung der Modellelemente und der Systemgrenzen.....	88
5.6.2	Festlegung der Aufbaustruktur des Systems	90
5.6.3	Festlegung der Ablaufstruktur des Systems	92

5.6.4	Beschreibung der Netzhierarchien	96
5.7	Ergebniserfassung und Ergebnisdarstellung.....	106
5.7.1	Erfassung der Ergebnisse	106
5.7.2	Darstellung und Visualisierung der Ergebnisse	108
5.8	Zusammenfassung	114
6	Prototypische Implementierung.....	115
6.1	Hintergründe.....	115
6.2	Erweiterung der CAD-Umgebung.....	116
6.3	Erweiterungsarchitektur	118
6.4	Beschreibung einiger Benutzeroberflächen.....	122
6.4.1	Menügruppen ‚Baustellenstruktur‘ und ‚Maschinen / Material‘	122
6.4.2	Menügruppe ‚Ablaufplanung‘ / ‚Ausführungsplanung‘	126
6.4.3	Menügruppe ‚Ablaufplanung‘ / ‚Terminplanung‘	132
6.5	Zusammenfassung und Auswertung.....	133
7	Systemevaluierung und Anwendung	134
7.1	Einsatzgebiete und Evaluierungsschritte.....	134
7.2	Beschreibung des Realprojektes.....	136
7.3	Aufbereitung der Inputdaten.....	137
7.3.1	Datensammlung	137
7.3.2	Datenanalyse.....	141

7.3.3	Datenaufbereitung	143
7.4	Einsatzanalyse auf Prozessebene.....	146
7.5	Simulation des Ist-Zustandes.....	151
7.6	Simulation einer weiteren Ausführungsvariante	156
7.7	Zusammenfassung	158
8	Zusammenfassung und Ausblick	159
8.1	Fazit	159
8.2	Beiträge zur Forschung.....	160
8.2.1	Beiträge zur Anwendung von Petri-Netzen im Baubetrieb.....	161
8.2.2	Beiträge zur Integration von CAD und Simulation.....	162
8.3	Ausblick und künftige Forschungsaktivitäten	163

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AA	Anfang-Anfang- Beziehungen
AEC/FM	Architecture, Engineering, Construction und Facility Management
AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
API	Application Programming Interface
AVA	Ausschreibung, Vergabe, Abrechnung
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
CAD	Computer Aided Design
CAT	Caterpillar
CPM	Critical Path Method
CTE	Clear Text Encoding
DCV	Dynamic Construction Visualizer
DES	Discrete Event Simulation
DLL	Dynamic Link Library
DOM	Document Object Model
DWG	Drawing
DXF	Drawing EXchange Format
EA	Ende-Anfang -Beziehungen
FGSV	ForschungsGesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
FIFO	First In First Out
FPC	Fleet Production & Cost Analysis
GAEB	Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen
GIS	Geographischen InformationsSystemen
GPM	Geometry-based Process Model

GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
IAI	International Alliance for Interoperability
IFC	Industry Foundation Classes
KS-Test	Kolmogorov-Smirnov-Test
MS	Microsoft
NIAM	Nijssen Information Analysis Method
OKSTRA	Objekt Katalog für das STRaßen- und Verkehrswesen
PDA	Personal Digital Assistant
PrT	Prädikat-Transition-Netze
PSE	Product-oriented Simulation Environment
REB	Regelungen für die Elektronische Bauabrechnung
SAE	Society of Automotive Engineers
SDX	Simulation Data eXchange
SGML	Generalized Markup Language
SPS	Special Purpose Simulation
SRM	SimulationsRelevantes ProduktModell
STEP	STandard for the Exchange of Product model data
UML	Unified Modeling Language
VBA	Visual Basic for Application
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
W3C	World Wide Web Consortium
XML	eXtensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abbildung 1.1: Schritte einer Simulationsstudie (Franz 1999)</i>	4
<i>Abbildung 1.2: Umfang und Methodik der Forschungsarbeit</i>	9
<i>Abbildung 2.1: Prozesse im Erdbau</i>	12
<i>Abbildung 2.2: Entwicklungstrends in der baubetrieblichen Simulationsforschung</i>	15
<i>Abbildung 2.3: Ausschnitt aus einem CYCLONE Beispielmodell und Netzkomponente (Halpin und Woodhead 1998 S. 190)</i>	16
<i>Abbildung 2.4: Hauptelemente eines Petri-Netzes</i>	21
<i>Abbildung 2.5: Einbau einer Ortbetondecke (Franz 1989)</i>	23
<i>Abbildung 2.6: Kopfbaggerung, Seitenbaggerung, V & I Laderbetrieb</i>	25
<i>Abbildung 2.7: Baggermodell (Franz und Chahrour 2002)</i>	26
<i>Abbildung 3.1: Lösungsarchitektur zur produktmodellbasierten Integration von CAD und Simulation</i>	35
<i>Abbildung 3.2: Implementierung, inklusive Eingangs-, Ausgangsdaten und Anforderungen (Chahrour und Franz 2006 b)</i>	39
<i>Abbildung 4.1 : Beitrag der Simulation zur Zielerreichung der Managementsysteme (Chahrour et al. 2005)</i>	42
<i>Abbildung 4.2: Planungsablauf im Straßenwesen (ähnlich OKSTRA 2003)</i>	44
<i>Abbildung 4.3: Die Schemata des OKSTRA (OKSTRA 2006)</i>	49
<i>Abbildung 4.5: Das Klassendiagramm des SRM</i>	58
<i>Abbildung 4.6: XSD-Schema und XML-Dokument des SRM</i>	59
<i>Abbildung 4.7: Anbindungsstellen des SRM an OKSTRA</i>	61

<i>Abbildung 4.8: Anbindung des SRM an OKSTRA-REB 21.013 (Hinzer, Feser 2005, ergänzt durch simulationsrelevante Klassen)</i>	64
<i>Abbildung 5.1: Beispiel für Inskriptionen einer Transition</i>	68
<i>Abbildung 5.2: Ereignisorientierte Zeitführung</i>	68
<i>Abbildung 5.3: (Θ_1- Θ_2) Diagramm (AbouRizk et al. 1992)</i>	72
<i>Abbildung 5.4: Dichtefunktionen der Beta-Verteilung (Law und Kelton 2000 S. 309)</i>	74
<i>Abbildung 5.5: Die oberste Hierarchie der Erdbaustelle in PACE</i>	77
<i>Abbildung 5.6: Modellierungsmethodologie in den Netzhierarchien</i>	80
<i>Abbildung 5.7: Das Anbindungskonzept</i>	83
<i>Abbildung 5.8: Pseudocode für den ‚Datenmanager‘</i>	83
<i>Abbildung 5.9: Das Anbindungskonzept am Beispiel ‚Damm‘</i>	84
<i>Abbildung 5.10: Datentransfer vom SRM zum Simulationssystem - der erste Schritt</i>	85
<i>Abbildung 5.11: Datentransfer vom SRM zum Simulationssystem – der zweite Schritt</i> ...	86
<i>Abbildung 5.12: Datentransfer vom SRM zum Simulationssystem – XML-Elemente</i>	87
<i>Abbildung 5.13: Die Aufbaustruktur des Simulationssystems als ein Flussdiagramm</i>	91
<i>Abbildung 5.14: Makro- und Mikroablaufabschnitte (REFA 1984 S. 58)</i>	93
<i>Abbildung 5.15: Pseudocode für die Initialisierung von Erdkörpermarken</i>	98
<i>Abbildung 5.16: Die unterste Hierarchie im Modul ‚Einschnitte‘</i>	101
<i>Abbildung 5.17: Das Modul ‚Fördern‘</i>	102
<i>Abbildung 5.18: Verteilungsmöglichkeiten der Lkw in dem Modul ‚Fördern‘</i>	103
<i>Abbildung 5.19: Das Modul ‚Hinfahrt‘</i>	105

<i>Abbildung 5.20:</i> Das Modul ‚Rückfahrt‘	105
<i>Abbildung 5.21:</i> Relevanz der Visualisierung in Bezug auf Zielgruppen und Einsatzfelder, (VDI 3633, Blatt 11)	108
<i>Abbildung 5.22:</i> Visualisierung der obersten Hierarchieebene mit vollen (oben) und leeren (unten) Lkw	110
<i>Abbildung 5.23:</i> Das Monitoringszenario ‚Hauptmodell‘	112
<i>Abbildung 5.24:</i> Das Monitoringszenario ‚Logistik‘	113
<i>Abbildung 6.1:</i> Struktur des zusätzlichen Menüs ‚Simulation‘ in AutoCAD	119
<i>Abbildung 6.2:</i> Ablaufplan des entwickelten Programms nach DIN 66001	121
<i>Abbildung 6.3:</i> Das Formular zur Eingabe der vorhandenen Bagger.....	124
<i>Abbildung 6.4:</i> Das Formular zur Eingabe der vorhandenen Förderwege	125
<i>Abbildung 6.5:</i> Das Wizard ‚Ausführungsplanung / Ablaufabschnitte‘	127
<i>Abbildung 6.6:</i> Das Wizard ‚Ausführungsplanung / Musterquerprofil‘	128
<i>Abbildung 6.7:</i> Das Wizard ‚Ausführungsplanung / Wechselebenen‘	129
<i>Abbildung 6.8:</i> Das Wizard ‚Ausführungsplanung / Erdkörper‘	130
<i>Abbildung 6.9:</i> Das Wizard ‚Ausführungsplanung / Mengenberechnung‘	131
<i>Abbildung 6.10:</i> Automatische Integration der Daten in die Terminplanung	132
<i>Abbildung 7.1:</i> Längsprofilskizze (Szopa 2006)	137
<i>Abbildung 7.2:</i> Beispiel zur Ansicht eines Einschnittes mit Übersichtsskizze	138
<i>Abbildung 7.3:</i> Übersichtsskizzen zur seitlichen Beladung und zur Beladung vom Heck	140
<i>Abbildung 7.4:</i> Zeitaufnahmeprogramm auf PDA und Datenübernahme im PC	142

<i>Abbildung 7.5:</i> Das Dialog zur Wahl einer passenden theoretischen Verteilungsfunktion (Dai 2006).....	143
<i>Abbildung 7.6:</i> (Θ_1 - Θ_2) Plan für Spielzeiten des Baggers CAT 345	144
<i>Abbildung 7.7:</i> Dichtefunktionen der Beta-Verteilung im Vergleich zu den beobachteten Spielzeiten des Baggers CAT 345	145
<i>Abbildung 7.8:</i> (Θ_1 - Θ_2) Plan für Transportzeiten der Lkw	146
<i>Abbildung 7.9:</i> Der betrachtete Erdkörper aus Abschnitt 2 des Einschnitts 1	147
<i>Abbildung 7.10:</i> Mögliche Förderwege zum Bodentransport von E1	148
<i>Abbildung 7.11:</i> Leistung des Baggers CAT 345, in Abhängigkeit von der Anzahl der Lkw bei zwei alternativen Förderwegen.....	150
<i>Abbildung 7.12:</i> Wartezeiten des Baggers CAT 345 und der Lkw, in Abhängigkeit von der Anzahl der Lkw bei zwei alternativen Förderwegen.....	151
<i>Abbildung 7.13:</i> Matrix der transportierten m^3 als Ergebnis der Simulation des Ist-Zustandes.....	154
<i>Abbildung 7.14:</i> Matrix der gefahrenen einfachen Kilometer als Ergebnis der Simulation des Ist-Zustandes	155
<i>Abbildung 7.15:</i> Leistung und Auslastung der eingesetzten Bagger im Ist-Zustand	155
<i>Abbildung 7.16:</i> Leistung und Auslastung der eingesetzten Bagger in der weiteren Variante	156
<i>Abbildung 7.17:</i> Matrix der transportierten m^3 als Ergebnis der Simulation	157

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4.1: REB/GAEB Mengenberechnungsmethoden nach der Profilmethode	62
Tabelle 4.2: NIAM-Symbole	63
Tabelle 5.1: Parallelität der Daten	79
Tabelle 5.2: Betriebsmittel-Collection am Beispiel des Baggers	81
Tabelle 5.3: Bearbeitungsregeln des Simulationssystems	95
Tabelle 6.1: Erforderliche Eingaben der Gruppen ‚Baustellenstruktur‘ und ‚Maschinen/Material‘	123
Tabelle 7.1: Vorhandene Bagger mit ihren Eigenschaften	139
Tabelle 7.2: Vorhandene Transportfahrzeuge mit ihren Eigenschaften	140
Tabelle 7.3: Taktzeitverteilungen der eingesetzten Bagger	145
Tabelle 7.4: Eigenschaften der eingegebenen Förderwegabschnitte	149
Tabelle 7.5: Entfernungsmatrix in [m] (Szopa 2006 S. 89)	153

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Die Integration von Computer-Aided Design Systemen und Simulation ist eine neue Technologie, die die Etablierung der Simulation in der Bauwirtschaft beschleunigen wird. Die Ziele der Integration sind einerseits die Steigerung der Effizienz, die durch eine einmalige Eingabe der Daten erfüllt wird. Andererseits bietet die CAD-Umgebung eine für den Ingenieur bekannte, anwenderfreundliche Umgebung an, die die Einführung der Simulation in die baubetriebliche Praxis erleichtern kann. Die Integration muss sich dabei an die Entwicklungen der Datenaustauschmethoden orientieren. In diesem Bereich haben sich in den letzten Jahren die Produktmodelle etabliert. Ein wichtiges Ziel der Produktmodellierung ist die Unterstützung der Kooperation verschiedener am Bau beteiligter Fachplaner, indem unterschiedliche Sichtweisen des Produktes bzw. des Projektes in dem Modell erkennbar werden. Daher umfasst das Produktmodell neben der Geometrie, die meist aus CAD extrahiert wird, zusätzliche inhaltliche Daten zu den einzelnen Elementen eines Produktes.

CAD-Systeme zählen zu den wichtigsten Systemen, die bei der Planung von Bauwerken verbreitet zum Einsatz kommen. Nahe zu alle Bauwerke werden entweder in einem CAD-System, wie AutoCAD oder Microstation oder in einem darauf basierenden System, wie Allplan, Civil3D usw. als 2D- bzw. 3D-Modell abgebildet. Leider kann eine ähnlich intensive Nutzung der CAD-Systeme in der Ausführungsphase nicht beobachtet werden. Die in dieser Phase eingesetzten Computersysteme zur Kalkulation, Terminplanung usw. nutzen die in dem CAD-Modell gespeicherten Daten nur eingeschränkt. Die Entwicklung der Produktmodelle kann auch in der Ausführungsphase zu einem besseren Datenaustausch führen sofern die mit dem Baufortschritt aktualisierten Baustellendaten allen Projektbeteiligten zugänglich werden. Die Simulation kann von dieser Entwicklung profitieren, vorausgesetzt, die für sie notwendigen Daten werden in das Produktmodell integriert. Dies geschieht, in dem die Integration von CAD und Simulation auf produktmodellbasierter Grundlage realisiert wird.

Die Vorteile der Simulation bei dem Entscheidungsfindungsprozess können insbesondere bei den Erdbauarbeiten zur Geltung kommen, da bei diesen Prozessen schwere Leistungs-

maschinen zum Einsatz kommen, deren Wirtschaftlichkeit und Effektivität mittels der Simulation gut nachgebildet werden können. Dies erklärt, warum die meisten neuen Ansätze in der Simulation zuerst an diesen Prozessen prototypisch entwickelt werden. Des Weiteren stellt die geometrische Zerlegung des Produktes im Erdbau, hier des Bodens, eine besondere Herausforderung dar im Vergleich zu dem Produkt im Hochbau, das aus homogenen und fest dimensionierten Produktelementen, also Wandelementen, Betonteilen, Ausbaumaterialien etc. besteht. Der Erdbau bei Straßenbauprojekten ist zudem auf mehrere Stellen verteilt und stellt somit eine zusätzliche logistische Aufgabe, zu deren Lösung das CAD-Layout hilfreich sein kann. Der komplexe Aufbau einer Erdbaustelle, mit deren veränderten Randbedingungen und Layouteigenschaften, kann am besten in einem Produktmodell, u. a. für die Simulation, abgebildet werden. Nur so können CAD-Daten mit dem Baufortschritt in einer neutralen Umgebung erfasst und dokumentiert werden.

1.2 Hintergründe

1.2.1 Einschränkungen der Methoden zur Analyse von Erdbauprozessen

Insbesondere bei Erdbauprozessen der Straßenbauprojekte können die Besonderheiten der Bauprozesse, wie Dynamik, Unvorhersehbarkeit und Komplexität, beobachtet werden. Mit fortschreitender Zeit ändern sich viele Zustände auf einer Straßenbaustelle, wie Topographie, Transportwege, Geometrie, Betriebsmittelverfügbarkeit, Randbedingungen etc. Diese Dynamik kann durch eine analytische Modellierung nicht erfasst werden. Erdbauprozesse werden als untransparent und unvorhersehbar aus dem Grund bezeichnet, weil sie einer Vielzahl von Einflüssen und Störungen, wie Umweltbedingungen, Bodenverhältnisse, öffentliche Konflikte etc., unterliegen. Ohne Einsatz stochastischer Methoden ist die Modellierung dieser Einflüsse nur mit einer großen Anzahl vereinfachender Annahmen möglich. Dies alles erklärt die Komplexität zu einem kennzeichnenden Merkmal der Erdbauprozesse. Die vielen Parameter, die an jedem Prozess beteiligt sind, wirken aufeinander ein und beeinflussen sich gegenseitig in unterschiedlichem Maße und in Abhängigkeit von den gesetzten Zielen. Deshalb werden bei der Planung viele Vereinfachungen getroffen und nur unzureichend detaillierte Randbedingungen einbezogen. Die Folge ist, dass wichtige Entscheidungen allein den Polieren auf der Baustelle obliegen. Dies erhöht das Risiko ei-

ner falschen Entscheidung und ist gegenüber Auftraggebern, angesichts der heutigen technischen Möglichkeiten, nicht vertretbar.

Mit der Simulation ist es möglich, Erdbauprozesse stochastisch und dynamisch zu analysieren. Dabei können mehrere Szenarien über alle Projektphasen modelliert und die Folgen gewisser Entscheidungen quantitativ prognostiziert werden. In den letzten drei Jahrzehnten konnte in mehreren Forschungsarbeiten nachgewiesen werden, dass das Simulationskonzept erfolgreich zur Planung und Analyse von Bauprozessen eingesetzt werden kann. Dieser Erfolg blieb jedoch auf akademische Forschungsprojekte beschränkt und fand nur eingeschränkt Eingang in die Baupraxis. Gerade an den kosten- und maschinenintensiven Erdbewegungsprozessen rechtfertigt sich der Einsatz der Simulationstechnik in besonderem Maße. Ziel ist es dabei, die wirtschaftlichste Zusammenstellung von Erdbaumaschinen zu finden, die einen reibungslosen Betrieb mit höchstmöglicher Leistung und minimalen Kosten gewährleistet. Bei Linienbaustellen haben zudem die Transportkosten den größten Anteil an den Erdbaukosten (*Bauer 1994 S. 63*). Demnach sind minimale Förderweiten eine Grundvoraussetzung für eine wirtschaftliche Ausführung.

Die Simulation kann über die Planungs- und Ausführungsphase hinaus auch beispielsweise bei Leistungsstörungen die kooperative Konfliktbearbeitung unterstützen. So können die Vertragspartner schon in der Planungsphase die Simulation nutzen, um den geplanten Ablauf mit den vertraglich vorgegebenen Randbedingungen modellhaft abzubilden und zu visualisieren. Treten während der Ausführungsphase Änderungen auf, aus denen sich eventuelle zusätzliche Vergütungsansprüche für den Auftragnehmer herleiten, so können die Änderungen erfasst und die Auswirkungen durch die Ergebnisse der Simulation belegt werden. Die Simulation wird damit zu einem Instrument zur Ermittlung der Schadenskosten (*Chahrour et al. 2005*).

1.2.2 Einschränkungen der Modellbildungsmethoden

Der klassische Weg einer Simulationsstudie besteht, vereinfacht, aus einer Aufgabendefinition, Systemanalyse und Datenerfassung, Modellentwicklung und Modellvalidierung sowie aus der Experimentierphase und Ergebnisauswertung, siehe Abbildung 1.1.

Die im vorigen Abschnitt erörterte Komplexität der Bauprozesse im Allgemeinen und der Erdbauprozesse im Besonderen erfordern eine Reduzierung des Modellierungsaufwandes. Zum Beispiel müssen die Prozesse für jede Baustelle neu modelliert werden, weil Baustellen in der Regel unterschiedlichen Fertigungsbedingungen unterliegen. Außerdem zählt die Simulationstheorie nicht zum Standardlehrangebot der baubetrieblichen Ausbildung, so dass ein Bauingenieur entsprechendes Zusatzwissen haben müsste. Daher kommt der Vereinfachung der Vorgehensweise bei der Modellierung von Bauprozessen eine größere Bedeutung zu.

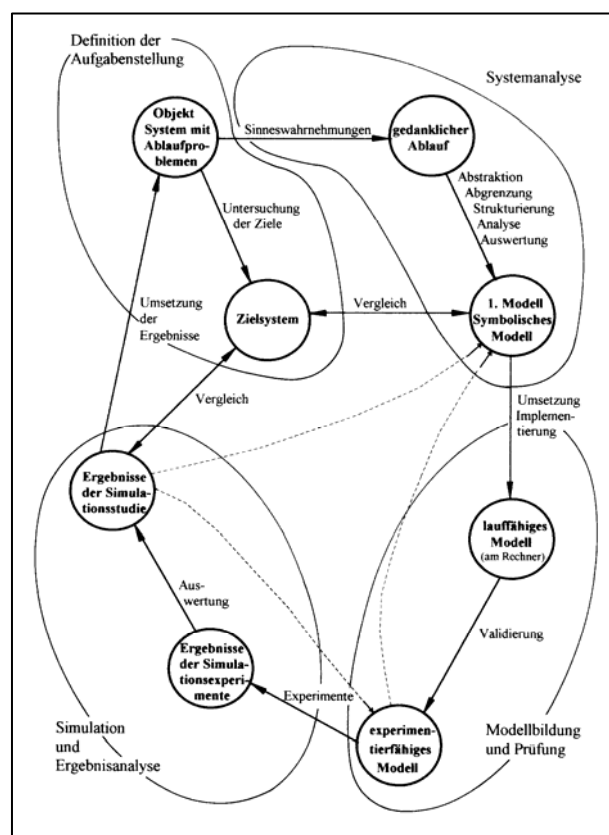


Abbildung 1.1: Schritte einer Simulationsstudie (Franz 1999)

Zum praktischen Einsatz der Simulation komplexer Systeme wurde die Modellierung in den letzten Jahren mit Hilfe hierarchischer, objektorientierter Techniken vereinfacht. Heute verfügen manche Simulationswerkzeuge über allgemeingültige, parametrisierbare Bausteine zur Modellierung sich wiederholender Prozesse. Die Bausteine können in einer Bibliothek erfasst werden, um sie jeder Zeit zur Anwendung bereit zu halten. Diese Simulati-

onswerkzeuge sind jedoch vornehmlich den Bedürfnissen der stationären Industrie angepasst (*Franz und Chahrour 2002*).

Auf Baustellen sind in der Vergangenheit Versuche unternommen worden, auf ähnliche Weise parametrisierbare Modulbausteine zu entwickeln, die zu einem Modell verbunden werden können. Diese Vorgehensweise konnte jedoch die Bandbreite und die Vielfalt der Baustellen nicht abdecken (*Hajjar und AbouRizk 1998*). Weitere Entwicklungen führten zu neuen Konzepten für die Vereinfachung der Modellierung durch Bereitstellung von grafischen, programmierten Modellierungselementen für unterschiedliche Anwendungsfelder, die zu einem Modell zusammengefügt und entsprechend parametrisiert werden können (*Hajjar und AbouRizk 2002*). Die Notwendigkeit von zusätzlichen Parametern zur Eingabe von Dimensionen oder layoutrelevanten Daten wächst mit der zunehmenden Komplexität der Simulationsmodelle (*Franz und Chahrour 2002*).

Bei den Simulatoren der stationären Industrie kann eine weitere Möglichkeit zur Modellbildung beobachtet werden, nämlich die layoutbasierte Modellierung. Aus CAD-Zeichnungen wird ein Basismodell gleichzeitig für die Simulation und Animation extrahiert. Dabei werden nur Layout-Daten entnommen, während alle anderen fertigungsablaufrelevanten Daten durch Parametrisierung vervollständigt werden. Diese Methode ist für Baustellen, deren Layout typischerweise in ständiger Veränderung ist, nicht geeignet. Außerdem enthalten CAD-Zeichnungen der Bauprojekte nicht alle Maschinen oder ablaufabhängigen Abbildungen und Daten.

1.2.3 Das Potenzial der produktmodellbasierten Integration

Eine realitätsnahe Abbildung der Bauprozesse mittels Simulation bedarf der Eingabe geometrischer Daten, die normalerweise in den CAD-Systemen gespeichert sind. Die Anbindung eines CAD-Systems an ein Simulationssystem erspart die zusätzliche Eingabe dieser Daten und ist daher sehr wirtschaftlich. Die Integration geht jedoch einen Schritt weiter und ermöglicht den Zugriff auf eine gemeinsame Datenbasis, die den integrierten Systemen bekannt ist. Das Produktmodell stellt diese Basis dar und enthält alle wesentlichen geometrischen, inhaltlichen und ablauftechnischen Informationen, die für die Simulation erforderlich sind. Das Potenzial und die Vorteile dieser Vorgehensweise sind sowohl im Kontext der Modellierung als auch des Datenaustausches erkennbar:

- Die Modellierung kann als eine Kombination von mehreren Konzepten erfolgen. So können geometrische Daten aus dem CAD-Layout extrahiert und weitere für die Parametrisierung des Simulationsmodells erforderliche Daten direkt in CAD eingegeben werden. Die CAD-Umgebung agiert auf diese Weise als eine graphische Oberfläche bzw. GUI (graphical user interface) zur Modellbildung, so dass der Anwender nur mit einer ihm bekannten Umgebung konfrontiert wird.
- Der Datenaustausch geschieht über eine neutrale Umgebung, also über das Produktmodell, deren Daten auch für andere Anwendungen zugänglich sein können. Dies fördert die interdisziplinäre Kommunikation über den gesamten Projektlebenszyklus. Die Simulation kann dann auch mit der Terminplanung oder mit der Kalkulation auf effektive Weise Daten austauschen und wird somit in das Managementgefüge integriert. Dies wiederum wird ihre Akzeptanz in der Praxis steigern.

Die Entwicklung eines Ansatzes zur produktmodellbasierten Integration von CAD und Simulation kann zu einer effizienten Einführung der Simulation zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in alle Projektphasen führen. Da der Einfluss auf die Kosten insbesondere in der Ausführungsphase in der Regel größer als in der Planungsphase ist, ist das Potenzial zur Kostenreduzierung höher. Deshalb sollen für diese Phase mehr Instrumente, wie CAD und Simulation, eingesetzt werden. Dabei ist die Bedeutung der Kommunikation besonders hervorzuheben, zu der die Simulation durch eine dynamische Abbildung des Ablaufes und die integrative Umgebung durch einen effizienten Datenaustausch beitragen können.

1.3 Konkretisierung der Zielsetzung

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Ansatzes zur produktmodellbasierten Integration von CAD und Simulation für Erdbauprozesse bei Straßenbauprojekten. Dabei können Aufbau- und Ablaufdaten mit ihren Randbedingungen in einem Produktmodell erfasst, dokumentiert und anderen Anwendungen zur Verfügung gestellt werden. Insbesondere Erdbauprozesse sind von ständigen Veränderungen des Layouts und der Randbedingungen mit dem Baufortschritt geprägt. Diese Veränderungen können in diesem Fall in einem Produktmodell dokumentiert und für die Eingabe in die Simulation bereitgestellt

werden. Die wesentlichen Teilziele, die zur Erreichung des Hauptziels dieser Arbeit führen, sind im Folgenden aufgeführt:

1. Untersuchung vorhandener Produktmodelle im Straßenbau auf ihre Relevanz zur Simulation und die Möglichkeit zur eventuellen Erweiterung um simulationsrelevante Daten.
2. Konzipierung einer objektorientierten, produktmodellbasierten Umgebung zur Integration von CAD und Simulation einschließlich der Erfassung der für die Simulation von Erdbauprozessen notwendigen Aufbau- und Ablaufdaten und der Formulierung dieser in einem aktuellen Austauschformat.
3. Aufbau eines spezifischen Simulationssystems für Erdbauprozesse im Straßenbau, das über das Produktmodell parametrisiert werden kann.
4. Integration des Produktmodells in ein CAD-System, das zur Extraktion und zur Eingabe von Simulationsdaten erweitert werden soll. Diese Daten werden automatisch in das Produktmodell gespeichert.
5. Prototypische Implementierung des konzipierten Ansatzes in ein lauffähiges, praxisorientiertes System.

1.4 Abgrenzung der Forschungsarbeit

Diese Forschungsarbeit konzentriert sich auf den Anwendungsbereich der Erdarbeiten bei Straßenbauprojekten, sowohl in der Planungs- als auch in der Ausführungsphase. Das Konzept lässt sich jedoch mit wenig Aufwand auf weitere Anwendungsbereiche, wie Straßendecken und auf Punktbaustellen, also Baugruben, anpassen. Auch für den Hochbau sind die Ergebnisse dieser Arbeit übertragbar.

Die Simulation beruht auf der Eingabe stochastischer Parameter, die jedoch reine Betriebszeiten repräsentieren. Mit anderen Worten: Störungen, Reparaturen, Pausen werden in dieser Arbeit nicht gesondert abgebildet. Ihre Wirkung kann jedoch durch eine größere Streuung der stochastischen Eingaben indirekt berücksichtigt werden.

Im Zuge der Simulation wird keine Optimierung der Eingangsparameter vorgenommen. Mit der Simulation ist lediglich die Auswirkung einer Entscheidung auf gewisse Zielgrößen quantifizierbar und dadurch besser abzuschätzen. Die Entscheidung selbst bleibt nach wie vor dem Entscheidungsträger überlassen. Er kann jedoch durch verschiedene Simulationsexperimente die Auswirkungen vorab prognostizieren.

1.5 Arbeitsumfang und Methodik

Der Umfang und die Methodik dieser Arbeit lassen sich aus den im vorigen Abschnitt formulierten Zielen herleiten, deren grobe Definition den Ausgangspunkt der Forschung darstellt. Die Konkretisierung der Zielsetzung bedingt eine fundierte Literaturrecherche, Untersuchungen auf Baustellen und Interviews mit erfahrenen Bauleitern und Polieren.

Wie aus der Abbildung 1.2 ersichtlich, ist die Literaturrecherche den ersten vier Arbeitsphasen vorgeschaltet. Sie erstreckt sich dabei auf mehrere forschungsrelevante Themengebiete. In erster Linie baut die Arbeit auf einer grundlegenden Untersuchung des Simulationsansatzes im Baubetrieb und den Integrationsformen von CAD und Simulation, auch in benachbarten Disziplinen, wie dem Maschinenbau, auf.

Empirische Untersuchungen auf Straßenbaustellen können umfassende Kenntnisse über Vorgehensweisen der Praxis liefern, wobei eine große Baustelle näher betrachtet werden soll, um als Anwendungsfall der späteren Evaluierung des entwickelten Systems zu dienen.

Die Entwicklung des Ansatzes geht von dem Produktmodell aus und das sowohl in Richtung CAD-Erweiterung (Daten- und Geometrieextraktion) als auch in Richtung Simulationssystem. Dafür sind Untersuchungen in unterschiedlichen Bereichen unabdingbar. Damit die Implementierungsform des Ansatzes bestimmt und die Integrationsform von CAD-Systemen beim Entwurf einer Straße erörtert werden können, werden vorhandene Straßenplanungssysteme untersucht. Die Schnittstellenproblematik zwischen CAD-Systemen leitet eine weitere Untersuchung ein, die sich auf Produktmodelle im Straßenbau hinsichtlich Datenrelevanz zur Simulation und eventueller Erweiterungsmöglichkeiten um diese Daten konzentriert.

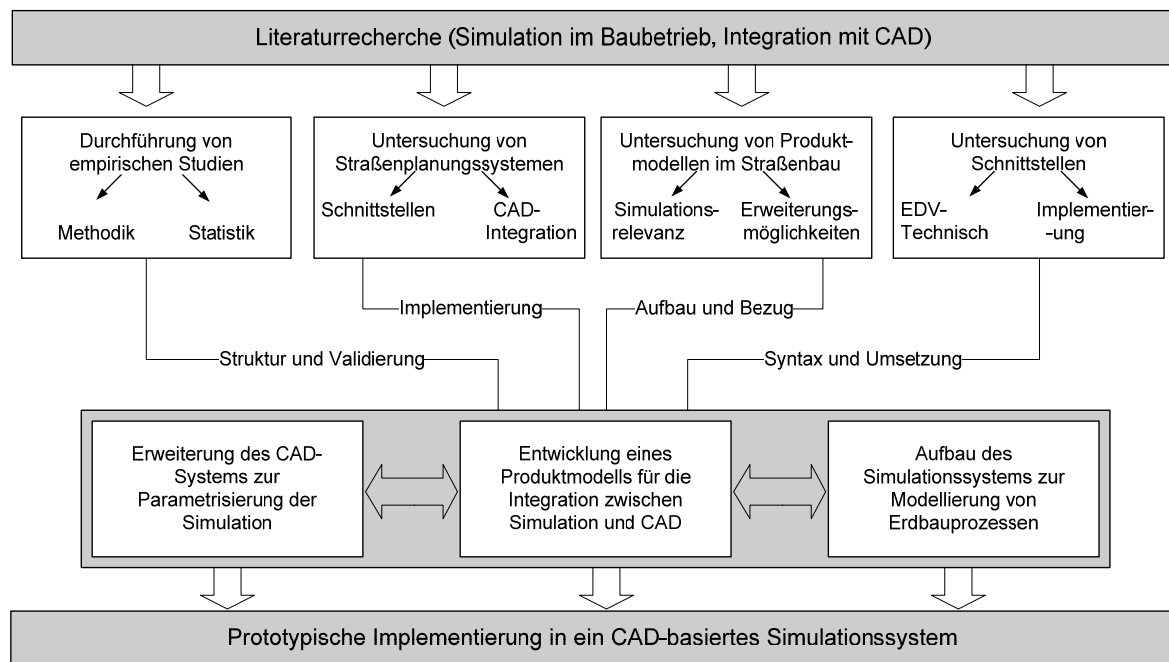


Abbildung 1.2: Umfang und Methodik der Forschungsarbeit

Ein Software-Prototyp soll die Vorteile des entwickelten Ansatzes zur produktmodellbasierten Integration zwischen CAD und Simulation aufzeigen. Der Anwender kann das Simulationsmodell durch einfache Parametrisierung über CAD aufbauen, anschließend einen Simulationslauf starten und einen Terminplan automatisch erstellen. Außerdem kann der Anwender einen Simulationslauf dynamisch betrachten und „What-if“-Szenarien über unterschiedliche Varianten mit veränderten Parametern (Förderwege, Mengenverteilung, Maschinendaten, Maschinenzusammenstellung, Randbedingungen etc.) durchführen.

1.6 Aufbau/Struktur der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in acht Abschnitte. Jeder Abschnitt wird mit einer gesonderten Zusammenfassung abgeschlossen. Der erste Abschnitt dient als Einleitung in die Thematik und gibt einen umfassenden Überblick über die Problemstellung, Zielsetzung und Lösungsmethodik. Die nachfolgenden Abschnitte gehen in die Tiefe und beschreiben bisherige Arbeiten, den theoretischen Ansatz, das Produktmodell, das Simulationssystem, die Implementierung und Anwendungsgebiete.

Abschnitt 2 beschreibt bisherige Arbeiten in den Bereichen der Simulation im Baubetrieb und der CAD-Integration in Bezug auf Theorie und Praxis.

Abschnitt 3 beinhaltet die Erläuterung des entwickelten theoretischen Ansatzes, der mittels Lösungsarchitektur, Forschungsrichtungen, Implementierungsschema verdeutlicht wird.

Abschnitt 4 stellt vorhandene Produktmodelle im Straßenbau vor und leitet den gesamten Ansatz mit dem entwickelten simulationsrelevanten Produktmodell ein.

Abschnitt 5 hat das entwickelte Simulationssystem mit seiner Konzeption und Aufbaumethodik zum Thema.

Abschnitt 6 erläutert die Implementierung des Ansatzes in ein praxisgerechtes Software-System.

Abschnitt 7 zeigt mögliche Anwendungsgebiete des entwickelten Systems anhand eines realen Anwendungsfalls auf, der gleichzeitig zur Evaluierung dient.

Abschnitt 8 fasst die wissenschaftlichen Aussagen dieser Arbeit zusammen und verdeutlicht deren Beiträge zur Forschung auf dem Gebiet der Simulation im Baubetrieb. Darauf aufbauend werden neue Forschungsperspektiven aufgezeigt.

2 Stand der Forschung

2.1 Der Erdbau in Literatur und Praxis

Kein anderer Bereich des Baubetriebes ist in so hohem Maße von der Erfahrung der Entscheidungsträger abhängig wie der Erdbau. Unerfahrene Ingenieure müssen häufig viele Fehlentscheidungen in Kauf nehmen, bis sie in der Lage sind, den gesamten Ablauf auf einer Erdbaustelle vorausschauend beurteilen zu können. Als Hilfsmittel werden in diesem Bereich diverse Formeln oder Nomogramme zur Leistungsberechnung angeboten, die jedoch ebenfalls auf erfahrungsbedingten Schätzwerten in Abhängigkeit von vielen Einflussfaktoren basieren (*Knaupe 1975; Kühn 1984; Hüster 1992; Bauer 1994; DIN ISO 9245 1995 und Girmscheid 2002*). Dabei wird immer die Leistung einer einzelnen Maschine unabhängig vom gesamten System gerechnet. Anschließend wird die Leistung aller eingesetzten Maschinen einer Arbeitskette aufeinander abgestimmt. Dies führt zu einer unrealistischen Planung, weil die Vorgänge und damit die Leistung der Maschinen im Erdbau stark voneinander und von vielen unvorhersehbaren und zufällig auftretenden Störfaktoren abhängen. Das ist der Grund, warum diese Leistungsformeln wenig Zustimmung in der Praxis finden und Entscheidungen oft intuitiv getroffen werden. Einige große Baumaschinenhersteller, wie Liebherr und Caterpillar, bieten die Einsatzanalyse als Dienstleistung an. Sie haben eigene Excel-Blätter entwickelt, in denen jedoch die in der Literatur bekannten Formeln enthalten sind. Caterpillar vertreibt ein Programm mit dem Namen FPC (Fleet Production & Cost Analysis), das auf ähnlicher Basis beruht und die Erdbauprozesse statisch und mit deterministischen Werten betrachtet.

Die Zusammenstellung der Arbeitskette, die Gewährleistung eines reibungslosen Ablaufes und das Erbringen der erforderlichen Leistung in wirtschaftlicher Weise und innerhalb der festgesetzten Zeit sind die wichtigsten Aufgaben des Bauleiters auf einer Erdbaustelle. Die Mengenverteilung mit kürzestmöglichen Transportwegen spielt dabei eine entscheidende Rolle. Eine analytische, exakte Lösung dieser Aufgabe ist auf Grund ihrer Komplexität und Intransparenz sehr schwierig, wenn nicht unmöglich. Vorhandene Optimierungsmethoden für die Mengenverteilung können vorliegende Randbedingungen nicht im gebotenen Maße berücksichtigen. Deshalb sollte der Erdbau am besten mit einer numerischen Methode, wie der Computersimulation, realitätsnah analysiert werden. Andere Verfahren zur Berücksichtigung der qualitativen Kriterien bei der Geräteauswahl, wie z.B. Nutzwertanalyse, sind in der Praxis

kaum bekannt. Lediglich ein kostenbasierter vereinfachter Verfahrensvergleich wird in einigen Unternehmen dann betrieben, wenn sich mehrere Gerätezusammenstellungen zur Durchführung einer Tätigkeit gleichermaßen eignen.

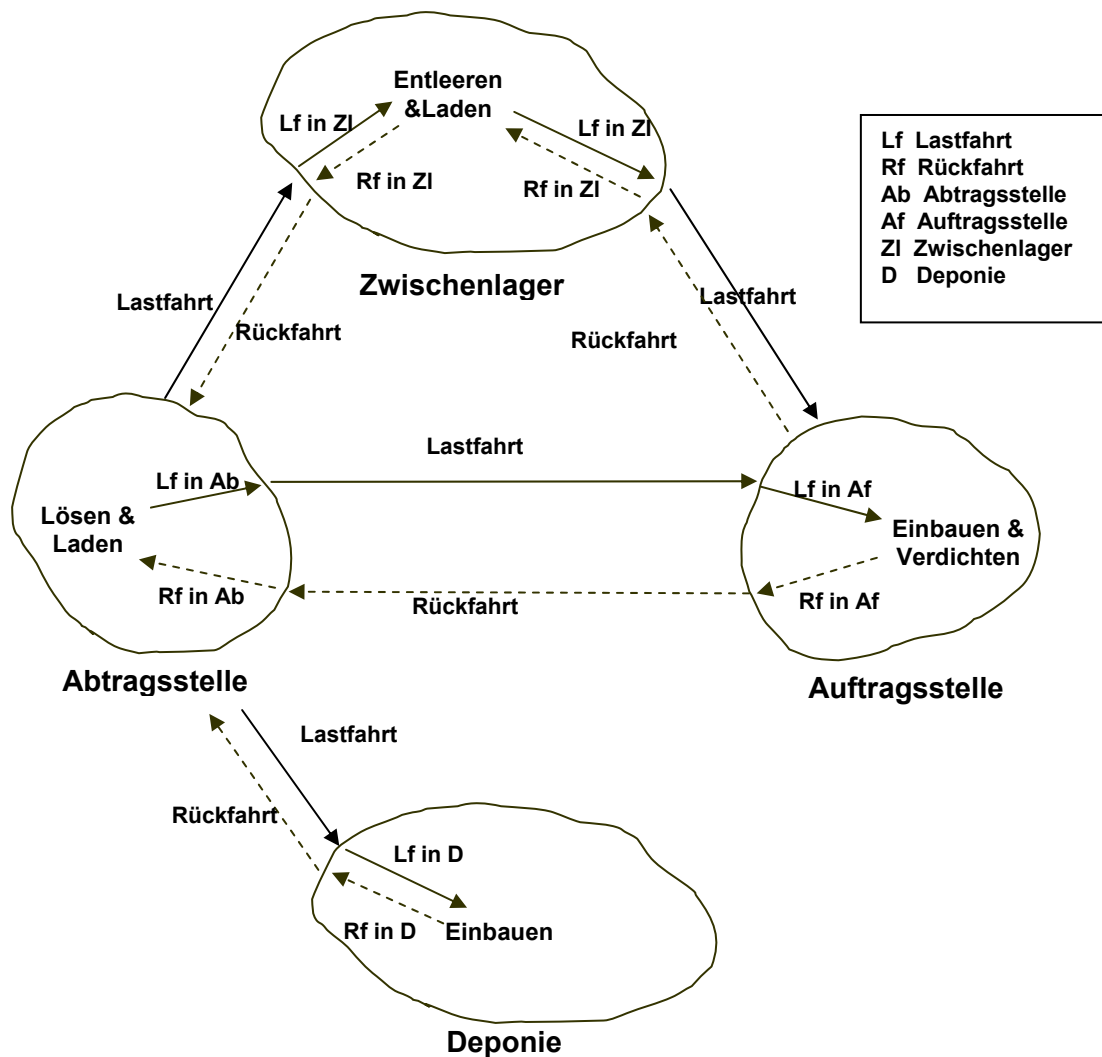


Abbildung 2.1: Prozesse im Erdbau

Der Stand der Technik in Bereich der Geräteplanung und Leistungsermittlung wurde anhand einschlägiger Literatur und mehrerer Gespräche mit erfahrenen Bauleitern recherchiert. Im Erdbau hat sich die Aufteilung der Erdbaustelle in mehrere Prozesse, wie in der Abbildung 2.1 dargestellt, bewährt (Bauer 1994). Eine Erdbaustelle besteht in der Regel aus mehreren Abtrags- und Auftragsstellen, auch Einschnitte und Dämme genannt. Zusätzlich kommen Zwischenlager und Deponien vor, um abgetragene Mengen temporär oder dauerhaft zu lagern

bzw. der Baustelle erforderliche Einbaumengen zu liefern. Die Hauptarbeitsschritte einer Erdbaumaßnahme sind: Lösen, Laden, Transportieren, Einbauen und Verdichten. Eine weitere Verfeinerung der Prozesse beinhaltet Vorgänge wie Fahrt des Lkw innerhalb der Abtragsstelle zum Ladegerät, Manövrieren und ähnliche Vorgänge.

Zeitaufnahmen werden, wenn überhaupt, meistens von der Bauleitung nur zur Kontrolle durchgeführt und können für eine statistische Studie nicht genutzt werden. Die aufgenommenen Daten helfen bei der Beurteilung des Arbeitsablaufes und lassen lediglich erkennen, ob der Ablauf nach Plan erfolgt.

Aus mehreren Expertengesprächen wird ersichtlich, dass dem Ingenieur keine Planungs- und Ausführungsinstrumente zur Verfügung stehen, die der Komplexität der organisatorischen Aufgabenstellung bei einer Erdbaustelle angemessen sind. Zum Erfolg von Erdbauarbeiten trägt die Erfahrung entscheidend bei. Daher ist der Wert, der ihr beigemessen wird, nicht unbegründet. Selbst erfahrene Entscheidungsträger können meist ihre Entscheidung nicht ausreichend begründen oder deren Folgen quantifizieren. Manchmal ist zudem die ganze Unternehmung auf die Erfahrung einer Person angewiesen, so dass sie im Falle von Krankheit oder Ausscheiden dieses Experten fast ihr ganzes „Know how“ verliert. Aus all diesen Gründen stellt die Einführung neuer, flexibler Planungs- und Steuerungswerkzeuge, die diese Erfahrung integrieren und dokumentieren, vorhandene Daten effizient verwenden, bessere Lösungen anbieten und keine erheblichen Kosten verursachen, eine Herausforderung für die Forschung dar.

2.2 Simulationstechnik im Baubetrieb

2.2.1 Einleitung zur Simulation

Die Simulation ist eine allgemeine, numerische Methode zur Analyse komplexer Prozesse. In der VDI-Richtlinie wird die Simulation definiert als „ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (*VDI 3633, Blatt 1, 1992*). Wie aus dieser Definition ersichtlich ist, hat die Modellbildung eine zentrale Stellung bei einer Simulationsstudie. Ein Modell stellt „die (vereinfachte) Nachbildung eines Originalsystems“ dar. Es muss „dem Originalsystem im Hinblick auf den Zweck seiner Realisierung

hinreichend ähnlich“ sein (*Sauerbier 1999 S. 18*). „Unter einem System versteht man die Menge der Elemente dieses Systems (seiner Untersysteme), die im gewünschten Sinn miteinander zusammenarbeiten. Jedes System – entweder als reales Objekt oder als begriffliche Abbildung – ist charakterisiert durch die Umgebung, die Verhaltensfunktion und die Struktur.“ (*Kaaz 1972 S. 539*).

Zur Durchführung einer Simulationsstudie wird ein Werkzeug – ein Simulator – benötigt. Ein Simulationswerkzeug ist (im Grunde genommen) ein „Softwareprogramm, mit dem ein Modell zur Nachbildung des dynamischen Verhaltens eines Systems und seiner Prozesse erstellt und ausführbar gemacht werden kann.“ (*VDI 3633, Blatt 1, 1992*).

Modelle können in dreierlei Hinsicht klassifiziert werden, woraus sich die Simulationsarten ergeben (*Law und Kelton 2000 S. 5 f.*):

- statisch oder dynamisch,
- diskret oder kontinuierlich,
- deterministisch oder stochastisch.

Eine statische Simulation liefert eine Nachbildung eines Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt. Eine dynamische Simulation bildet ein System ab, dessen Zustände, Attribute, Prozesse etc. zeitabhängig veränderlich sind. Bei der diskreten Simulation sind die Zustandsvariablen nicht stetigen Veränderungen unterworfen. Der Wechsel zwischen den Zuständen findet zu bestimmten „diskreten“ Zeitpunkten statt. Diese Zustandsänderungen in einem System werden als Ereignisse (events) bezeichnet. Die kontinuierliche Simulation befasst sich hingegen mit der Modellierung und Analyse dynamischer Systeme, bei denen sich die Zustandsvariablen kontinuierlich mit der Zeit ändern. Die kontinuierliche Simulation beinhaltet eine oder mehrere Differenzialgleichungen zur Abbildung des Zusammenhangs zwischen Zeitfortschritt und Änderung der Zustandsvariablen (*Liebl 1995 S. 9 ff.*; *Sauerbier 1999 S. 21*). Bei einer deterministischen Simulation bestimmen die Eingangsgrößen eindeutig die Simulationsergebnisse, während bei der stochastischen Simulation die Eingangsgrößen zufallsbedingt sind (*Sauerbier 1999 S. 22 ff.*).

Zur Abbildung von Bauprozessen eignet sich die diskrete, ereignisorientierte Simulation, die im englischen Sprachraum als Discrete Event Simulation (DES) bezeichnet wird. Die Be-

gründung dafür liegt in der Natur der Bauprozesse, deren Zustände mit Hilfe zeitabhängiger Variablen abgebildet werden können, die ihre Werte in unterschiedlichen Intervallen ändern können.

2.2.2 Entwicklungstrends in der baubetrieblichen Simulation

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Literaturrecherche im Bereich der baubetrieblichen Simulation lässt gewisse Entwicklungstrends erkennen. Richtungweisende Arbeiten, die den jeweiligen Trend initiieren oder weiterentwickeln, sind in der Abbildung 2.2 chronologisch eingeordnet. Im Folgenden werden diese Arbeiten auszugsweise gemäß dieser Abbildung beschrieben, wobei für den letzten Entwicklungstrend ein gesonderter Abschnitt vorgesehen ist, in dem auch ähnliche Entwicklungen in der stationären Industrie in Betracht gezogen werden. Außerdem sind Arbeiten in Deutschland in einem separaten Abschnitt behandelt.

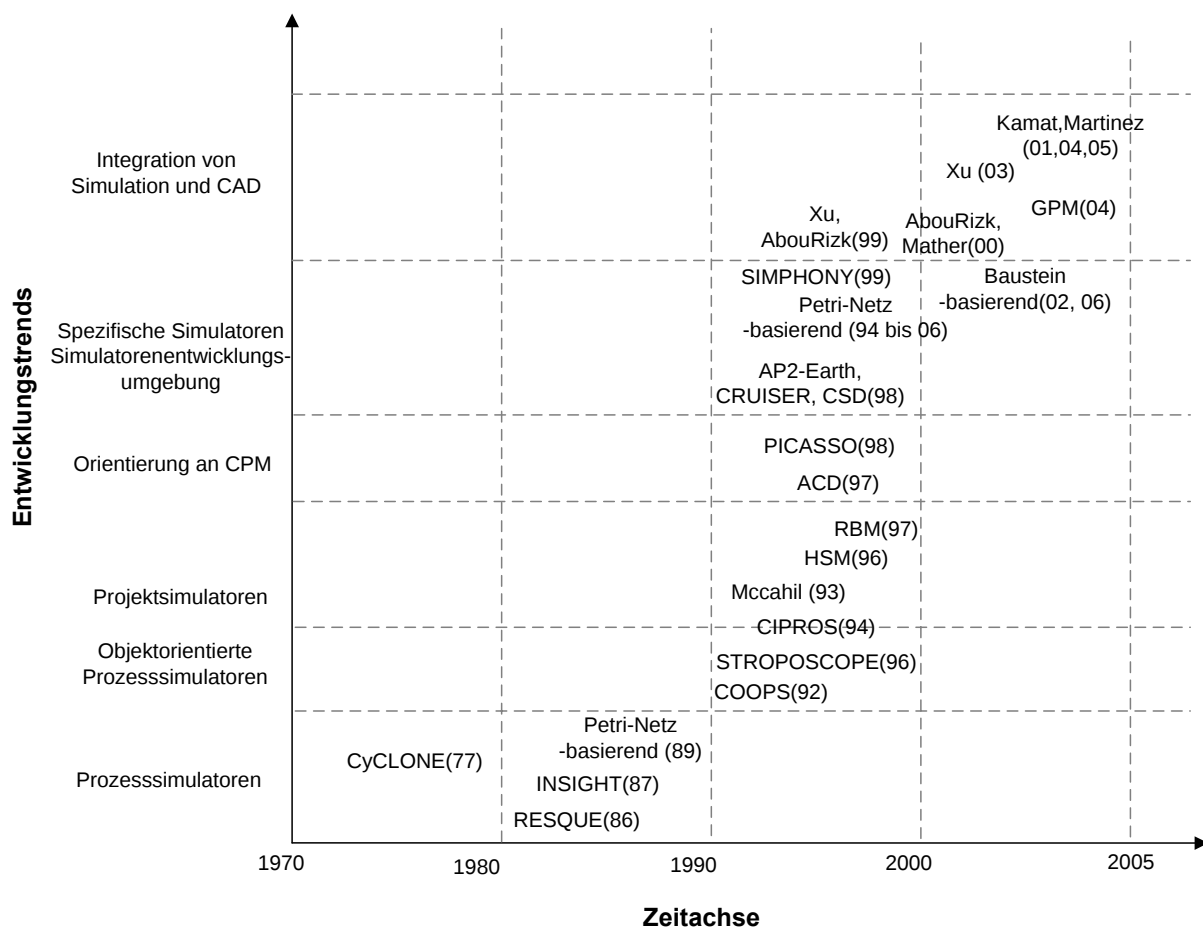
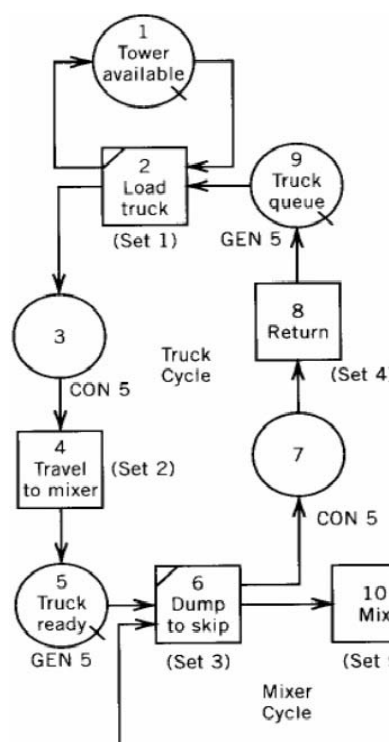


Abbildung 2.2: Entwicklungstrends in der baubetrieblichen Simulationsforschung

2.2.2.1 Prozesssimulatoren

Das international bekannteste Konzept für die Simulation von Bauprozessen mit dem Namen CYCLONE (CYCLic Operation Network) wurde von *Halpin (1973)* an der Universität von Illinois entwickelt. Dieses Konzept bietet eine Modellierungstechnik, mit der diskrete Systeme, mit deterministischen und stochastischen Variablen, graphisch als Netzwerk dargestellt und simuliert werden können. Zum Simulieren eines Bauprozesses mit CYCLONE müssen die an diesem Prozess beteiligten Betriebsmittel und ihre gegenseitige Wirkung erfasst werden. Dabei repräsentiert ein Rechteck ein Ereignis, wobei zwischen bedingten Ereignissen (Combi) und normalen Ereignissen (Normal), die ohne jegliche Bedingung verlaufen, unterschieden wird. Abbildung 2.3 zeigt einen Ausschnitt aus einem Netzbeispiel und eine Tabelle mit den Netzkomponenten (*Halpin 1977*).



Name	Symbol
Combi	
Normal	
Warteschlange	
Funktion	
Zähler	

Abbildung 2.3: Ausschnitt aus einem CYCLONE Beispielsmodell und Netzkomponente (*Halpin und Woodhead 1998 S. 190*)

Combis sind immer mit Warteschlangen verbunden und starten erst, wenn keine Warteschlange leer ist. Falls mehrere Combis um eine, auf einer Queue (Warteschlange) wartenden

Ressource konkurrieren, bekommt das Combi mit dem kleinsten Integerwert die höchste Priorität. Die Prozessträger, die das System durchlaufen, haben keine identifizierenden Attribute und können lediglich durch spezielle Funktionsknoten erzeugt oder geändert werden. Z.B. der Knoten mit der Nummer 3 und der Funktion CON5 sammelt fünf Prozessträger und gibt nur einen weiter.

Aufbauend auf dem CYCLONE-Konzept wurde an der Universität von Stanford das INSIGHT System von *Paulson (1987)* entwickelt, das ein interaktiveres Interface im Vergleich zu CYCLONE enthält. Arbeiten an der Universität von Michigan führten zur Entwicklung von RESQUE (*Chang und Carr 1986*), das erweiterte Fähigkeiten zur Betriebsmittelbehandlung ermöglicht, so dass Betriebsmittel durch ein einziges Attribut identifiziert werden können.

Viele aktuelle Veröffentlichungen bauen auf dem CYCLONE-Konzept auf, so dass man die Aussage treffen muss, dass sich das Konzept zumindest in der Forschung bewährt hat (*Huang und Halpin 1995, Halpin und Martinez 1999, Zayed und Halpin 2001, Zayed und Halpin 2004, Zhang et al. 2005, Sharifi et al. 2006*).

2.2.2.2 Objektorientierung

COOPS (Construction Object–Oriented Process Simulation System) ist ein diskretes objektorientiertes Simulationssystem und wurde von *Liu und Ioannou (1992)* entwickelt. Durch das Konzept der hiermit realisierten Objektorientierung ist es möglich, das Simulationsmodell anhand interaktiver Graphiken aufzubauen, das System zu erweitern und mit anderen wissensbasierten Systemen zu verbinden. Die Basismodellierungselemente von COOPS sind in drei Arten von Objekten (nodes, links und attachments) zusammenzufassen, die in einem mehrstufigen Netz, unter Beachtung von Prioritätsregeln, angeordnet sind (*Liu und Ioannou 1992*).

CIPROS (Knowledge-based Construction Integrated Project and Process Planning Simulation System) wurde an der Universität von Michigan entwickelt. Das System ist objektorientiert und erlaubt es, Daten von Zeichnungen und Terminplänen ins Modell zu integrieren. Dies wird anhand einer erweiterbaren Bibliothek von spezifischen Methoden realisiert, die als ele-

mentare Simulationsnetze und Klassenhierarchien in CIPROS enthalten sind (*Tommelein et al. 1994*).

Auf Basis dieser Simulationssysteme sind vornehmlich in den USA verschiedene, speziell für Bauabläufe geeignete Simulatoren entwickelt worden, die sich von den in der stationären Industrie verwendeten Simulationssystemen erheblich unterscheiden. In diese Systeme können jedoch keine Programmierzeilen integriert werden, was bei der Modellierung komplexer Bauprozesse schnell zu Einschränkungen führen kann (*Martinez und Ioannoa 1996*). Ein von *Martinez (1996)* entwickeltes System mit dem Namen STROBOSCOPE (STate and ResOurce Based Simulation of COnstruction ProcEsses) ist dagegen mit C++ geschrieben und bietet dadurch zwar mehr Freiraum für die Modellierung, bedarf aber eines nicht zu unterschätzenden Programmieraufwandes.

2.2.2.3 Projektsimulatoren

Ausgangspunkt der zuvor beschriebenen Simulationssysteme ist die Prozessebene, da die Modellierung der höheren Projektebene, angesichts der Komplexität und des Ausmaßes an Aktivitäten, die bei der Ausführung eines Bauwerkes zu bewältigen sind, mit sehr viel Aufwand verbunden ist. Frühere Arbeiten von *Mccahil and Bernard (1993)* bieten eine Serie festgelegter Modelle an, aus der der Anwender das für sein Problem passende Modell auswählen kann. Diese Vorgehensweise ermöglicht jedoch nicht die erwünschte Flexibilität und ist für Bauprojekte eher uneffektiv (*Hajjar und AbouRizk 1998*). Es gibt mittlerweile einige Systeme, mit denen der Schritt gewagt wurde, ein ganzes Bauprojekt zu simulieren. Zwei von den zuvor beschriebenen Systemen, CIPROS und STROBOSCOPE, können, indem sie sich dem Modularitätsprinzip bzw. eines CPM Add-on Wahrscheinlichkeitstools bedienen, eingeschränkt auf der Projektebene eingesetzt werden. *Sawhney und AbouRizk (1996)* entwickeln ein hierarchisches Verfahren, namens HSM, für die Modellierung und Simulation von Bauabläufen auf Projektebene. HSM stellt eine Bibliothek von modularen Prozessen bereit, die für die Entwicklung eines gesamten Projektmodells verwendet werden können. HSM baut auf CYCLONE auf, da die Prozessmodelle in CYCLONE beschrieben sind.

Obwohl theoretisch die Möglichkeit der Modellierung eines ganzen Projektes mit einigen Simulationswerkzeugen besteht, bleibt die mit der Modellerstellung verbundene Komplexität ein Hindernis für den praktischen Einsatz. Deshalb wurde in späteren Arbeiten versucht, die

anwenderfreundliche Vorgehensweise beim Modellaufbau zu betonen. Die Arbeiten von *Shi und AbouRizk (1997)* sind hierfür ein Beispiel. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde eine betriebsmittellorientierte Modellierungsmethode (resource based modeling, RBM) entwickelt, bei der die Vorgänge der aktiven Betriebsmittel als atomare Modelle (grundlegende und einzigartige Beschreibung eines bestimmten Vorganges) definiert und in einer Modellbibliothek gespeichert wurden. Diese Basismodelle können, entsprechend den von dem Anwender eingegebenen projektspezifischen Informationen, modifiziert werden. Durch definierte Verbindungsstrukturen werden dann diese Modelle zu einem Modell für das ganze Bauprojekt verknüpft.

2.2.2.4 Orientierung an CPM-Netzplänen (critical path method)

Ein anderes Verfahren führte *Shi (1997)* ein, das auf dem ACD-Prinzip (activity cycle diagrams) beruht. Ein ACD ist eine Kombination von Vorgangszyklen aller beteiligten Betriebsmittel. Dabei werden lediglich zwei Modellierungselemente verwendet: ein Rechteck mit dem Namen des Vorganges, der Dauer, der Anzahl an Betriebsmitteln und des Nachfolgers sowie ein Pfeil zur Präsentation logischer Abhängigkeiten. Der Modellierungsprozess wird dadurch sehr vereinfacht und CPM ähnlich gestaltet. Dieses ACD-Modell wird zu einem ausführbaren Simulationsmodell automatisch konvertiert.

In der Praxis wird seit den 80er Jahren die Netzplantechnik für die Planung von Bauprozessen trotz vieler Einschränkungen weitgehend angewendet. Die erste Einschränkung liegt bei der Modellierung von sich wiederholenden Prozessen. Hier erfordert das CPM-Netz ein individuelles Element (Kante oder Knoten) für jeden Vorgang und wächst deshalb schnell zu einer komplexen Netzstruktur, wenn diese Vorgänge im Laufe der Projektabwicklung mehrmals durchgeführt werden müssen. Die zweite Einschränkung ist die, dass die Netzplantechnik die erforderlichen Ressourcen und deren Nutzung von verschiedenen Vorgängen graphisch nicht beschreiben kann. Außerdem lassen sich Fragen nach der Produktivität von Einsatzmitteln, Leistungsreserven bzw. Ursachen von Leistungsminderungen mit der Netzplantechnik kaum beantworten. Als eine Kombination von CPM und Simulation wurde das Simulationswerkzeug PICASSO entwickelt, das die oben genannten Schwachpunkte in CPM überwindet (*Senior und Halpin 1998*).

2.2.2.5 Spezifische Simulatoren und Simulatorenentwicklungsumgebung

Ein anderer Trend bei der Entwicklung von Simulationswerkzeugen ist der Arbeit von *AbouRizk und Hajjar (1998)* zu entnehmen, die die Rahmenbedingungen für den Simulationseinsatz in der Bauindustrie neu definierten. Sie führen die zu schleppende Einführung der Simulation in die Baupraxis auf zwei Gründe zurück, und zwar auf die Komplexität der Bauprozesse an sich und auf den Aufwand, der mit der Erstellung eines Modells verbunden ist. Der Ansatz von *AbouRizk and Hajjar* fordert visuelle Modellierungskomponenten und eine für einen bestimmten Zweck integrierte Simulationsumgebung (special purpose simulation, SPS). Das heißt, die Simulationstools beschränken sich auf die Behandlung einer bestimmten Fragestellung und bieten für diese eine komplette, für den praktischen Einsatz geeignete Lösung an. Auf diesem Gebiet gibt es drei SPS-Tools, die in der Hoffnung entwickelt worden sind, die Kluft zwischen Simulation und Bauindustrie zu überbrücken: AP2 – Earth, CRUISER und CSD (*Hajjar and AbouRizk 1998*) für die Analyse des Transports im Erdbau bei großen Mengen, für die Simulation der Logistik in Steinbrüchen und für den Grundwasserabsenkungsprozess auf Baustellen. Weiterhin wird von *AbouRizk et. al.* SIMPHONY angeboten, das bei der Entwicklung neuer SPS-Simulatoren unterstützen soll. SIMPHONY bietet den Entwicklern allgemeine und standardisierte Strukturen sowie Routinen in Form von leicht zugänglichen Bibliotheken an, mit denen sie eigene Simulationstools für spezielle Probleme entwickeln können (*Hajjar und AbouRizk 1999; Mohamed und AbouRizk 2000, Appleton und Mohamed 2002, Mohamed und AbouRizk 2005*).

2.2.3 Baubetriebliche Simulation in Deutschland

In Deutschland wurde die Simulation ebenfalls Anfang der 70er Jahre als eine wirksame Methode zur Analyse von Bauprozessen aufgegriffen. *Gehbauer (1974)* stellt fest, dass ein Simulationsmodell als wertvolle Hilfe zur Ermittlung von Leistungen und Gerätekombinationen unter praktischen Bedingungen und unter stochastischen zufallsbedingten Einflüssen dienen kann. Eine statistische Betrachtung der Dauer der Erdbauprozesse ist zudem Gegenstand der Arbeit von *Gehbauer*, wobei statistisch abgeleitete Abhängigkeiten zwischen den Parametern vorgeschlagener Verteilungen und den Einflussgrößen einiger Prozesse im Erdbau empfohlen werden (*Gehbauer 1974*).

2.2.3.1 Anwendung von Petri-Netzen

Die Geschichte der Petri-Netze begann 1962 mit der Dissertation von Carl Adam Petri (*Petri 1962*). Die erste theoretische dynamische Netzklassse wurde ebenfalls von Petri als Bedingung/Ereignis-Netze vorgestellt. Seitdem wird die Petri-Netz-Theorie weiterentwickelt. Diese Netze ermöglichen im Allgemeinen sowohl eine statische als auch eine dynamische Abbildung von komplexen Systemen. Die Statik des Netzes kann anhand drei verschiedener Elementklassen (Plätze bzw. Stellen, Transitionen und Konnektoren bzw. Pfeilen) aufgebaut werden, siehe Abbildung 2.4. Die Stellen, symbolisiert durch einen Kreis, sind passive Systemkomponenten, d.h. sie drücken einen Zustand aus. Die Transitionen sind dagegen aktive Systemkomponenten und beinhalten Aktionen, Zustandsübergänge und Ereignisse. Sie werden durch ein Rechteck dargestellt. Stellen und Transitionen werden durch Konnektoren (gerichtete Pfeile) verbunden, wobei eine Verbindung zwischen zwei Plätzen oder zwei Transitionen nicht zulässig ist.

Die Dynamik des Netzes wird durch Marken realisiert, die nur auf Stellen in Form von kleinen schwarzen Punkten liegen können. Sie stehen für Prozessträger und werden über die Konnektoren transportiert und von den Transitionen verarbeitet oder weitergeleitet. Auf Grund ihrer Beweglichkeit im Netz werden die Marken als dynamische Elemente bezeichnet. Sie geben durch ihre momentane Lage im Petri-Netz den Zustand des Systems wieder.

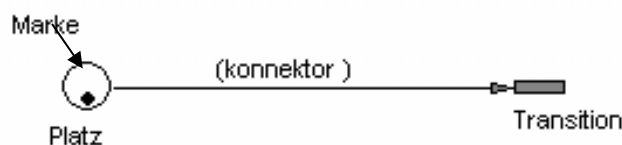


Abbildung 2.4: Hauptelemente eines Petri-Netzes

Eine wesentliche Klasse der Petri-Netze stellen die dynamischen, zeitbewerteten und höheren Prädikat-Transition-Netze (PrT) dar. Sie ermöglichen die Definition von unterschiedlichen Marken mit mehreren, veränderbaren Attributen, also Daten (*Genrich und Lautenbach 1981*). Die Attributswerte können während der Simulation durch einen in Transitionen integrierten, alphanumerischen Programmcode verändert werden. Dieser wird ausgeführt, wenn die Transition aktiviert wird bzw. feuert, Abbildung 2.4.

Der Beweis, dass die Analyse und Simulation komplexer Bauprozesse durch höhere Petri-Netze mit einigen entwickelten Modifizierungen möglich ist, wurde bereits 1989 durch die Dissertation von *Franz* erbracht (*Franz 1989*). Diese Modifizierungen dienen vor allem der Berücksichtigung des Zeitbezugs und der Erfassung der stochastischen Einflüsse. Das ökonomische Potenzial dieser Methode, zur Lösung praxisbezogener Probleme, wird in unterschiedlichen Bereichen des Baubetriebs nachgewiesen. Die Einführung dieser Modifizierungen wird in den meisten modernen Petri-Netz Tools realisiert, die zeitbewertet, stochastisch, hierarchisch und manchmal objektorientiert sind.

Böttcher (1994) analysiert im Rahmen seiner Dissertation einige Bauprozesse mit PrT-Netzen und erörtert die Bewertung von Simulationsergebnissen. Die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten der Petri-Netz-Simulation im Baubetrieb reicht von der Simulation einzelner komplexer Arbeitsketten, wie Bagger-LKW bei Erdbewegungen oder LKW-Kran-Kolonne beim Einbau einer Ortbetondecke (*Franz 1989*), siehe Abbildung 2.5, bis hin zur produktspezifischen Simulation, wie die Simulation der Montage von Betonfertigteilen oder des Ablaufes der Betonpflastersteinproduktion zur Verbesserung der Steuerung (*Franz und Schopbach 1994; Franz und Enkelmann 1998*). Auch in anderen Bereichen der Bauplanung, wie der rechtzeitigen Erstellung und Weiterleitung von Plänen, konnte nachgewiesen werden, dass die Simulation zur Entstörung des Planungsprozesses und Verminderung möglicher Behinderungen bei einer Bauaufgabe führen kann. Anhand eines Petri-Netz-Modells konnte der späteste Termin der Planlieferung, für jedes Bauteil in den verschiedenen Geschossen, für alle beteiligten Planer auf den Tag genau festgelegt werden (*Franz 1997*).

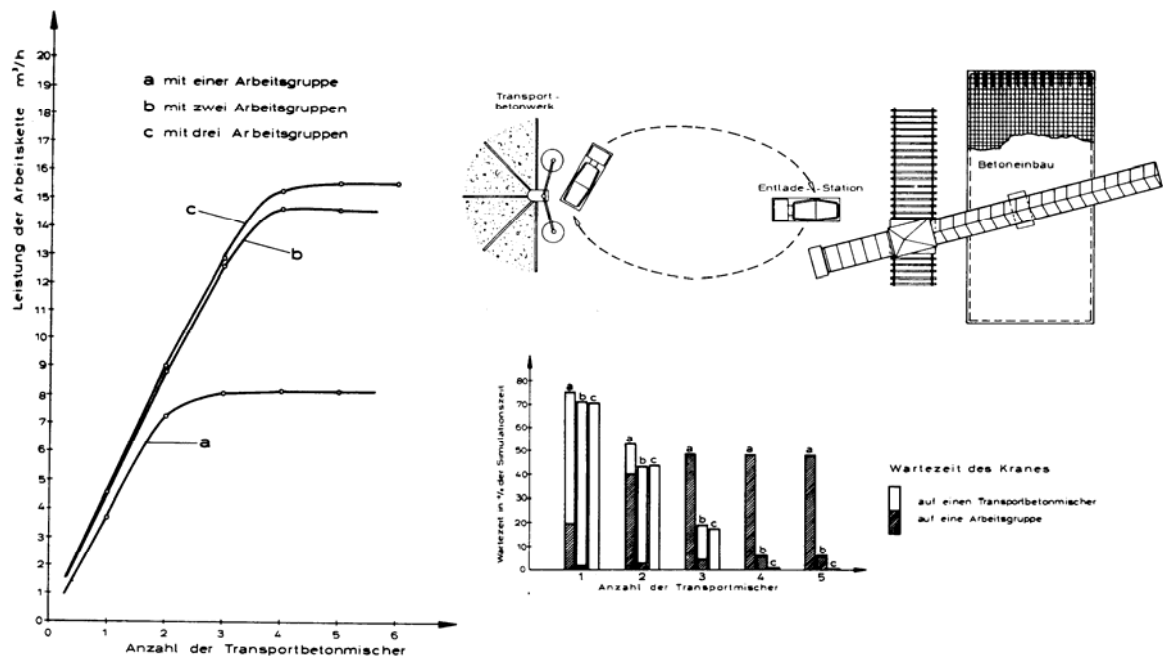


Abbildung 2.5: Einbau einer Ortbetondecke (Franz 1989)

Ein weiteres Beispiel zur Anwendung der Simulation auf einer realen Baustelle ist die Unterstützung der Baustellenlogistik auf der Baustelle Potsdamer Platz, Berlin. Es werden Erdaushubtransporte, Betonversorgung und andere Logistikprobleme mit Petri-Netzen simuliert und zeitliche sowie kapazitätsbezogene Prognosen gestellt (Kantelberg 1998).

International beschäftigen sich nur wenige Studien mit der Anwendung von Petri-Netzen zur Modellierung von komplexen Bauprozessen (Wakefield und Sears 1997; Sawhney et al. 1999; Sawhney et al. 2003).

Petri-Netz-basierte Simulatorenentwicklungsumgebungen ermöglichen die Entwicklung aufgabenspezifischer Simulationswerkzeuge mit Petri-Netzen auf Basis von SPS, siehe Abschnitt 2.2.2.5 und Abbildung 2.2. Beispiel dafür ist das System PACE, der für die Entwicklung von zwei spezifischen Simulatoren für die Anwendungsfelder Nachtragswesen im Erdbau und in der Transportlogistik im Ausbau einbezogen wird (Chahrour et al. 2005 und Chahrour et al. 2006 a). In den beiden Veröffentlichungen betonen die Autoren die Notwendigkeit einer genaueren Analyse des Anwendungsfeldes, für das ein Simulator entwickelt wird. Die für diesen Zweck entwickelte Innovationsplanungsmatrix definiert mehrere Kategorien, mit deren Hilfe das Anwendungsfeld durch bestimmte Anforderungen konkretisiert werden kann.

2.2.3.2 Anwendung von bausteinorientierten Simulatoren

Neben den Petri-Netzen wurden andere Simulationstechniken erforscht, die für die Modellierung und Simulation von Bauprozessen genutzt werden können (*Franz und Chahrour 2002*). Es handelt sich um bausteinorientierte Simulationswerkzeuge, die in der stationären Industrie weit verbreitet sind. Da es sich bei vielen Bauaufgaben um Materialflussfragen handelt, wie Erdarbeiten oder Montagebaustellen, können diese Werkzeuge ebenfalls für die Simulation von Bauabläufen herangezogen werden. Die mit dieser, für die Baubranche „neuen“ Technik verbundenen Vorteile liegen in der Möglichkeit, die Betriebsmittel als Bausteine ins Modell einsetzen und dabei eine bildhafte (pictorial) Visualisierung und Animation anbieten zu können (*eM-Plant 2000*). Dadurch wird dem Anwender eine anschauliche Umgebung angeboten, in der das Modell in einfacher, vertrauter Weise aufgebaut werden kann.

Bei den bausteinorientierten Simulatoren können, abgesehen von dem Anwendungsbereich, einheitliche Gliederungen verwendet werden, die folgende Elemente enthalten (*Noche et al. 1993 S. 270*):

- bewegliche Elemente: Produkte, Transportmittel, Werkzeuge usw.
- stationäre Elemente: Arbeitsstationen, Puffer, Aufzüge, Roboter usw.
- organisatorische Elemente: Pausen, Störungen, Betriebsstrategien, Personaleinsatz, Arbeitspläne usw.

Es wurden Bausteine für die Schlüsselgeräte im Erdbau, Bagger und Lader, entwickelt, deren Bewegung in fünf Bausteinen modelliert ist. Beim Bagger-LKW-Modell werden hauptsächlich die beiden Baggermethoden, Kopf- und Seitenbaggerung, unterschieden. Außerdem kann das Entleeren bei der Kopfbaggerung, je nach Raumbedingungen, entweder auf einer Seite oder beidseitig erfolgen. Für das Lader-LKW-Modell wurden bisher zwei Betriebsarten, „V“ und „I“, erfasst und untersucht, siehe Abbildung 2.6.

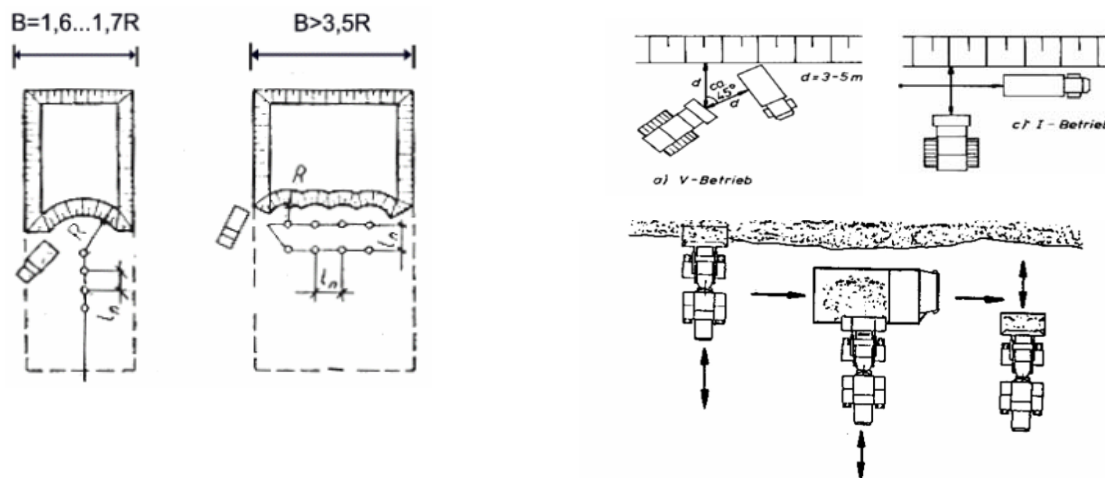


Abbildung 2.6: Kopfbaggerung, Seitenbaggerung, V & I Laderbetrieb

Für die Entwicklung der Bausteine wurde der Simulator eM-Plant (heute Plant simulation) der Firma Tecnomatix (heute UGS) einbezogen. Die Abbildung 2.7 zeigt ein Modellbeispiel mit den entwickelten Baggerbausteinen, die in einen symbolischen Grundrissbaustein per ‚drag and drop‘ eingeordnet werden können. Nach der Eingabe der Parameter des Baggers, der Bewegungsziele und Geometrie der Baugrube, wie z.B. Schaufelinhalt, Reichweite, Breite und Tiefe des Einschnittes usw., soll der Bewegungsablauf beim Ausheben beschrieben werden. Dies erfolgt über den Baustein ‚Ablauf‘, in dem die Reihenfolge durch Ziehen eines Bausteines in eine Tabelle definiert werden kann.

Die Vorteile dieser Methode sind einerseits anschaulicher Art, da man die Abläufe auf einer Baustelle im Modell wieder erkennen kann. Andererseits erlaubt das Modell auch einem nicht Simulationsexperten, eine Baustelle auf einfache Weise zu modellieren und dabei den Zugriff auf das kleinste Detail und auf jede Vorgangsangabe zu behalten. Diese Vorgehensweise zeigt, wie die Simulation der Variabilität der Baustellen durch strukturierte, bausteinorientierte, mit weniger Aufwand verbundene Modellbauweise gerecht werden kann (Franz und Chahrour 2002). Eine dermaßen realitätsgetreue Visualisierung erfordert jedoch eine sehr detaillierte Modellierung und eine ständige Aufnahme aller Einzelbewegungen einer jeden Maschine. Außerdem wird es bei der Visualisierung deutlich, wie hilfreich eine Übernahme von CAD-Daten sein kann. Diese Daten müssen für Simulations- und Visualisierungszwecke wieder eingegeben werden. Dadurch verringert sich die angestrebte Flexibilität, die den Einsatz der bausteinorientierten Simulatoren rechtfertigt.

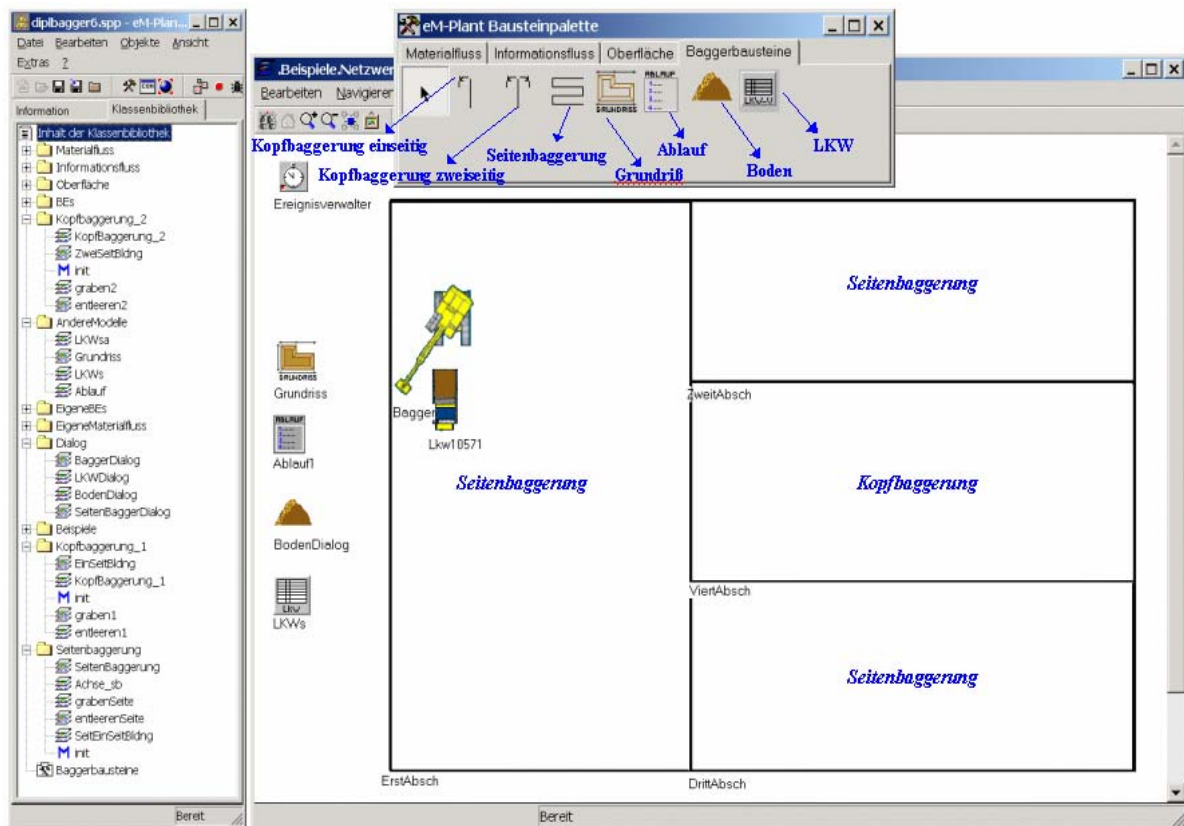


Abbildung 2.7: Baggermodell (Franz und Chahrour 2002)

Im Bereich des Hochbaus werden bausteinorientierte Simulationswerkzeuge zur Analyse von Logistikkonzepten auf Baustellen herangezogen (Weber 2006). Dabei wird der Materialfluss von der Baustellengrenze gegebenenfalls über eine Zwischenlagerung, bis zum Einbauort betrachtet. Weber entwickelt neue Bausteine für den Lkw, den Kran und das Lager mit Hilfe vorhandener Bausteine des Simulators Enterprise Dynamics der Firma Incontrol Enterprise Dynamics, um den Anwendern möglichst eine einfache Modellierung ermöglichen zu können. Ferner werden 3D-Gebäudemodell-Daten, also CAD-Daten, als Systemlasten genutzt, so dass sie nicht mehrfach eingegeben werden müssen. Die Übernahme der Daten findet jedoch über eine Datenbank, ohne eine Integration zwischen den zwei Systemen, statt.

2.2.3.3 Anwendung von Prozesssimulatoren in Anlehnung an Balkendiagramme

Prozesssimulatoren betrachten die Projekte als eine Abfolge von Prozessen bzw. Vorgängen im Sinne der Netzplantechnik, die Personal bindet und Material verbraucht, um einen Fertigungsabschnitt zu liefern (Rohr 2006 S. 68). Rohr behandelt in seiner Dissertation die Frage nach der optimalen Vorhaltemenge an Geräten und Personal im Hinblick auf eine Minimie-

rung der Gesamtkosten. Dafür entwickelte er das Simulationsprogramm TaktSIM, das eine dynamische und stochastische Betrachtung der Bauprozesse ermöglicht und dabei die übliche netzplanorientierte Denkweise in „Vorgängen“ und „Anordnungsbeziehungen“ bewahrt.

Auf dem gleichen Konzept, Einteilung des Bauvorhabens in Vorgänge, die untereinander in Anordnungsbeziehungen stehen, baut ein an der Universität Karlsruhe entwickeltes Simulationsverfahren zur Planungsunterstützung auf (Zülch und Börkircher 2006). Dem Verfahren liegt ein am Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab) programmierter Simulator OSim (Objekt-Simulator) zugrunde (Zülch und Fischer 2002). Dabei wird zusätzlich ein Störungskatalog für Bauabläufe erarbeitet, so dass unterschiedliche Störungsszenarien untersucht werden können. Das Verfahren umfasst drei Hauptkomponenten: eine Modellierungskomponente für Bauprozesse und Bauablaufstörungen, eine Planungskomponente zur Untersuchung von Ablaufvarianten und eine Bewertungskomponente (Zülch und Börkircher 2006).

2.3 Integration der Simulation mit CAD und Visualisierungstools

2.3.1 Integration von CAD mit anderen Systemen

Das in einem CAD-System gespeicherte Geometriemodell entsteht schon in der Planungsphase und ist für die Zielsetzung dieser Phase entwickelt. In der Praxis hängt eine weitere Nutzung dieses Modells für baubetriebliche Aufgaben in der Ausführungsphase teilweise von den Gewerken ab. Beispielsweise betreiben einige Schalungsfirmen auch Softwareanwendungen, die die Analyse der Schalungssysteme anhand CAD-basierter Programme ermöglichen und aktualisierte Stücklisten ausgeben. Auch für die Fertigteilbranche gibt es Programme, welche die Anordnung der Fertigteile im Bauwerk visualisieren und den besten Standort des Krans entsprechend auswählen lassen. Im Straßenbau werden Entwurfspläne während der Ausführungsphase nach jeder Vermessung aktualisiert und die neuen Mengen für die Abrechnung herangezogen.

In der Forschung wird derzeit eine stärkere Anbindung des Geometriemodells an den Entscheidungsfindungsprozess angestrebt. Dabei können die in dem Geometriemodell enthaltenen CAD-Daten sowohl Eingangs- als auch Ausgangsdaten repräsentieren. Beispielsweise dienen CAD-Daten bei der Positionierung von Baustelleneinrichtungselementen einerseits als

unterstützendes Zeichnungsmedium, andererseits auch als 3D Visualisierungskomponente eines hybriden Optimierungssystems für die Baustelleneinrichtungsplanung (*Lennerts 1999*). Im Bereich der 4D Visualisierung (Zeit und Raum) sind bedeutende Einsätze der CAD in die Ablaufsteuerung zu beobachten, wobei eine Verbindung zwischen Terminplanung und visueller Darstellung des Bauablaufes mit textlicher Beschreibung der ausgeführten Vorgänge gewährleistet wird (*Liston et al. 1998, Koo und Fischer 2000, Mallasi und Dawood 2002, Märki et al. 2006*).

2.3.2 Allgemeine Integrationsformen

Die Integration von allgemeinen Software-Umgebungen wird unterschiedlich klassifiziert. In seiner Dissertation unterscheidet *Randell* zwischen Transformations-, Informations- und Applikationsintegration. Bei der Applikationsintegration ‚wissen‘ beide Umgebungen nicht nur über die ausgetauschten Informationen, sondern auch über deren Verarbeitungsweise (*Randell 2002 S. 45 f.*) Bescheid. In dieser Richtung hat es einige Versuche zur Integration von CAD- und Simulationssystemen gegeben, welche die Modellierung, die Simulation und die Animation in der CAD-Umgebung untersuchen. In diesem Fall erfolgt der Datenaustausch online und in Echtzeit zwischen den beiden Systemen unter Nutzung aller in CAD eingegebenen Daten und gegebenenfalls durch Eingabe simulationsrelevanter, zusätzlicher Daten. Allerdings erweist sich diese Art der Kopplung zwischen CAD und Simulation als sehr schwierig in der Anwendung, was an dem Simulator eM-Plant CAD der Firma Tecnomatix (Stand 2001) zu erkennen ist.

Unter Informationsintegration versteht man den Austausch bzw. die gemeinsame Benutzung von Informationen, wobei die Kommunikation in zwei Richtungen erfolgen kann. Diese Integration kann zwischen Softwareumgebungen aus unterschiedlichen oder gleichen Anwendungsbereichen erfolgen. Standardisierte Schnittstellen werden meistens zur Realisierung der Informationsintegration herangezogen (*Randell 2002 S. 38.*) In diesem Zusammenhang ist beispielsweise die Schnittstelle STEP (STandard for the Exchange of Product model data) zu erwähnen. STEP ist ein internationaler Standard (ISO 10303) zum Datenaustausch von Produktdaten mit einheitlichen Konzepten und einheitlicher Struktur und besteht aus unterschiedlichen Standards für unterschiedliche Branchen (*Haas und Frank 1997*).

Die Transformationsintegration ist ein besonderer Fall der Informationsintegration, wobei die Informationen zwischen zwei Systemen aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen ausgetauscht werden (*Randell 2002 S. 43*). Die im folgenden Abschnitt beschriebenen Entwicklungen zur Anbindung der Systeme CAD und DES im Baubetrieb können der letzten Integrationsform zugeschrieben werden.

2.3.3 Integrationsansätze der CAD-Systeme mit Simulation

Bei der Integration der CAD- oder Visualisierungssystemen mit Simulation werden diese Systeme der Simulation vor- bzw. nachgeschaltet. Während CAD-Daten meist als Eingangsdaten für die Simulation dienen, werden Ausgangsdaten der Simulation, ggf. zusammen mit dem CAD-Modell, an Visualisierungssysteme weitergeleitet. Mehrere Forschungsarbeiten haben den Nutzen dieser Integration erkannt und nachgewiesen, siehe Abbildung 2.2. Im Folgenden werden relevante Ansätze in Zusammenhang mit der Forschungsthematik vorgestellt.

Die Arbeit von *Mather und AbouRizk (2000)* geht auf die Anbindung der CAD und der Simulation im Bereich der Erdbauarbeiten in Baugruben ein. Das CAD-System ‚Eagelpoint‘ ist in diesem Fall ein add-on-Programm auf ‚Microstation‘ für die Geländemodellierung und Mengenermittlung, das durch BASIC*-Macros erweitert wurde. Das Simulationsmodell ist als ein aus Modulen kombinierbares Modell mit ‚AweSim‘ entwickelt, wobei die einzelnen Module in einer Bibliothek gespeichert sind. Die Kopplung zwischen den Modulen erfolgt automatisch, wenn mehrere Module zu einem Modell kombiniert werden. Die Baugrube wird in kleine einheitliche Bodenblöcke durch Definieren eines Rasters unterteilt. Das Volumen der Blöcke wird einerseits vom Simulationsmodell vorgeschrieben und entspricht in etwa dem Fassungsvermögen des verwendeten Baggerlöffels. Andererseits wird für jeden Block ein gesonderter Förderweg, ausgehend von seinem Schwerpunkt, berechnet. Die Volumen der Bodenblöcke werden anhand „extraction modules“ extrahiert und auf einen bestimmten Layer als Textobjekte geschrieben. Diesen Textobjekten werden dann alle weiteren simulationsrelevanten Eigenschaften zugewiesen, was bei der großen Anzahl an Bodenblöcken nur mit einem großen Aufwand zu realisieren ist. Außerdem betrachtet das Verfahren nur eine Abtrags-

* gemeint ist die Programmiersprache BASIC

stelle, an der lediglich ein Bagger arbeitet. Nachteilig ist in dieser Arbeit einerseits die Anwendung eines nicht hierarchischen, deterministischen Simulationssystems, andererseits ist das ganze Verfahren für ein bestimmtes System, nämlich ‚EagelPoint‘, entwickelt worden.

Xu und AbouRizk (1999) haben eine produktorientierte Simulationsumgebung (PSE, product-oriented simulation environment) entworfen, bei der das Produkt und nicht der Prozess im Mittelpunkt steht. Der Ansatz baut auf drei Säulen auf: Produkthierarchie (PH), Produktnetzwerk (PN) und Simulationsmodell (SM). Die Produkthierarchie enthält alle physikalischen Attribute eines Produktes, ihre Beziehungen und ihre Ausführungsverfahren, wobei die Daten aus dem CAD-Modell extrahiert werden können. Die Produkthierarchie besteht aus kleinsten Produkteinheiten mit bestimmten Dimensionen, den sog. product atomic components (PAC). Diese werden in das CAD-System generiert und in die Simulation transferiert (*Xu 2001 S. 30 ff.*, *Xu 2003*). Im Produktnetzwerk ist die Reihenfolge der Bauabläufe definiert. Das Simulationsmodell des Projektes wird sodann durch die Kopplung zwischen dem Produktmodell, also PH, in einer bestimmten Bauphase, also PN, und dem SM aus einer Bibliothek aus flexiblen, modularen Modellen, aufbauend auf SIMPHONY, gebildet, siehe Abschnitt 2.2.2.5.

Ein weiterer Ansatz mit dem Namen ‚geometry-based process model‘ (GPM) entstand 2004 im Rahmen der Dissertation von *Akbas*. Der Ansatz wurde zur Analyse von Installationsarbeiten im Hochbau entwickelt und baut auf Arbeiten im Bereich der 4D der Stanford-Universität auf. 4D-CAD bietet eine gute Visualisierung, geht jedoch von einem CPM-Plan aus und ist deshalb durch dieselben Einschränkungen gekennzeichnet. GPM generiert ein deterministisches Warteschlangen-Simulationsmodell aus dem 3D-CAD-Modell, in dem der ganze Bauprozess in Subsystemen unterteilt wird. Jedes Subsystem enthält Kolonnenparameter, geometriebasierte ‚work locations‘ und Interaktionen. Die Zerlegung der Geometrie erfolgt mit einer dreieckigen Vermaschung, aus der ‚work locations‘ generiert werden. Diesen werden zusätzliche Attribute zugewiesen. Eine komplexe geometriebasierte und automatische Arbeitsablaufanalyse ist ein weiterer Gegenstand dieser Forschungsarbeit (*Akbas 2004*).

Das Generieren von Simulationsmodellen aus der CAD-Umgebung ist ebenfalls Gegenstand der Forschung in der stationären Industrie. *Moorthy (1999)* hat einen ähnlichen Ansatz, wie PSE, für das Programm FactoryCAD der Firma (UGS) entwickelt. Simulationsrelevante Daten sind in den CAD-Objekten als Attribute eingebettet. Diese werden in eine SDX (Simulati-

on Data eXchange)-Datei geschrieben, die eine standardisierte ASCII-Datei darstellt und zum Aufbau eines Simulationsmodells dient. Weitere Arbeiten führen dazu, dass dem Anwender die Möglichkeit zur Modifizierung der SDX-Datei über einen externen Editor gegeben wird. Außerdem kann die SDX-Datei in eine XML (eXtensible Markup Language)-Datei transformiert werden (*Sly und Moorthy 2001*).

Die Integration der Simulation und CAD wird in der Literatur außerdem hinsichtlich der Visualisierung und Animation thematisiert. *Kamat und Martinez* entwickelten 2001 ein Visualisierungstool ‚Dynamic Construction Visualizer‘ (DCV), das unabhängig von CAD- oder Simulationssystemen den Ablauf eines Prozesses animieren kann. Die Animation erfolgt nach der Simulation und erfordert eine Ereignisliste als Text-Datei (trace file) in der DCV-Sprache (*Kamat und Martinez 2000; Kamat und Martinez 2001*). Die Entwicklungen dieser Forschung ergaben ein Visualisierungssystem mit dem Akronym VITASCOPE (VisualizaTion of Simulated Construction OPERations). VITASCOPE überwindet das Animationsproblem von diskreten Prozessen, bei denen die Zeitsprünge von den Ereignissen abhängig sind und lässt die Bewegungen kontinuierlich aussehen. Mit den bisherigen Animationstools erfolgte eine unbedingt notwendige detaillierte Modellierung von nicht simulationsrelevanten Prozessen für Visualisierungszwecke, siehe 2.2.6.2. Außerdem müssen visualisierungsrelevante Geometrie- und Raumdaten als zusätzliche Parameter in der Simulation verarbeitet werden. VITASCOPE empfiehlt die Anwendung der inversen Kinematik, einer meistens in der Robotik eingesetzten Technik, zur Lösung dieser Probleme (*Kamat und Martinez 2004; Kamat und Martinez 2005*).

Speziell für den Straßenbau ist in diesem Zusammenhang der Simulator RoadSim zu erwähnen. Roadsim besteht aus einer Datenbank, einer Wissensbasis und einem Simulator. In der Datenbank sind für jede Position in einem anzugebenden Leistungsverzeichnis denkbare Zusammenstellungen von Betriebsmitteln, mit der wahrscheinlichen Produktivität und den Kosten gespeichert. Der Simulator besteht aus zwei Modulen, dem Produktivitätsmodul und dem Visualisierungsmodul. Das Produktivitätsmodul leitet die Operationen von den Inputdaten (Leistungsverzeichnis, Baubeschreibung, Vertrag, Arbeitsbedingungen etc.) ab und generiert alle möglichen Varianten zur Zusammenstellung der Betriebsmittel. Sobald der Planer jede Operation detaillierter beschrieben hat, werden Produktivität, Dauer und Kosten der Operationen berechnet und in einen Terminplan übernommen. Die Ausführungsschritte können mit-

tels CAD aufgezeigt werden. Das Visualisierungsmodul dient dem Prozessdesign, in dem die Raumbedingungen näher definiert werden können (*Castro und Dawood 2004, Castro und Dawood 2006*).

2.4 Definition des Forschungsbedarfs

Die Untersuchung des bisherigen Forschungsstandes hat folgende Forschungspotenziale aufgezeigt, deren Untersuchung für die Weiterentwicklung der Simulation im Baubetrieb wichtig ist:

- Ausgehend von der (SPS) These, siehe Abschnitt 2.2.2.5, die die Entwicklung aufgabenspezifischer Simulatoren für bestimmte Zwecke empfiehlt und in Anbetracht der Tatsache, dass die Simulation im Straßenbau in der Literatur zu wenig behandelt wird (*Castro und Dawood 2004*), stellt die vorliegende Forschungsarbeit den Straßenbau als ein sehr sinnvolles Anwendungsgebiet der Simulation dar.
- Die Extraktion der geometrischen Daten aus CAD wird in der Arbeit von *Mather und AbouRizk (2000)* und *Xu (2001)* behandelt, wobei der Raum in einheitliche Erdkörper, also Prismen, zerlegt wurde. *Akbas (2004)* geht vom gleichen Ausgangspunkt aus, lässt jedoch den Anwender die ‚work locations‘ räumlich selbst gestalten. In dieser Arbeit wird die Möglichkeit zur manuellen, flexiblen Zerlegung des Raumes in beliebige Erdkörper untersucht. Um ein praxisgerechtes System zu entwickeln, wird kein bestimmtes Straßenplanungssystem für die Entwicklung, sondern lediglich ein der Bauleitung zugängliches CAD-System herangezogen.
- Zum Thema Simulation von Bauprozessen mit Petri-Netzen sind relativ wenige Veröffentlichungen (*Franz 1989; Franz 1998; Wakefield 1997; Sawhney 1999; Sawhney 2003*) zu finden. Alle belegen jedoch, dass sich Petri-Netze für die Simulation komplexer Systeme, wie des Bauablaufes eignen. Hierauf stützend wird in der vorliegenden Arbeit ein parametrisierbares, Petri-Netz-basiertes Simulationssystem zur Analyse von Erdbewegungsmaßnahmen entwickelt.
- Die Integration von CAD und Simulation stellt eine aktuelle Forschungsthematik dar, wobei die Integrationsumgebung die Entwicklungen der Produktmodelle zur Unterstüt-

zung der Kooperation verschiedener Fachplaner einbeziehen soll (*Kamat 2003 S. 145; Kiviniemi 2005 S. 249*). Dieser Aspekt eröffnet ein unerforschtes Feld zur Untersuchung der Simulationsrelevanz der Produktmodelle im Straßenbau und deren Anwendung zur Integration von CAD und Simulation.

Die vorliegende Arbeit wird in den folgenden drei Kapiteln diese vier Forschungspotenziale konkret aufgreifen und Lösungsansätze aufzeigen. Das sechste Kapitel geht auf die Implementierung in einem System-Prototyp ein. Die Evaluierung des entwickelten Systems erfolgt im Kapitel sieben anhand einer realen Baustelle.

3 Konzept der produktmodellbasierten Integration

3.1 Lösungsarchitektur

Der Sinn der produktmodellbasierten Integration von CAD und Simulation und der dabei zu erwartende Nutzen für die Simulation wurde schon in früheren Arbeiten zumindest im Hochbaubereich erkannt (*Kamat 2003 S. 145; Kiviniemi 2005 S. 249*). Die ersten Arbeiten zur Entwicklung von produktmodellbasierter Simulation können im Bereich der thermischen Simulation (*Treeck et al. 2003*) und der Simulation des Energieverbrauches und des Ressourcenbedarfes von Gebäuden (*Wassouf et al. 2006*) schon verzeichnet werden. Auch im Tiefbau finden sich Produktmodelle, siehe Abschnitt 4.2.3, deren Relevanz zur Simulation zu untersuchen gilt. Dabei sollen diese als eine neutrale Umgebung bzw. Schnittstelle dienen, die in die relevanten Systeme zu integrieren ist. Der Vorteil daran ist, dass alle für die integrierten Systeme erforderlichen Informationen an einer Stelle gespeichert werden.

Die Abbildung 3.1 zeigt die Lösungsarchitektur zur produktmodellbasierten Integration von CAD und Simulation. Das Simulationssystem und die CAD-Umgebung bleiben damit unabhängig und sind angebunden durch das integrierte Produktmodell. Dabei ist eine einheitliche Aufbaustruktur der relevanten Objekte in dem Produktmodell zu definieren und die Möglichkeit zu einer variablen Ablaufstruktur zu geben. Die Daten der Aufbaustruktur werden mittels Extraktion der Geometrien oder Eingabe der Parameter innerhalb der zu erweiternden CAD-Umgebung gewonnen. Fokus der Aufbaustruktur ist die Entwicklung eines Ansatzes zur Zerlegung der Baustelle in Einheiten bzw. Erdkörper, die für die weitere Bearbeitung durch Simulation geeignet sind. Für die Ablaufstruktur sind Anordnungsbeziehungen aus der Terminplanung erforderlich. Die in der Simulationsumgebung programmierten, aufgabenspezifischen Module werden somit über das Produktmodell parametrisiert und bilden dann die zu analysierende Baustelle ab.

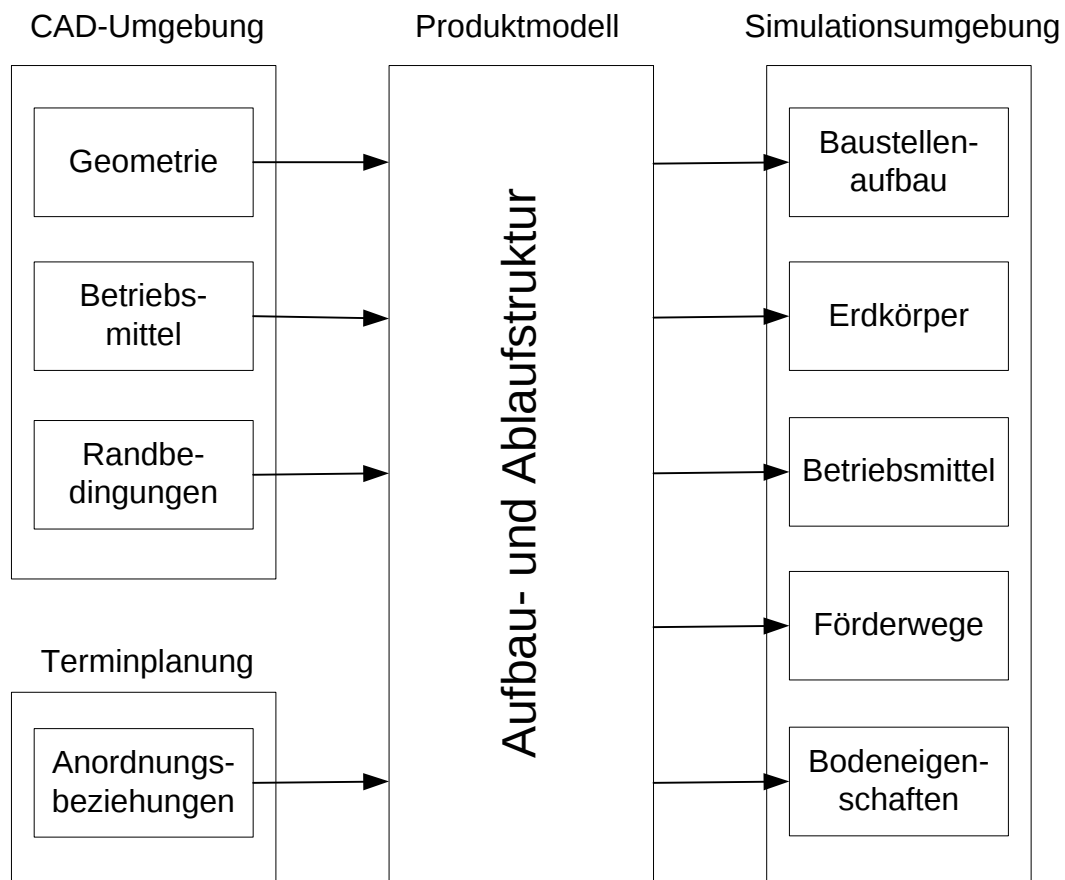


Abbildung 3.1: Lösungsarchitektur zur produktmodellbasierten Integration von CAD und Simulation

Somit ist die angestrebte Integration von CAD und Simulation eine Vorstufe der Informationsintegration, siehe Abschnitt 2.3.2, weil der Austausch über ein Produktmodell erfolgt, das jedoch nicht standardisiert ist, siehe Kapitel 4.

Die Entwicklung der Aufbau- und Ablaufstruktur des Produktmodells wird im vierten Kapitel dieser Arbeit erläutert. Das darauf folgende Kapitel hat das Simulationssystem mit seinen einzelnen Modulen und Objekten zum Thema. Diese zwei Kapitel behandeln den hier nur konzeptuell dargestellten Ansatz im Detail und bilden zusammen den wissenschaftlichen Kern der vorliegenden Arbeit.

3.2 Forschungsrichtungen

3.2.1 Konzipierung der Forschungsrichtungen

Durch effiziente Nutzung vorhandener, in anderen Planungssystemen gespeicherter Daten bzw. Geometrien mit entsprechender Zerlegungsmethodik des Raumes und nachträglicher Parametrisierung von Simulationsmodellen lassen sich einige der im Abschnitt 1.2.2 beschriebenen Modellierungsvorgehensweisen kombinieren.

Die Realisierung der produktmodellbasierten Integration von CAD und Simulation erfordert die Anwendung von flexiblen und mittels Programmierung erweiterbaren CAD- und Simulationstools zum Modellaufbau. Zur Erreichung der im Abschnitt 1.3 konkretisierten Ziele werden im Zuge dieser Arbeit hauptsächlich zwei grundlegende Forschungsrichtungen verfolgt. Die erste Forschungsrichtung befasst sich mit der Petri-Netz-basierten Simulation von Erdbauprozessen auf Straßenbaustellen. Die zweite Richtung konzentriert sich auf die Vereinfachung der Modellierung durch die produktmodellbasierte Integration von CAD und Simulation. Diese zwei Richtungen stehen in Wechselwirkung zueinander. Die Petri-Netz-basierte Simulation muss dem Modellierungsansatz des Produktmodells entsprechen, und dieser muss seinerseits die Bedingungen der Simulation erfüllen. Im Folgenden wird detailliert auf beide Forschungsrichtungen der Arbeit und auf die daraus entstandene Lösungsarchitektur und deren Implementierung eingegangen.

3.2.2 Petri-Netz-basierte Simulation von Erdbauprozessen auf Straßenbaustellen

Im Bereich der Simulation von Bauprozessen sind in den letzten drei Jahrzehnten zahlreiche Forschungsansätze entstanden, siehe Abschnitt 2.2. Bis auf wenige Ausnahmen beruhen alle Entwicklungen auf speziell für die Baubranche entwickelten Simulatoren (construction simulation), wie z.B. CYCLONE (*Halpin 1977*), CIPROS (*Ohde et al. 1992*), STROPOSCOPE (*Martinez 1996*). Die aktuellen Forschungsarbeiten zeigen eine ähnliche Richtung, bei der der Simulator speziell für die Erfordernisse der Bauprozesse komplett neu entwickelt wird (*Akbas 2004, Castro und Dawood 2004*).

Weitere, in anderen Industriebranchen erfolgreich eingesetzte, allgemeingültige Modellierungsmethoden sind jedoch teilweise- wie vereinzelte Arbeiten belegen - so flexibel, dass

sie ebenfalls auf baubetriebliche Fragestellungen anwendbar sind. Petri-Netze zählen zu diesen allgemeingültigen Konzepten und werden in mehreren Ansätzen zur Simulation von Bauprozessen herangezogen (*Franz 1989; Franz und Schopbach 1998; Wakefield und Sears 1997; Sawhney et al. 1999; Sawhney 2003; Chahrour et al. 2005, Chahrour et al. 2006 a, b, c*).

Die Modellierung durch Anwendung von parametrisierbaren Modellelementen kann auch in Verbindung mit den netzbasierten Simulationsmethoden, wie Petri-Netze, erfolgen, die auf einfachen Netzelementen zum Modellaufbau beruhen. Dabei kann ein aufgabenspezifisches Simulationsmodell mit entsprechenden Attributen so verallgemeinert werden, dass es sich für die Beschreibung einer bestimmten Gruppe ähnlicher Probleme wieder verwenden lässt. Bei der Simulation von Bauprozessen kann diese Methode die Komplexität und die Einzigartigkeit der Projekte variabel und anpassungsfähig abbilden und eine anwenderfreundliche Parametrisierung bzw. Eingabe der Parameter anbieten. Der Simulationsansatz muss parametrisierbar, flexibel, übersichtlich und speziell auf die Fragestellungen des Erdbaus auf Straßenbaustellen (aufgabenspezifisch) zugeschnitten sein. Mit einer diskreten, ereignisorientierten und Petri-Netz-basierten Simulation ist eine solche Modellierung und Analyse möglich. Deshalb werden im Zuge dieser Arbeit high-level Petri-Netze, speziell die Prädikat-Transitions-Netze (PrT-Netze), herangezogen, siehe Abschnitt 2.2.3.1. Diese eignen sich insbesondere für die Modellierung von komplexen Bauprozessen (*Franz 1989*). PrT-Netze wurden jedoch bislang nur unzulänglich im Bezug auf ihre Tauglichkeit zur Simulation im Bauwesen erforscht.

Mit diesen Netzen kann die Systemstruktur anhand der statischen Komponenten des Netzes, siehe Abschnitt 2.2.3.1, hierarchisch und übersichtlich aufgebaut werden. Dabei orientiert sich die Modellierung an der Strukturierung der realen Straßenbauprojekte. In der untersten Hierarchie werden die Prozesse der einzelnen Betriebsmittel modelliert. Die Dynamik des Systems wird mit Hilfe von Marken dargestellt, die unter anderem vorhandene Betriebsmittel abbilden. Die Marken können bei den PrT-Netzen als individuelle Objekte modelliert und mit Daten hinterlegt werden. Die Struktur der Daten ist sehr flexibel zu formulieren, damit eine nachträgliche Parametrisierbarkeit durch CAD-Systeme ermöglicht wird. Basis der Entwicklung ist eine Simulatorenentwicklungsumgebung, mit der ein aufgabenspezifischer Simulator für Erdbewegungsmaßnahmen bei Straßenbaustellen ent-

wickelt wird. Erst nach der Parametrisierung entsteht das Modell einer bestimmten Baustelle, mit dem mehrere Varianten zur Zusammensetzung der Betriebsmittelketten und der Massenverteilung simuliert werden können.

3.2.3 Produktmodellbasierte Integration

Die Integration von CAD und Simulation bezweckt die Vereinfachung der Modellierung durch Parametrisierung des Simulationssystems über CAD-Systeme, aus denen auch Geometriedaten extrahiert werden. Die meisten Straßenplanungssysteme basieren auf einem CAD-System oder können mit CAD-Systemen Daten austauschen. Dadurch liegt eine Fülle von projektbezogenen Daten in Form von geometrischen Angaben bereit, die in Verbindung mit der Simulation effizient genutzt werden können. Um diese Geometriedaten als zu bearbeitende Bodenmengen der Simulation bereitstellen zu können, teilen einige Forschungsansätze auf diesem Gebiet den relevanten Raum automatisch in einheitliche Geometrien auf, z.B. in Quadratprismen (*Mather 1996, Xu 2001, Xu 2003*) oder Dreiecksprismen (*Akbas 2004*). *Akbas* geht einen Schritt weiter und definiert räumliche ‚work locations‘, die vom Anwender durch Gruppierung der Raumeinheiten frei definiert werden können. Die vorliegende Arbeit strebt eine flexible und manuelle Zerlegung des Raumes an, die sich an den Anforderungen der Praxis orientiert.

Mit den IT-Entwicklungen wuchs ständig das Interesse, mehr als nur reine Geometriedaten über ein Produkt - das Bauprojekt – austauschen zu können. Im Fokus der gegenwärtigen Forschungsbemühungen steht die Definition eines ganzheitlichen Konzeptes zur Beschreibung eines Produktes (*Björk 1989*). Die Idee des Produktmodells ist dabei entstanden und mit ihr das Ziel der Standardisierung. In einem Produktmodell werden alle Daten für den gesamten Lebenszyklus eines Produktes bzw. Projektes strukturiert und für alle Applikationen zugriffsbereit gehalten (*Rebolj et al. 2002*). Im Zusammenhang mit der Nutzung vorhandener Daten für die Simulation werden bestehende Produktmodelle für Straßen herangezogen. Dabei wird untersucht, inwiefern die enthaltenen Daten für die Simulation relevant sind. Ob eine konzeptionelle Erweiterung dieser Produktmodelle um simulationsrelevante Datenstrukturen erforderlich ist und wie sie eventuell aussehen soll, zählt ebenfalls zu den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit.

Der produktmodellbasierte Ansatz zur Integration von CAD und Simulation soll folgende Forderungen erfüllen:

- praxisnah und an den üblichen Methodologien zur Strukturierung der Straße für andere Managementsysteme orientiert sein,
- transparent, damit die angestrebte nahtlose Modellierung der Daten realisierbar sein kann,
- flexibel bzw. erweiterbar, um mehrere Varianten analysieren und zukünftige Entwicklungen ermöglichen zu können.

3.3 Implementierung

Eine praxisgerechte, prototypische Implementierung auf Basis des konzipierten Ansatzes soll die Vorteile der Simulation zur Analyse von Erdbauprozessen, in Verbindung mit CAD- und anderen Planungssystemen, aufzeigen.

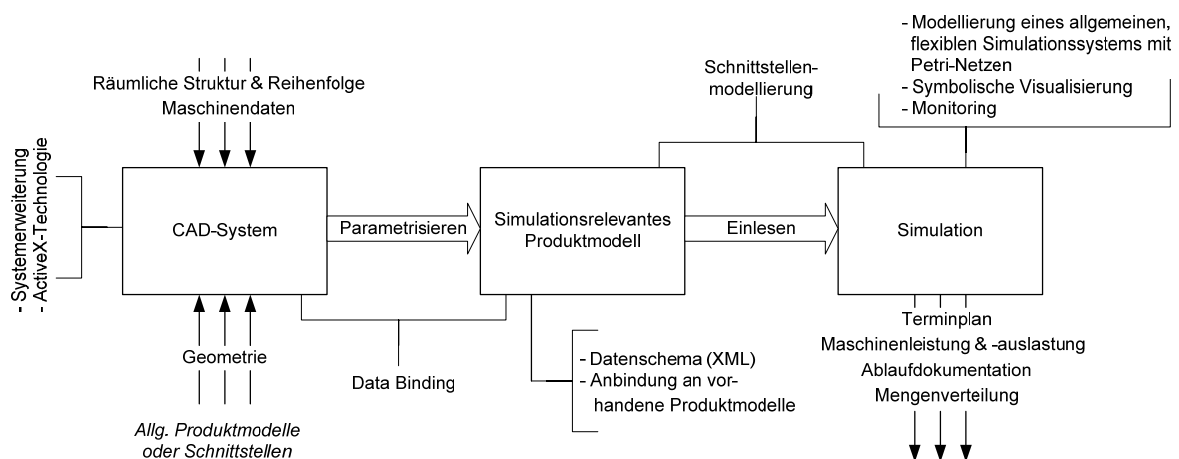


Abbildung 3.2: Implementierung, inklusive Eingangs-, Ausgangsdaten und Anforderungen (Chahrour und Franz 2006 b)

Die Erweiterung des CAD-Systems wird mit Hilfe von VBA (Visual basic for Application) und ActivX-Technologie realisiert, wobei die im Rahmen des Produktmodells entwickelten Objekte als eine Objektbibliothek (DLL) in das CAD-System integriert wird. Das Produktmodell wird als ein Datenschema verfasst und mit Hilfe der Data Binding Technologie in Objekte überführt. Das Simulationssystem wird in einer Petri-Netz-basierten Simulato-

renentwicklungsumgebung aufgebaut, wobei auch die Schnittstelle zum Produktmodell programmiert werden muss.

Der Datenfluss soll gemäß der Informationsintegration in zwei Richtungen erfolgen. Bei der Implementierung wird jedoch im ersten Schritt nur die in der Abbildung 3.2 angezeigte Richtung realisiert. Die Erweiterung kann auf einfache Weise umgesetzt werden.

Wie in der Abbildung 3.2 ersichtlich ist, kann der Anwender das Simulationsmodell durch einfache Parametrisierung über CAD aufbauen. Dafür sind räumliche Daten, Betriebsmiteldaten und andere Randbedingungsdaten, Anordnungsbeziehungen etc. erforderlich. Unmittelbar nach diesem Schritt kann die Simulation gestartet und ein Terminplan automatisch erstellt werden. Außerdem kann der Anwender einen Simulationslauf dynamisch betrachten und ,What-if'-Szenarien über unterschiedliche Varianten mit veränderten Parametern durchführen. Eine detaillierte Beschreibung der Implementierung ist Gegenstand des Kapitels 6.

4 Das simulationsrelevante Produktmodell

4.1 Einheitliche Datenstruktur als Ausgangspunkt und Ziel

Die Schnittstelle zwischen Simulation und CAD dient als ein Produktmodell nicht nur zur Datentransformation zwischen CAD und Simulation, sondern auch zur strukturierten Datenhaltung von prozess- und projektbezogenen Daten, die bestenfalls verstreut in unterschiedlichen Planungssystemen gespeichert oder teilweise sogar nicht dokumentiert werden. Die Datenextraktion und die Dateneingabe werden aufbauend auf der Datenstruktur entworfen. Die gleiche Systematik findet sich im Aufbau des Simulationssystems wieder, das die erforderlichen Daten entsprechend einliest. Aus diesen Gründen stellt der systematische, einheitliche Aufbau der Datenstruktur den Ausgangspunkt sowohl zur Erweiterung des CAD-Systems als auch zur Modellierung des Simulationssystems dar.

Des Weiteren soll der potenzielle Beitrag der Simulation zur Zielerreichung verschiedener baubetrieblicher Managementsysteme nicht außer Acht gelassen werden. Dieser Beitrag spiegelt sich in der Querschnittsfunktion, die der Simulation als Managementinstrument zukommen kann, siehe Abbildung 4.1. Die Konzeption der Schnittstelle soll daher eine zentrale, systemunabhängige Datenhaltung als Basis für langfristige Entwicklungen haben, um den Austausch von Daten zwischen mehreren Managementsystemen zu gewähren. So gesehen, stellt die Formulierung einer einheitlichen Datenstruktur auch ein Ziel dar. Durch die Funktion der Visualisierung und der Abbildung dynamischer Prozesse unterstützt die Simulation die Strukturierung der Vorgänge, die den ersten Schritt aller Managementsysteme darstellt. Diese Funktion unterstützt zugleich das Controlling, indem eine diesbezügliche Regelkreisfunktion mit der Einführung der Simulation gestärkt wird. Außerdem können Risiken mit der Funktion der Prognose künftiger Systementwicklungen im Einklang mit dem eingesetzten Risikomanagementsystem besser abgeschätzt werden (*Chahrour et al. 2005*). Die oben genannten Funktionen der Simulationstechnik unterstützen schließlich fundierte Entscheidungen, weil damit Zielgrößen quantitativ abgeschätzt werden können. Diese Überlegungen messen der Simulation mehr Bedeutung bei und betrachten sie als eine Methode zur Abbildung von Bauprozessen in den unterschiedlichen Projektphasen und zur Kommunikation unter den Projektbeteiligten. Die mit der Anbindung der Simulation gebotene Abstimmung der Systeme aufeinander erfordert deren Festlegung auf Nut-

In der Weise, wie die Daten in der Schnittstelle strukturiert sind, werden sie in das CAD-System eingegeben und vom Simulationssystem eingelesen. Diese Tatsache lässt schnell erkennen, dass die Formulierung der Schnittstelle ein fortschreitender Prozess ist, der sich über die Gesamtzeit der Entwicklung des CAD-basierten Simulationssystems streckt. Parallel zum Aufbau der Datenstruktur soll deshalb die softwaretechnische Umsetzung erfolgen. Diese bedingt die Festlegung der Art der Schnittstelle, die die Simulation mit dem CAD-System verbinden soll.

4.2 Untersuchung vorhandener Schnittstellen und Produktmodelle

4.2.1 Schnittstellen für den Straßenbau

4.2.1.1 Problematik des Datenaustausches

Im Kapitel 2 wurde auf einige Formen von Schnittstellen zur Verknüpfung von CAD und Simulation eingegangen, die in der Literatur vorgeschlagen werden. Die Tatsache, dass CAD-Daten im Bereich des Erdbaus aus Straßenplanungssystemen stammen, lässt die Erörterung der dort angewandten Schnittstellen im Vorfeld sinnvoll erscheinen.

Der Ablauf der Straßenplanung bis hin zur Ausführung erfordert die Mitwirkung von unterschiedlichen Akteuren und Institutionen, die meist mit unterschiedlichen EDV-Systemen ausgestattet sind. Nahezu alle dabei anfallenden Arbeitsschritte werden heutzutage durch Softwarelösungen unterstützt. Deshalb kommt dem reibungslosen Austausch der Daten, die in Form von Zeichnungen, Textdokumenten, Textdateien usw. vorliegen, eine große Bedeutung zu. Angesichts der vielen Schnittstellen, über die große Mengen an Text- und Zeichnungsdateien weitergeleitet werden, ist es ein Gebot der Effizienz und daraufhin der Wirtschaftlichkeit, dass möglichst viele Daten von dem vorigen Prozess übernommen und ohne Zwischenstufen weiterbearbeitet werden können. Meist wird jedoch eine erneute Digitalisierung einiger Zeichnungen und Dokumente im Zuge des Folgeprozesses in Kauf genommen, weil diese nicht komplett ausgetauscht werden können. In diesem Fall spricht man von Medienbrüchen, da das Bearbeitungsmedium zwangsweise gewechselt wird (z.B. Datenträger, Papier und umgekehrt) (*FGSV 2003 S. 12*), siehe Abbildung 4.2.

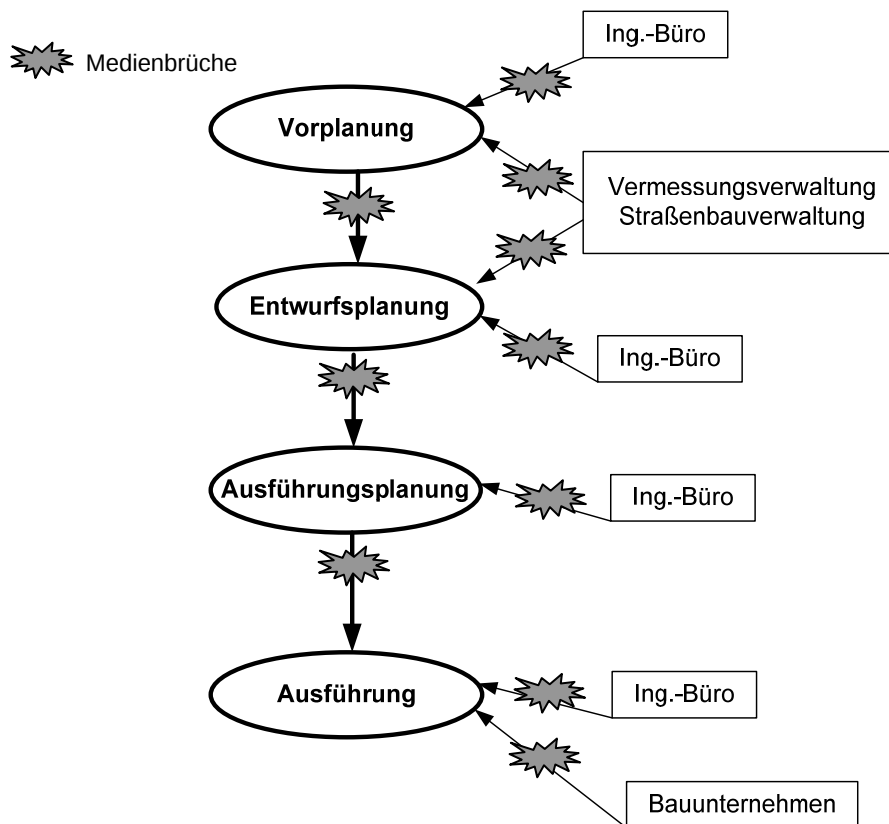


Abbildung 4.2: Planungsablauf im Straßenwesen (ähnlich OKSTRA 2003)

Der Straßenbau ist außerdem durch umfangreiche technische Regelwerke gekennzeichnet, die größtenteils von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen herausgegeben werden (Pietzsch und Wolf 2000 S. 13 ff.) und fachlich ausgerichtet sind. Mit der softwaretechnischen Überführung dieser Regelwerke in IT-Verfahren werden für den Fachfremden oft nicht eindeutig beschriebene Prozesse häufig falsch interpretiert, wodurch Daten verloren gehen (FGSV 2003 S. 12).

Bei dem Neu- und Ausbau einer Straße findet im Laufe der Planungs- und Bauprozesse eine Fülle von Schnittstellen Verwendung. Diese können, je nach Anwendungsfeld, entsprechend gewählt werden. Zum Beispiel gibt es Schnittstellen zum Datenaustausch mit geographischen Informationssystemen (GIS), zum Austausch von Rasterdaten, zur Übernahme digitaler Grundrissdaten aus der automatisierten Liegenschaftskarte der Vermessungsverwaltung usw. (FGSV 1997 S. 5 ff.). Deshalb ist es im ersten Schritt wichtig, einige relevante Schnittstellen zu erörtern.

4.2.1.2 Die DXF-Schnittstelle

DXF steht für (**D**rawing **EX**change **F**ormat) und dient dem Austausch von graphischen Daten. Das DXF stammt aus dem Jahre 1982 und wurde von Autodesk, Inc. entwickelt, um den Datenaustausch zwischen den verschiedenen AutoCAD-Versionen zu gewährleisten. Mittlerweile gehört das Lesen und Schreiben von DXF-Dateien zu jedem Grafikprogramm dazu (*Rudolf et al. 1993 S. 31*). Dabei handelt es sich nicht um ein genormtes Datenformat, das von einem offiziellen Gremium verwaltet und geprüft wird, sondern vielmehr um einen sog. „Industriestandard“, der von einer Firma, in diesem Fall Autodesk Inc., getragen wird (*Rudolf et al. 1993 S. 29 ff.*).

Die DXF-Schnittstelle erlaubt die Übertragung von reinen geometrischen Daten über ein einfaches Textformat. In allen Phasen eines Straßenplanungsprozesses werden jedoch nicht nur zahlreiche Zeichnungen und Pläne digital ausgetauscht, sondern auch Informationen, die diesen zugrunde liegen. Diese Informationen, wie beispielsweise Achselemente, Gradienten, Querprofile können über DXF-Schnittstellen nicht in Gänze weitergegeben werden.

4.2.1.3 REB/GAEB-Schnittstellen

Die „Regelungen für die elektronische Bauabrechnung“ (REB) und die zugehörigen Verfahrensbeschreibungen entstanden 1964 unter Mitwirkung mehrerer Instanzen, wie der Bundesanstalt für Straßenwesen und des Arbeitskreises „Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen“ (GAEB). Herausgegeben werden sie als „REB-Sammlung“ mit ergänzenden GAEB-Verfahrensbeschreibungen (VB) von der Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (*REB 1979*).

Die REB finden in erster Linie für die Regelung der Bauabrechnung Verwendung. Dies erfordert jedoch die Abstimmung der Ausschreibung und des Entwurfs von Bauwerken mit den dort definierten Regelungen. Die Verfahrensbeschreibungen streben die Vereinheitlichung aller beim Bau anfallenden geometrischen Lösungen und Berechnungsverfahren an, damit die Datenübergabe ohne weitere Bearbeitung ermöglicht wird. Dafür sind festgeschriebene Datenformate definiert. Bei der Einhaltung der Verfahrensbeschreibungen und deren Datenformate können die gleichen Ergebnisse im Rahmen einer festgelegten Tole-

ranz erzielt werden, wenn Berechnungen mit identischen Ausgangsdaten von verschiedenen Beteiligten durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden REB/GAEB-VB nicht nur zur Kontrolle und Prüfung von Bauabrechnungen, sondern auch zum Datenaustausch herangezogen (*FGSV 1997 S. 21*). Die Datenarten geben Informationen über Achse, Gradienten, Querprofile usw. wieder und sind jeweils mit einer einzelnen Datei beschrieben, die unabhängig weitergegeben werden kann.

4.2.1.4 STEP-2DBS-Schnittstelle

Das Akronym STEP steht für „**S**Tandard for the **E**xchange of **P**roduct Model Data“ und ist ein internationaler ISO-Standard mit der Bezeichnung ISO 10303. Diese Schnittstelle geht über den reinen Geometriedatenaustausch (wie bei DXF) hinaus. Mit STEP sollen möglichst alle Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus dargestellt und ausgetauscht werden können. Speziell für die Schnittstellen im Bauwesen ist Mitte der 80er Jahre ein Arbeitskreis DIN-NAM 96.4.3-Bau gegründet worden (*Haas 1993 S. 11 ff*). Die Arbeiten führten zur Entwicklung von einem STEP-basierten, bauspezifischen Austauschformat mit einer Zusatzbezeichnung 2DBS „2D Building Subset“.

4.2.2 Produktmodelle für den Hochbau

Die rasanten Entwicklungen in der Softwaretechnologie, insbesondere hinsichtlich Objektorientierung, führten zur Generierung von effizienteren Datenaustauschformaten zwischen Applikationen. Dabei setzte sich der Produktmodellansatz durch, indem alle Daten eines Produktes, also Bauprojektes, in eine neutrale und unabhängige Umgebung strukturiert gespeichert werden. Das Produktmodell kann dann in Applikationen unterschiedlicher Disziplinen integriert und dadurch die Daten unter heterogenen Umgebungen ausgetauscht werden. Die Daten umfassen in diesem Fall, neben der Geometrie, viele andere Informationen über jedes Produktteil, wie Materialien, Mengen, Kosten etc. Der nächste Schritt war folglich, die Produktmodelle zu standardisieren, wie am Beispiel STEP zu beobachten ist.

Heute ist STEP als eine Serie von ISO 10303-Standards definiert, die neben den eigentlichen Modellen zur Beschreibung von Produktdaten (Integrated Resources, Application Protocols) auch Beschreibungsmethoden (Description Methods), Implementierungsmethoden (Implementation Methods) und Methoden zum Konformitätstest (Conformance

Testing Methodology and Framework) enthält. Demnach kann STEP als „ein 'Baukasten' aufgefasset werden, mit dem anwendungsspezifische Produktdatenmodelle (Application Protocols) unter Verwendung von Grundbausteinen (Integrated Resources) nach definierten Regeln und genormten Methoden beschrieben werden können“ (*ProSTEP 2006*).

Basierend auf die STEP-Technologie entwickelte die International Alliance for Interoperability (IAI) - ein ISO untergruppirtes, industriebasiertes Konsortium für Architecture, Engineering, Construction und Facility Management (AEC/FM) - Mitte der 90er Jahre ihren eigenen Standard, die Industry Foundation Classes (IFC). IFC ist ein Basismodell zur objektorientierten Beschreibung von Bauelementen eines Gebäudes, das zum Austausch von Geometrie und vielen anderen Informationen zwischen unterschiedlichen Softwaresystemen dient. Damit entfernt sich der IFC-Standard von dem offenen und freien Entwicklungsprinzip des STEP-Standards, weil dieser als ein einzelnes, von IAI-Partnern definiertes Modell weiterentwickelt wird.

4.2.3 Produktmodelle für den Straßenbau

Die Bemühungen zur Standardisierung von Produktmodellen konzentrierten sich mehr auf Hochbau- als auf Infrastrukturprojekte. Dies führte zur Verbreitung der Schnittstellen DXF und REB, neben anderen Austauschformaten, die von den einzelnen Entwicklungsfirmen der Straßenplanungssysteme definiert werden. Dennoch wurden in dem letzten Jahrzehnt spezielle Produktmodelle für den Straßenbau entwickelt. Die wesentlichen werden in den nächsten Abschnitten aufgeführt.

4.2.3.1 LandXML

In den letzten Jahren hat sich die neue Internet-Technologie eXtensible Markup Language (XML) rasch verbreitet. XML ist ein grundlegender Standard, der von dem Standard Generalized Markup Language (SGML) (*ISO 8879*) abgeleitet und unter der Schirmherrschaft von der World Wide Web Consortium (W3C) 1996 als ein einfaches Textformat mit flexiblen Formatierungsregeln entwickelt wurde. Ursprünglich war diese Technologie für den Datenaustausch im Netz gedacht, wird jedoch zunehmend auch für den Datenaustausch zwischen Applikationen eingesetzt. Basierend auf dieser Technologie wurde im Bereich der AEC Industrie ein weiteres Format mit dem Namen aecXML, parallel zu IFC, entwi-

ckelt, das mittlerweile auch in XML verfügbar ist. Wie schon erwähnt, stellen die IFC eine Möglichkeit zur Datenhaltung eines kompletten Projektes in einem Modell dar, das von mehreren Projektbeteiligten genutzt werden kann. Dagegen wird aecXML nicht für die Datenhaltung eingesetzt, sondern dient der Übertragung von speziellen Informations-Paketen eines Geschäftsvorganges via Internet (*LAI 2006*).

Im Rahmen des aecXML, das mittlerweile auch von IAI gepflegt wird, wurden spezifische Schemata entwickelt. Eines davon ist LandXML, das anfänglich von Autodesk entwickelt wurde. LandXML dient in erster Linie für Vermessung und Baumaßnahmen der Infrastrukturprojekte und soll Projektdaten für alle Beteiligten bereitstellen, die über verschiedene CAD- und Informationssysteme auf diese Daten zugreifen. Die Version 1.0 von LandXML wurde in 2002 herausgegeben (*LandXML 2006*).

4.2.3.2 OKSTRA

Der Ablauf von Planung, Gestaltung und Entwurf im Zuge einer Straßenbaumaßnahme ist größtenteils einheitlich und erfolgt durchgehend elektronisch. Dies wird dadurch begünstigt, dass die Bauweisen weitgehend standardisiert sind und die in Deutschland geltenden Richtlinien die Anwendung gleichartiger Parameter vorschreiben. Die zuvor beschriebenen Schnittstellen reichen jedoch oft nicht mehr aus, um alle Informationen zu übertragen. Deshalb ist nicht nur die Standardisierung des Datenaustauschs, sondern auch die Anbindung der Straßenplanungssysteme aneinander und an andere benachbarten Systeme, wie Vermessung oder Verkehrswesen, notwendig. Mit diesem Ziel begann 1995 die Entwicklung von OKSTRA (*FGSV 2003 S.22*).

OKSTRA steht für „Objekt Katalog für das STRaßen- und Verkehrswesen“ und wird von der Bundesanstalt für Straßenwesen gepflegt. In diesem Katalog sind standardisierte Objekte des Straßen- und Verkehrswesens in Form eines Schemas definiert. Die Standardisierung wurde dadurch erreicht, dass das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen BMVBW am 15.05.2000 OKSTRA als bundesweiten Standard für den Bereich der Bundesfernstraßen vorschrieb und als Anwendungsempfehlung für die Straßenbauverwaltung der Länder herausgab (*FGSV 2003 S.22*).

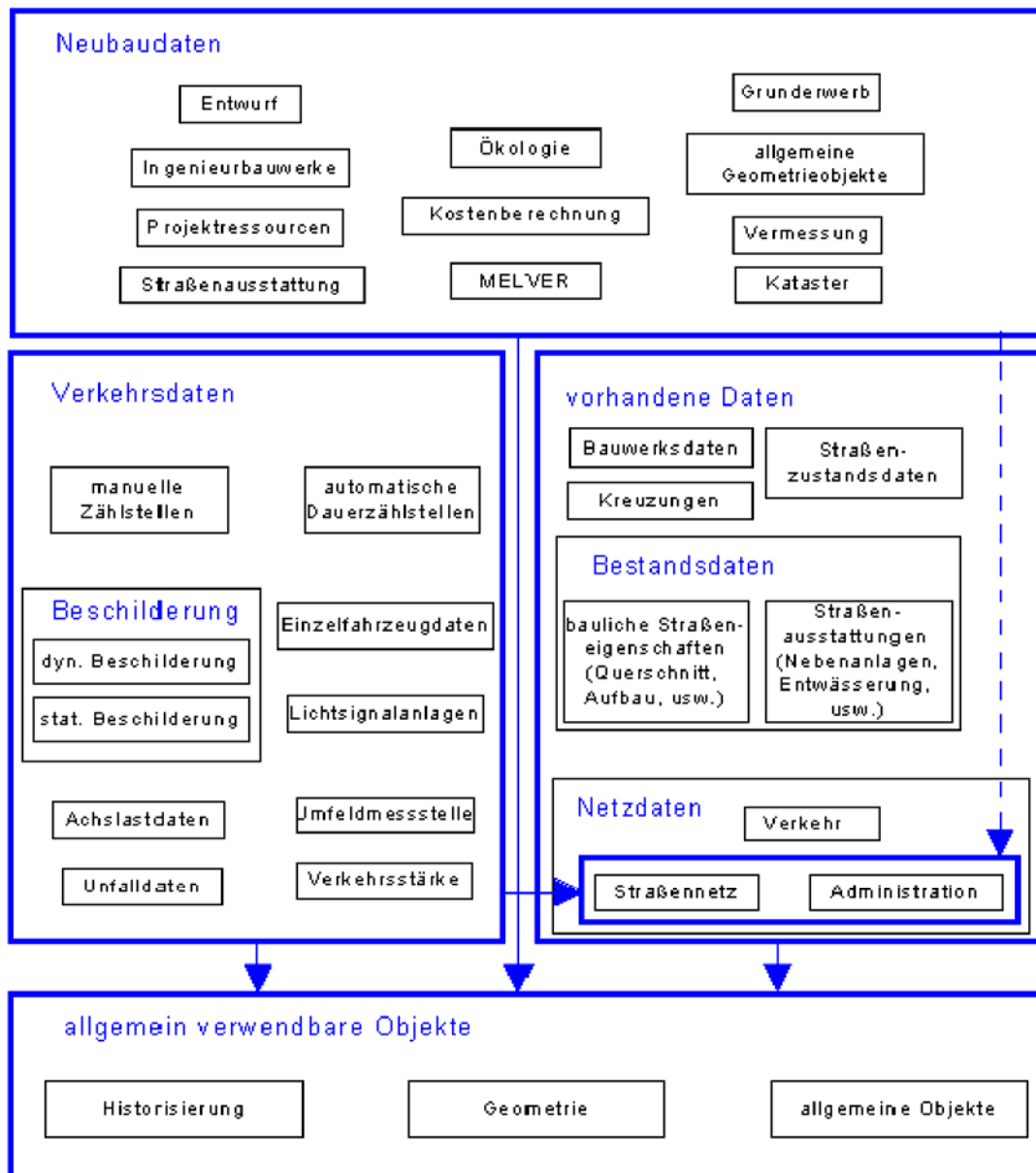


Abbildung 4.3: Die Schemata des OKSTRA (OKSTRA 2006)

Mit OKSTRA ist die Verknüpfung aller relevanten Daten mit einem Schema realisiert, so dass diese in einer einzigen Datei weitergegeben werden können. Das Schema umfasst verschiedene Fachschemata und ist in der Abbildung 4.3 dargestellt, wobei jedes Schema durch ein Rechteck repräsentiert ist und zusammengehörige Schemata durch ein zusätzliches Rechteck umrandet sind. Die Abhängigkeiten der Schemata untereinander sind durch Pfeile beschrieben. Die Beschreibung dieses Schemas ist in mehreren Formaten, NIAM, EXPRESS, SQL, CTE und seit 2004 auch in XML verfügbar (FGSV 2003 S.46 ff.).

Die Umsetzung des OKSTRA in die Praxis ist trotz dieser fortschreitenden Entwicklung noch in den Anfängen und wird nur von wenigen Anbietern von Straßenplanungssystemen realisiert. Das Standardaustauschformat ist dabei das OKSTRA-CTE (Clear Text Encoding, ISO 10303-21 aus dem EXPRESS Schema), lediglich einer der Anbieter (VESTRA der Firma AKG) ‚kennt‘ auch das Format OKSTRA-XML.

4.2.4 Paradigmen der Produktmodelle

Die zuvor vorgestellten Produktmodelle für eine Straße repräsentieren den derzeitigen Trend zur Entwicklung eines einzelnen integrierten Modells, in dem alle relevanten Daten über den gesamten Lebenszyklus eines Projektes strukturiert gespeichert werden. Sowohl im Tief- als auch im Hochbau neigt dieses Projektmodell zur Komplexität, weil dauernd zusätzliche Aspekte integriert werden müssen. Diese zunehmende Komplexität macht das Modell unwirtschaftlich und stellt somit das ganze Verfahren in Frage, zumal es in der Bauindustrie keinen Projektbeteiligten gibt, der sich für den gesamten Inhalt des Projektmodells interessiert. Dieses Problem wird schon von vielen Forschern thematisiert (*Rebolj 2002; Kam und Fischer 2002 und Kiviniemi et al. 2005*).

Die Kritik an dem Ansatz eines einzelnen integrierten Produkt- bzw. Projektmodells richtet sich im Allgemeinen auf seine Komplexität und darauf, dass, je nach Disziplin, das Modell eines Projektes unterschiedlich strukturiert wird und andere Informationen beinhalten muss (*Kiviniemi et al. 2005*). Ein weiteres Problem ist die Kompatibilität der in dem Produktmodell definierten Datenstruktur mit der Datenstruktur, die den jeweiligen, in einem bestimmten Bereich angewandten Tools zugrunde liegt (*Rebolj 2002*). *Tibaut und Rebolj (2002)* vergleichen die Idee eines einzigen, alles umfassenden Produktmodells mit der Anwendung einer einzigen Sprache für die ganze Menschheit. Selbst wenn solch eine Sprache existieren würde, würde es nicht lange dauern, bis Dialekte entstehen, und zwar deshalb, weil die Menschen den gleichen Gegenstand aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten. Demnach, vermuten *Tibaut und Rebolj*, dass der einzige „Standard“ die Vielfalt an Standards ist. Dies ist eine Aussage, die die heutige Landschaft in der Produktmodellwelt bestätigt.

Hannus et al. (1994) beschreiben einige alternative Ansätze zum Datenaustausch in der AEC Industrie. Schon zur Zeit dieser Veröffentlichung wurde der Ansatz von einem neut-

ralen Modell, also einem Produktmodell, so beschrieben, dass ein solches Modell an Volumen und Komplexität immer zunimmt. In diesem Fall werden „Softwareanbieter-Lobbyisten“ versuchen, spezifische Eigenschaften aus ihren Programmen in den Standard zu integrieren (*Hannus et al. 1994*), wie man an der Entwicklung von IFC beobachten kann.

Im Folgenden werden zwei Lösungsansätze für die geschilderten Probleme vorgestellt, die zur Argumentation des im nächsten Abschnitt aufgeführten Ansatzes zur Integration von CAD und Simulation dienen. Der erste Lösungsansatz beschreibt ein virtuelles Produktmodell, das durch ein kommunikatives Netz aus locker gekoppelten Teilmodellen repräsentiert wird. Die Teilmodelle sind mit einfachen aber starken Regeln verbunden, wobei ihre Beziehungen zueinander und zu ihrer Umgebung durch ein Prozessmodell beschrieben sind (*Tibaut und Rebolj 2002*).

Der zweite Ansatz vertritt die Meinung, dass die Unterstützung von unterschiedlichen anwendungsbereichsspezifischen Sichtweisen eines Produktes eine Voraussetzung zum Einsatz von integrierten Produktmodellen in der Praxis darstellt, aber ohne Verlinkung dieser Modelle können Veränderung in einem Modell schnell von einem anderen übersehen werden. Deshalb stellen die Links zwischen diesen Submodellen eine Notwendigkeit für ein effizientes Informationsmanagement dar (*Kiviniemi et al. 2005*).

4.3 Argumentation der Entwicklung eines simulationsrelevanten Produktmodells

Die Konzeption und Festlegung der Schnittstelle zur Integration von CAD und Simulation bedarf der Ergründung vorhandener Schnittstellen in der softwaretechnischen Umgebung, die Gegenstand der vorigen Abschnitte dieses Kapitels ist. Gespräche mit Straßenplanern ergaben, dass die Schnittstellen DXF und REB in der Praxis intensiver eingesetzt werden, als vorhandene Produktmodelle. Produktmodelle werden in der Praxis eher von den entwickelnden Systemanbietern und ihren Planungsbüros zum Datenaustausch verwendet.

Die Produktmodelle von einer Straße, wie OKSTRA und LandXML, sind ursprünglich für Vermessung und Planungszwecke entwickelt worden und erfüllen aus diesem Grunde deren Perspektive. Deshalb betrachten sie das Produkt, also die Straße, als eine Achse, die

aus mehreren Achselementen besteht. Aus Sicht der Simulation soll die Straße jedoch anders strukturiert werden. Für Simulationszwecke werden zudem, zusätzlich zur Geometrie, große Mengen an Daten benötigt, die zurzeit in den Produktmodellen nicht enthalten sind. Folglich wäre die erste Aufgabe, diese simulationsrelevanten Daten zu erfassen und entsprechend als Ergänzungen zu den Produktmodellen zu strukturieren.

Bei OKSTRA erfolgte kürzlich die Integration des Teilschemas ‚Bauabrechnung‘ im Zuge der Entwicklung des Schemas „Kostenberechnung“, siehe Abbildung 4.3. Selbst dieses Schema entspricht einer für die Simulation geeigneten Strukturierung nicht. Sie orientiert sich eher an der Datenstruktur der AVA-Programme und teilt die Baustelle in Positionen auf.

Aus den bisherigen Überlegungen und Beobachtungen ergeben sich folgende Erkenntnisse, die als Basis zur Entwicklung des Konzeptes für die Integration von CAD und Simulation dienen:

- Die wesentlichen integrierten Produktmodelle im Straßenbau sind OKSTRA und LandXML, wobei sich OKSTRA an den deutschen Regelwerken orientiert. Diese Regelwerke finden in dem eher internationalen Standard LandXML keine Umsetzung.
- Sowohl OKSTRA als auch LandXML enthalten nicht alle erforderlichen simulationsrelevanten Daten, so dass für die Simulation komplett neue Datenstrukturen erforderlich wären. Lediglich die in diesen Produktmodellen enthaltenen Geometriedaten sind für die Simulation von Bedeutung.
- Der Ansatz der integrierten Produktmodelle wird in vielen Forschungsarbeiten als komplex, unwirtschaftlich und unflexibel beschrieben. Eine Erweiterung um simulationsrelevante Strukturen, die in diesem Fall eine neue Sichtweise darstellen, würde die Komplexität steigern. Außerdem ist die Integration eines umfassenden Produktmodells für Simulationszwecke unwirtschaftlich.
- Die neuesten Lösungsansätze empfehlen die Entwicklung von „kleinen“ spezifischen Produktmodellen, die für einen gesonderten Anwendungsbereich relevant sind.

Diese Teilproduktmodelle können durch ein Anforderungsmodell (Requirements model) (Kiviniemi *et al.* 2005) oder intelligente Agenten (Tibaut und Rebolj 2002) verlinkt werden.

- Sowohl im Hoch- als auch im Straßenbau gilt XML als die am weitesten verbreitete Beschreibungssprache von Produktmodellschemata.

In Anbetracht dieser Erkenntnisse wurde unabhängig von einem Hauptproduktmodell, wie OKSTRA oder LandXML, ein simulationsrelevantes Produktmodell (SRM) entwickelt. In diesem SRM sind alle Daten für die Bauablaufsimulation enthalten, wobei sich die Datenstruktur der Straßenbaustelle an der baubetrieblichen Praxis orientiert. Als Argumentation dafür, dass SRM nicht als Erweiterung eines vorhandenen Produktmodells entwickelt wurde, können die Kritikpunkte und die neuen Lösungsansätze für verlinkte Teilproduktmodelle in Betracht gezogen werden. SRM ist somit als ein Teilproduktmodell zu verstehen, und eine Verlinkung, wie bei den oben beschriebenen Arbeiten, nicht Gegenstand dieser Arbeit ist. Es wird lediglich die Anbindungsmöglichkeit an OKSTRA im Abschnitt 4.5 schematisch demonstriert. Um jedoch eine solche Verlinkung zukünftig zu ermöglichen, wird die gleiche IT-Infrastruktur für die Entwicklung des Schemas für SRM verwendet, nämlich XML.

Demzufolge enthält SRM die Aufbaustruktur einer Erdbaustelle und die Reihenfolge des Bauablaufs mit den notwendigen Daten zur Parametrisierung der Simulation. Außerdem kann das Schema des SRM zur Implementierung in unterschiedliche CAD oder Simulationsumgebungen integriert werden. Zusätzliche Geometriedaten, die nicht aus den anderen Schnittstellen oder Produktmodellen übernommen werden, sind ebenfalls in SRM erfasst. Zum Beispiel werden temporäre Förderwege meist nicht vermessungstechnisch aufgenommen, sondern nur mittels CAD skizziert. Diese Informationen werden nur in CAD gespeichert, sind jedoch auch für die Simulation notwendig. Deshalb werden derartige geometrische Daten ebenfalls in SRM erfasst und berücksichtigt.

4.4 Beschreibung des simulationsrelevanten Produktmodells SRM

4.4.1 Architektur des SRM

Die hierarchische Struktur des SRM orientiert sich an der in der Praxis üblichen Gliederung der Arbeitsprozesse. Sie wird sowohl in CAD als auch in die Simulation integriert, um einen nahtlosen Datenübergang gewährleisten zu können. Die nahtlose Datenstruktur zwischen den integrierten Systemen ist eines der Ziele, die mit dem SRM verfolgt werden. Ein weiteres Ziel ist die Datenhaltung in einer systemunabhängigen Umgebung, die zur Archivierung der Daten genutzt werden kann.

Nach SRM besteht ein Straßenbauprojekt aus vier Typen von Arbeitsstellen: Einschnitt, Damm, Zwischenlager und Deponie, die mehrfach vorkommen können und im Modell als Elemente repräsentiert werden, siehe Abbildung 4.4. Diese vier Arbeitsstellen sind durch einen weiteren Typ, den Förderweg, miteinander verbunden. Das Modell konzentriert sich exemplarisch auf den Einschnitt und teilt diesen in Arbeitsabschnitte ein. Die Arbeitsabschnitte unterscheiden sich generell hinsichtlich der technologischen Einsatzbedingungen, z.B. Bodeneigenschaften, und der einzusetzenden Maschinen sowie anzuwendenden Verfahren. Darüber hinaus können diese Abschnitte durchaus die Ausführungsschichten modellieren, wenn eine genauere Abbildung benötigt wird.

Die einzelnen Arbeitsabschnitte können wiederum manuell in Erdkörper mit unterschiedlichen Einsatzbedingungen unterteilt werden, die in einer feineren Betrachtung in sich geschlossene Einheiten bilden. Somit ist eine geometrische Einteilung des Raumes in einzelne Einheiten, mit kennzeichnenden Eigenschaften, realisiert, um den dynamischen Ablauf besser dokumentieren zu können. Diese Dokumentation gibt zugleich mittels Simulation Auskunft über die Nutzung des einzelnen Betriebsmittels und über die Mengenverteilung. Die Einheiten der Erdkörper sind unregelmäßig, im Gegensatz zu den bisherigen Entwicklungen, die den Raum in regelmäßige, homogene und kleinste Einheiten zerlegt (*Mather 1996, Xu 2001, Xu 2003 und Akbas 2004*). Die Erdkörper können in der Simulation, entsprechend der eingesetzten Maschinen, zerlegt werden, so dass keine Notwendigkeit zu dieser Einteilung in CAD mehr besteht. Wenn in einem Arbeitsabschnitt beispielsweise drei Bagger arbeiten, können drei Erdkörper gebildet werden, die ungefähre Arbeitsmen-

gen für jeden Bagger darstellen und somit unterschiedliche Spielzeiten und Einsatzbedingungen genauer abbilden können. Das gleiche gilt, wenn Bodenmengen aus einem Arbeitsabschnitt in unterschiedliche Zielstellen und über unterschiedliche Wege gefördert werden. Das SRM umfasst somit nicht nur Produkt-, sondern auch Prozessmodellierungskomponenten.

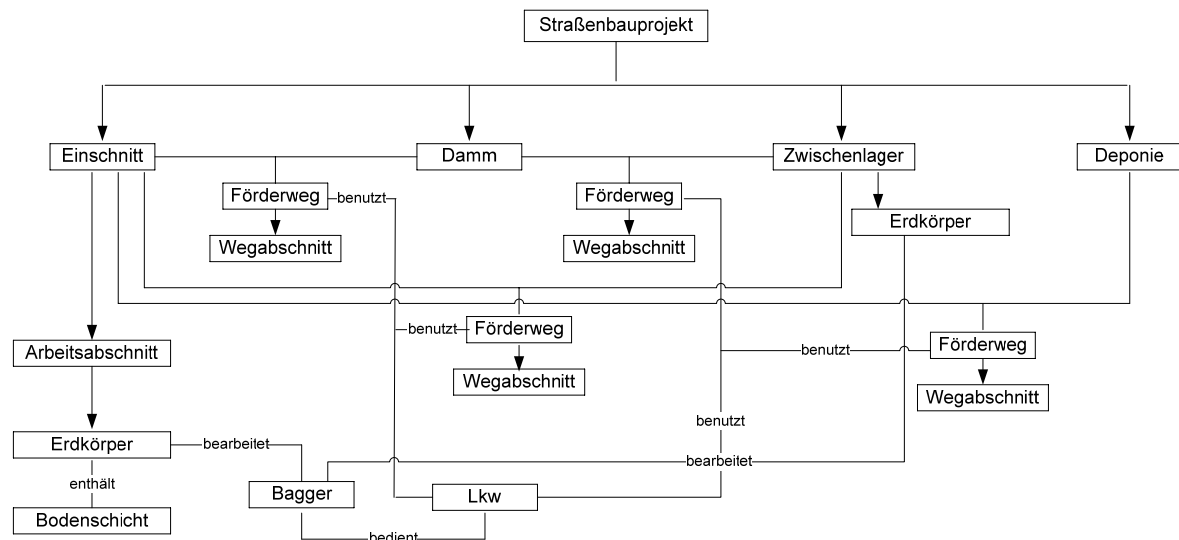


Abbildung 4.4: Die Architektur des SRM

In dieser Modellbildung wird ein Erdkörper von einem bestimmten Bagger ausgehoben, der von einer festgelegten Anzahl Lkw bedient wird. Um die Betriebsmittel, Lkw und Bagger, abbilden zu können, sind zwei zusätzliche Elemente erforderlich. Der Lkw verwendet einen Förderweg, um den Boden zu einem Ziel zu transportieren. Zudem enthält ein Erdkörper Boden aus einer bestimmten Bodenschicht, deren Eigenschaften ebenfalls in einem gesonderten SRM-Element aufgeführt sind. Die Erdkörper, die auf Zwischenlager kommen, werden im nächsten Schritt von Baggern bearbeitet und mit den Lkw über einen Förderweg zu einem Damm gefahren. Die Förderwege werden in Abschnitte unterteilt, um Strecken mit unterschiedlichen Eigenschaften, die die Lkw-Geschwindigkeit beeinflussen, beschreiben zu können.

4.4.2 Klassendiagramm des SRM

Die Elemente des SRM und deren Beziehungen sind Gegenstand des vorigen Abschnittes und werden anhand Abbildung 4.4 komprimiert dargestellt. Eine ausführlichere Darlegung

des Inhaltes in einer schematischen Form zur Umsetzung des SRM in ein Austauschformat beinhaltet zusätzlich die Eigenschaften dieser Elemente. Mit Hilfe der UML-Sprache (Unified Modeling Language), die bei der Lösung objektorientierter Probleme angewendet werden kann, kann der Inhalt des SRM im Voraus dokumentiert und strukturiert dargestellt werden. In der objektorientierten Programmierung besteht ein Modell, das als eine Abstraktion des abgebildeten Systems zu verstehen ist, aus Objekten, die Nachrichten untereinander austauschen. In einem Objekt sind Eigenschaften und Methoden bzw. Operationen gekapselt. Beispielsweise zählen ‚Länge‘, ‚Breite‘, ‚Höhe‘, ‚Material‘ etc. als Eigenschaften eines Bauteil-Objektes, während ‚herstellen‘, ‚transportieren‘, ‚montieren‘ etc. als Operationen zu verstehen sind. Die Bezeichnung ‚Klasse‘ steht für ein Muster, von dem beliebig viele Objekte generiert werden können.

Speziell die so genannten Klassendiagramme werden in UML für das Abbilden der zeitunabhängigen Struktur des Modells verwendet. Ein UML-Klassendiagramm stellt eine Klasse als ein in drei Teilen gegliedertes Rechteck dar mit Klassenname, Eigenschaften und Operationen. Die Klassen werden mit unterschiedlichen Beziehungen verbunden. Die Multiplikationen auf einem Ende einer Beziehung deuten auf die Anzahl möglicher Instanzen, also Objekte, hin. Die hier verwendeten Beziehungen beschränken sich auf zwei Arten:

- Assoziationen, die als eine einfache Verbindung mit eventueller Beschreibung der Art dieser Beziehung dargestellt werden, wie in der Abbildung 4.5 zwischen den Klassen ‚Bagger‘ und ‚Lkw‘, wobei die letztere den ‚Bagger‘ bedient, und
- Kompositionen zum Abbilden einer starken Assoziation, in der ein Teil einem einzigen Ganzen gehört. Sie werden mit einer gefüllten Karo Pfeilspitze an dem Ende des Ganzen gekennzeichnet. Die Komposition zwischen ‚Einschnitt‘ und ‚Abschnitt‘ in der Abbildung 4.5 ist ein Beispiel für solche Arten von Beziehungen.

Die Abbildung 4.5 repräsentiert das Klassendiagramm für das SRM mit den bereits im vorigen Abschnitt erläuterten Elementen, die hier als Klassen bezeichnet werden. In einem Klassendiagramm, das zur Datenhaltung in einem Datenaustausch-Modell dient, werden meist nur die Eigenschaften einbezogen. Die Eigenschaften des SRM sind Daten, die unmittelbar in die Simulation fließen, wie die Eigenschaft ‚Verteilung‘ der Klasse ‚Bagger‘,

oder welche, die für die Berechnung von simulationsrelevanten Daten erforderlich sind, wie die Eigenschaft ‚Rollwiderstand‘ der Klasse ‚Wegabschnitt‘.

Andere Daten werden dagegen im Modell nur dokumentiert und archiviert, wie die Eigenschaft ‚Layer‘ der Klasse ‚Abschnitt‘. Die Klassen des SRM sind über zwei Arten von Beziehungen miteinander verbunden, die eine hierarchische Unterteilung, wie zwischen ‚Baustelle‘ und ‚Einschnitt‘ oder eine Verbindung ausdrücken, wie zwischen ‚Bagger‘ und ‚Lkw‘. Die Klasse ‚Förderweg‘ verbindet mehrere Klassen zusammen, wie ‚Einschnitt‘ und ‚Damm‘ und ist im Diagramm zur Übersichtlichkeit ohne Eigenschaften dargestellt. Die Eigenschaften dieser Klasse sind also nur einmal neben dem Diagramm aufgeführt. An allen anderen Stellen wird lediglich auf sie hingewiesen, in dem die Klasse nur mit Namen erwähnt wird, siehe Abbildung 4.5.

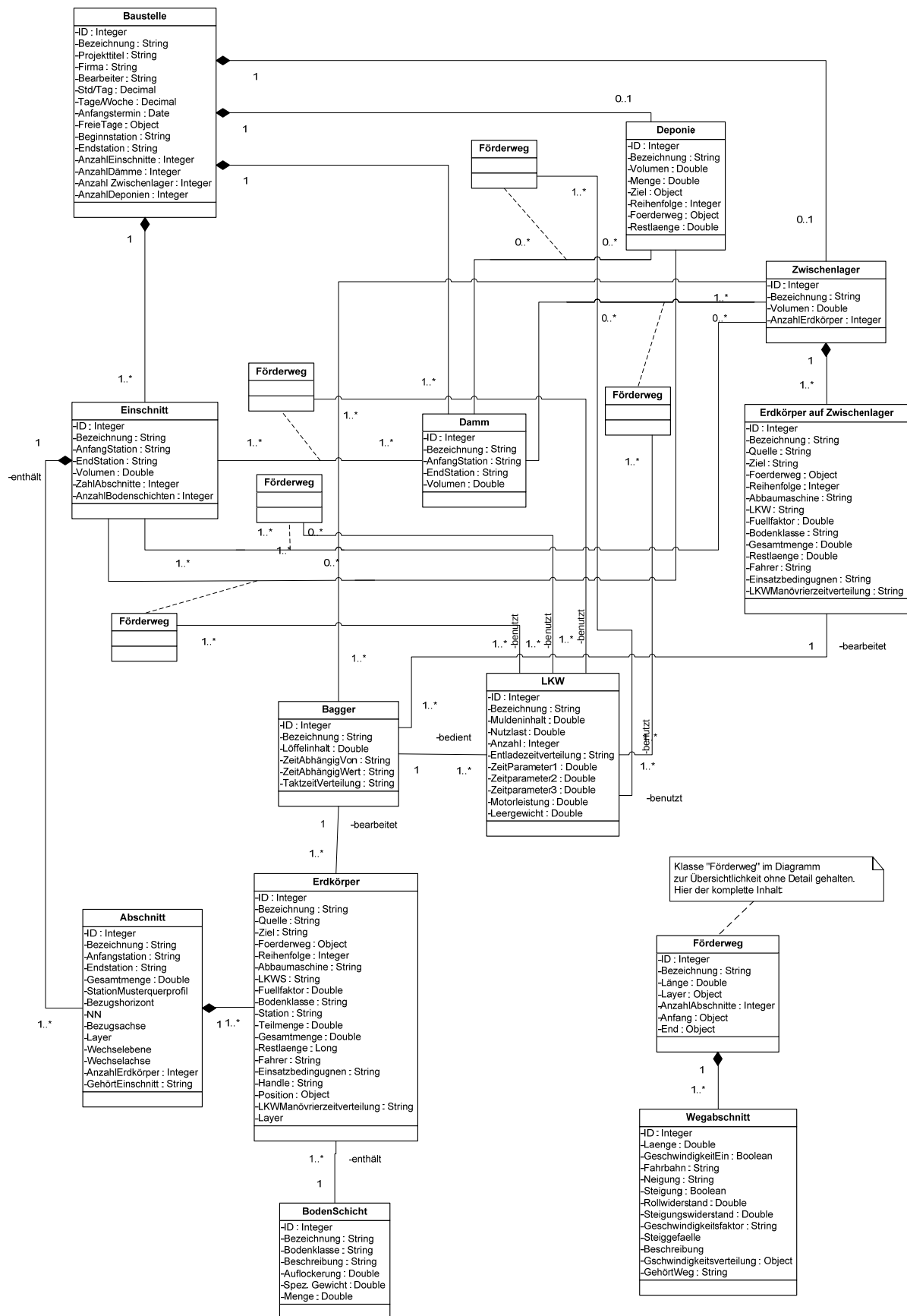


Abbildung 4.5: Das Klassendiagramm des SRM

4.4.3 Umsetzung des SRM in ein XML-Schema

SRM wird in XML-Format beschrieben und gespeichert. Ein wohlgeformtes XML-Dokument muss einige Einschränkungen berücksichtigen. Diese sind in einem Schema aufgeführt und repräsentieren die Grammatik zum Schreiben von darauf aufbauenden XML-Dokumenten. Aus den unterschiedlichen vorhandenen Sprachen zur Schema-Definition wurde die XML Schema Definition (XSD) gewählt, um SRM zu beschreiben, siehe Abbildung 4.6.

```

35 <xs:element name="Bearbeiter" type="xs:string"/>
36 <xs:element name="StdproTag" type="xs:double"/>
37 <xs:element name="TageproWoche" type="xs:double"/>
38 <xs:element name="Anfangstermin" type="xs:NMTOKEN"/>
39 <xs:element name="FreieTage" type="xs:NMTOKEN"/>
40 <xs:element name="StationBeginn" type="xs:NCName"/>
41 <xs:element name="StationEnde" type="xs:NCName"/>
42 <xs:element name="AnzahlEinschnitte" type="xs:integer"/>
43 <xs:element name="AnzahlDaemme" type="xs:integer"/>
44 <xs:element name="AnzahlZwischenlager" type="xs:integer"/>
45 <xs:element name="AnzahlDeponien" type="xs:integer"/>
46 <xs:element name="Einschnitt">
47 <xs:complexType>
48 <xs:sequence>
49 <xs:element ref="Bezeichnung"/>
50 <xs:element ref="AnfangStation"/>
51 <xs:element ref="Endstation"/>
52 <xs:element ref="Volumen"/>
53 <xs:element ref="ZahlAbschnitte"/>
54 <xs:element ref="AnfangKoordinaten"/>
55 <xs:element ref="EndKoordinaten"/>
56 <xs:element minOccurs="0" maxOccurs="unbounded" ref="Abschnitt"/>
57 </xs:sequence>
58 <xs:attribute name="id" use="required" type="xs:integer"/>
59 </xs:complexType>
60 </xs:element>
61 <xs:element name="ZahlAbschnitte" type="xs:string"/>
62 <xs:element name="AnzahlBodenschichten" type="xs:integer"/>
63 <xs:element name="Abschnitt">
64 <xs:complexType>
65 <xs:sequence>
66 <xs:element ref="Bezeichnung"/>
67 <xs:element ref="Anfangsstation"/>
68 <xs:element ref="Endstation"/>
69 <xs:element ref="Gesamtmenge"/>
70 <xs:element ref="StationMusterquerschnitt"/>
71 <xs:element ref="Bezugshorizont"/>
72 <xs:element ref="NN"/>
73 <xs:element ref="Bezugsachse"/>
74 <xs:element ref="Layer"/>
75 <xs:element maxOccurs="unbounded" ref="Wechselebene"/>
76 <xs:element maxOccurs="unbounded" ref="Wechselachse"/>
77 <xs:element ref="AnzahlErdkoerper"/>
78 <xs:element ref="GehoeertEinschnitt"/>
79 <xs:element ref="AnfangsKoordinaten"/>
80 <xs:element ref="EndKoordinaten"/>
81 <xs:element minOccurs="0" maxOccurs="unbounded" ref="Erdkoerper
</Erdkoerper>
<Erdkoerper id="2">
  <Bezeichnung>Erk2</Bezeichnung>
  <Quelle>1</Quelle>
  <Quelle>2</Quelle>
  <Ziel>1</Ziel>
  <Ziel>2</Ziel>
  <ErdFoerderweg>1</ErdFoerderweg>
  <Reihenfolge>3</Reihenfolge>
  <Abbaumaschine>3</Abbaumaschine>
  <LKWS>Volvo</LKWS>
  <LKWS>Man</LKWS>
  <LKWS>Man</LKWS>
  <LKWS>Volvo</LKWS>
  <Fuellfaktor>1.1</Fuellfaktor>
  <Bodenklasse>2</Bodenklasse>
  <Station>120</Station>
  <Station>140</Station>
  <Station>160</Station>
  <Station>180</Station>
  <Teilmenge>500</Teilmenge>
  <Teilmenge>500</Teilmenge>
  <Teilmenge>3500</Teilmenge>
  <Teilmenge>4500</Teilmenge>
  <Teilmenge>10000</Gesamtmenge>
  <Teilmenge>680</Restlaenge>
  <Fahrer></Fahrer>
  <Einsatzbedingungen></Einsatzbedingungen>
  <Handle></Handle>
  <Position></Position>
  <Verteilung>
    <Verteilungsart>Normal</Verteilungsart>
    <Parameter1>0.49</Parameter1>
    <Parameter2>0.23</Parameter2>
    <Parameter3>0</Parameter3>
  </Verteilung>
  <Layer></Layer>
</Erdkoerper>
<Erdkoerper id="3">
  <Bezeichnung>3</Bezeichnung>
  <Quelle>1</Quelle>
  <Quelle>2</Quelle>
  <Ziel>1</Ziel>
  <Ziel>2</Ziel>
  <ErdFoerderweg>1</ErdFoerderweg>
  <Reihenfolge>3</Reihenfolge>
  <Abbaumaschine>4</Abbaumaschine>

```

Abbildung 4.6: XSD-Schema und XML-Dokument des SRM

Um mit XML-Daten innerhalb einer Applikation arbeiten zu können, muss das XML-Dokument geparkt werden. Dies wird von Parsern bewältigt, deren Aufgaben darin bestehen, ein XML-Dokument auf Wohlgeformtheit zu prüfen und eine Klassenbibliothek zur Anbindung an Programmierschnittstellen zu generieren. Eines der Konzepte zur Erfüllung der letzteren Aufgabe ist das Document Object Model (DOM), mit dem die Dokumentenstruktur in Objekte mit Baumstruktur überführt wird. DOM kann dann mit der integrierten Umgebung verbunden und somit die XML-Daten darin eingebunden werden.

Auf diese Weise werden XML-Elemente zu Objekten, die über die integrierte Umgebung – in diesem Fall das CAD-System – angesprochen werden. Das CAD-System kann so ein XML-Dokument entsprechend dem XSD-Schema generieren. Die Eigenschaften der Objekte des SRM, siehe Abbildung 4.6, welche in CAD eingegeben oder daraus extrahiert werden, werden dann als XML-Daten geschrieben. Diese Daten werden anschließend in das Simulationssystem eingelesen.

4.5 Anbindungsmöglichkeiten an OKSTRA

Wie im Abschnitt 4.3 erläutert wurde, zielt der entwickelte Ansatz des simulationsrelevanten Produktmodells auf die Definition einer neuen Form der Integration von CAD und Simulation im baubetrieblichen Bereich an. Ausgehend von den dort aufgeführten Argumenten wird das SRM unabhängig von einem Straßenproduktmodell, jedoch unter Berücksichtigung derselben softwaretechnischen Infrastruktur entwickelt. Eine realitätsnahe Simulation erfordert, neben der Geometrie, eine große Menge an Daten, die in den bekannten Produktmodellen nicht enthalten sind. Die vorliegende Arbeit definiert solche Daten für eine aufgabenspezifische Simulation und sieht eine Notwendigkeit zur Verlinkung von Teilproduktmodellen, die unterschiedliche Sichtweisen repräsentieren.

Eine weitere Möglichkeit wäre jedoch, ein vorhandenes Produktmodell um SRM zu erweitern und die Kompatibilität der Simulationstools mit diesem erweiterten Produktmodell zu sichern. In diesem Abschnitt soll exemplarisch aufgezeigt werden, wie der Prozess der Erweiterung von OKSTRA um SRM aussehen könnte, siehe Abschnitt 4.5. Um dies wirklich in die Realität umsetzen zu können, bedarf es unter anderem eines starken Engagements in den Forschungsgremien, welche die Weiterentwicklung von OKSTRA betreuen,

also FGSV. Ein ähnlicher Prozess wäre ebenfalls für Simulatoren und Produktmodelle des Hochbaus, wie IFC, denkbar und würde die Integration der Simulation in das Managementgefüge fördern und somit ihren Zugang zur Praxis begünstigen.

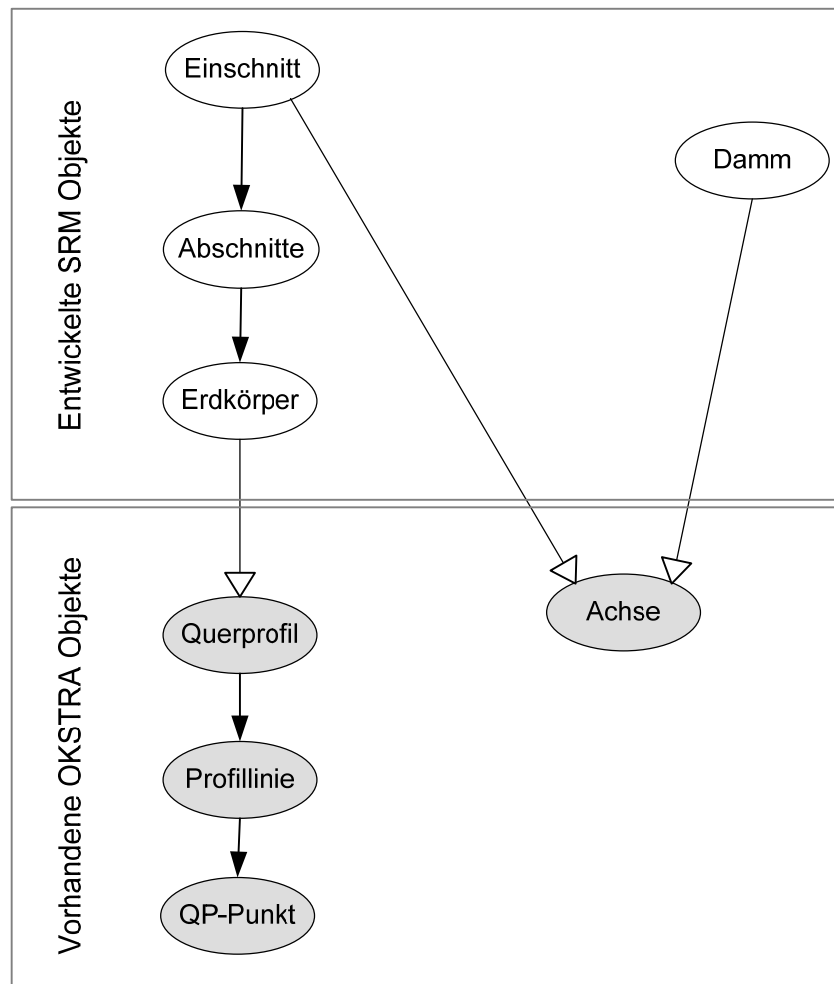


Abbildung 4.7: Anbindungsstellen des SRM an OKSTRA

Die Abbildung 4.7 zeigt die Anbindungsstellen des SRM an OKSTRA, wobei nur relevante Elemente der beiden Modelle schematisch aufgeführt sind. Hauptsächlich sind drei Anbindungsstellen erforderlich. Die Zugehörigkeit der Einschnitte und der Dämme zu einer Achse stellt die ersten zwei Anbindungen dar. Die dritte Anbindung ergibt sich bei dem Erdkörper, der eine gewisse durch zwei Querprofile begrenzte Bodenmenge darstellt. Insbesondere die letzt genannte Anbindungsstelle stellt eine große Herausforderung dar, die jedoch neuerdings prototypisch von OKSTRA teilweise gelöst wurde. Der Grund dafür ist, dass die Berechnung der Erdkörpermenge den geltenden Regelwerken bei der Abrechnung,

also REB, genügen muss. Eigentlich gehen die Erdkörper nur indirekt in die Abrechnung ein, weil die dort definierten Positionen im Endeffekt aus der Simulationssicht aus Erdkörpern bestehen. Außerdem werden im Rahmen der Simulation meist Varianten verglichen, so dass sich die Mengen im Falle einer einheitlichen Mengenberechnung für alle Varianten bei der Gegenüberstellung eliminieren. Die Einbeziehung der REB ist prinzipiell für die Anwendung im Nachtragswesen vorgesehen, weil die Gegenüberstellung der Soll- und Ist-Mengen eine genauere Mengenermittlung erfordert, die in die Abrechnung eingehen.

Für die Mengenberechnung der Linienbauwerke eignet sich im Allgemeinen die Profilmethode. Profile bezeichnen vertikale Schnitte durch einen lang gestreckten Körper, der durch einen oberen und einen unteren Horizont begrenzt ist, wobei die Festlegung einer geradlinigen oder gekrümmten Achse erforderlich ist. Auf dieser Achse sind in gleichen oder ungleichen Abständen „Querprofile“ rechtwinklig zur Achse anzuordnen. Ein Teilkörper wird von zwei Querprofilen begrenzt, so dass die Summe der Volumen aller in einem Gesamtkörper enthaltenen Teilkörper sein Gesamtvolumen ergibt (*Prasuhn 2000 S.191*). Die Tabelle 4.1 zeigt die im Rahmen der REB/GAEB-VB definierten Profilmethoden auf (*Prasuhn 2000 S.200 ff.*).

Tabelle 4.1: REB/GAEB Mengenberechnungsmethoden nach der Profilmethode

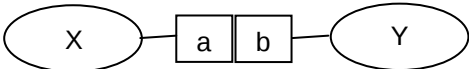
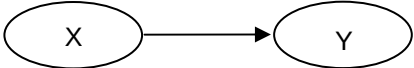
REB/GAEB	Bezeichnung
REB 21.003	Massenberechnung aus Querprofilen (Elling)
REB 21.013	Massenberechnung zwischen Begrenzungslinien
GAEB-VB 23.004	Allgemeine Mengenberechnung

Da das „Handbuch für die Vergabe und Ausführung von Bauleistungen im Straßen- und Brückenbau“ die Anwendung der Verfahren der „Sammlung REB“ für die Abrechnung vorschreibt und den Einsatz von anderen Verfahren nur in Ausnahmefällen und mit schriftlicher Zustimmung des Auftraggebers zulässt, finden die GAEB-Verfahrensbeschreibungen in der Praxis, insbesondere bei den Straßenverwaltungen der Länder, kaum Einsatz (*HVA B-StB, 3.3 Abrechnung mit DV-Anlagen, Stand 01/02, Absatz 5 und 12*), (*ZVB/E-StB 2002, Absatz 115.1 Bauabrechnung mit DV-Anlagen*). Dass für

GAEB-VB keine Prüfprogramme eingeführt sind, kann als ein weiterer Grund dafür aufgefasst werden, dass diese Verfahren nicht weit verbreitet sind (*Hinzer und Feser 2005*). Von den übrigen in der Tabelle 4.1 aufgelisteten Methoden spielt in der Praxis die REB 21.013 eine zentrale Rolle. Deshalb wird diese Methode zur Implementierung einbezogen, wobei die erforderlichen Objekte, unabhängig von SRM, lediglich für die Implementierungsumgebung entwickelt werden, siehe Kapitel 5. Sie sind in SRM als Eigenschaften für Dokumentationszwecke integriert.

Die Entscheidung zur Implementierung des Verfahrens REB 21.013 in das entwickelte System erwies sich im Mai 2005 als richtig, als der Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zur Ergänzung des OKSTRA um Objekte der Bauabrechnung realisiert wurde. Dabei wurde nämlich genau dieses Verfahren, also REB 21.013, prototypisch entwickelt (*Hinzer, Feser 2005*). Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein NIAM-Diagramm zur Anbindung dieses neu integrierten Schemas des SRM an den OKSTRA entwickelt. NIAM-Diagramme (Nijsen Information Analysis Method) sind eine graphische Notation zur Darstellung von Datenmodellen. Sie zeichnen sich durch eine leichte Lesbarkeit und ein hohes Maß an Ausdrucksfähigkeit aus. Sie werden prinzipiell in der Entwicklungsphase der OKSTRA-Schemata verwendet. Die Tabelle 4.2 zeigt die dabei geltenden Symbole auf.

Tabelle 4.2: NIAM-Symbole

Bedeutung	Symbol
	X steht mit Y in Beziehung a Y steht mit X in Beziehung b
	X ist eine Untermenge von Y
	Beziehung besteht höchstens einmal (Uniqueness)
	Beziehung besteht mindestens einmal (Mandatory)

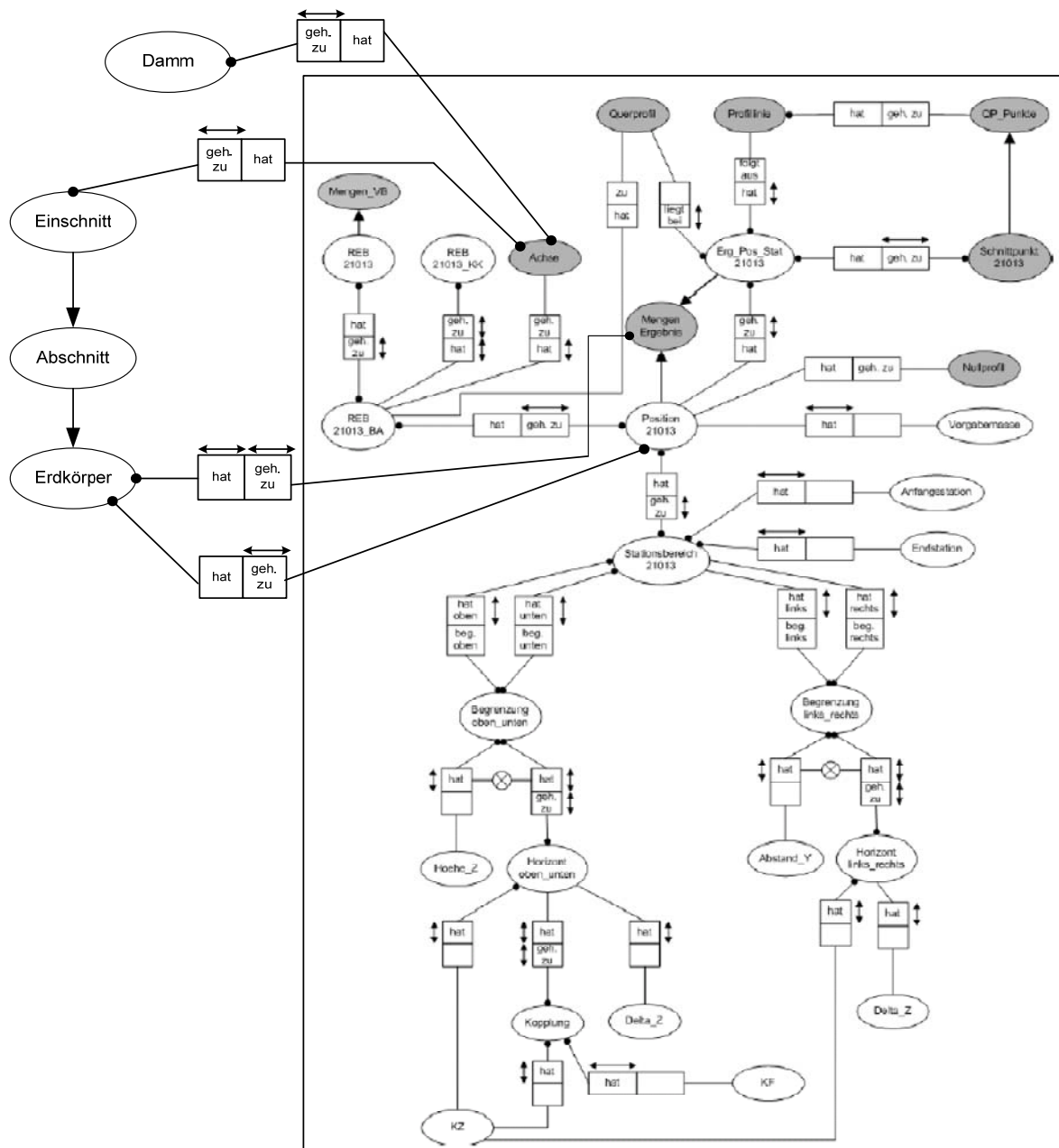


Abbildung 4.8: Anbindung des SRM an OKSTRA-REB 21.013 (Hinzer, Feser 2005, ergänzt durch simulationsrelevante Klassen)

Die bereits erwähnten drei Anbindungsstellen des SRM an OKSTRA können anhand des neuen Schemas der REB 21.013 eindeutiger beschrieben werden, wobei sich auch NIAM-Diagramme zur Beschreibung der Anbindung anbieten. Das umrahmte Schema in der Abbildung 4.8 wurde von dem prototypisch entwickelten Bauabrechnungsschema OKSTRA-REB 21.013 übernommen und um Verbindungsstellen mit SRM ergänzt. Die in SRM defi-

nierten Elemente ‚Einschnitt‘ und ‚Damm‘ stehen mit der ‚Achse‘ in einer Zugehörigkeitsbeziehung. Bei dem Erdkörper sind die Anbindungsstellen über definierte Eigenschaften ausgedrückt. Der ‚Erdkörper‘ hat eine ‚Gesamtmenge‘, die aus den Mengen mehrerer ‚Positionen‘ bestehen kann. In SRM umfasst die Eigenschaft ‚Position‘ alle notwendigen Daten nach REB 21.013, also Anfangs- und Endstation, Horizont oben, unten rechts, links etc., die in OKSTRA als eigenständige Elemente dargestellt sind. Zusätzlich zu der ‚Gesamtmenge‘ sind auch die Teilergebnisse für die jeweiligen Zwischenstationen in SRM als ‚Teilmenge‘ und ‚Station‘ gespeichert. Davon kann in der Implementierung Gebrauch gemacht werden, wenn die genauen Förderweglängen für die kleinsten Erdmengen berechnet werden sollen.

4.6 Zusammenfassung

Das vierte Kapitel der vorliegenden Arbeit beschreibt das entwickelte Produktmodell einer Straße aus Sicht der Simulation. Zu dieser Entwicklung sind Recherchen im Bereich der im Straßenbaubereich geltenden Schnittstellen und Produktmodelle unumgänglich, um einen zeitgemäßen, praxisnahen Ansatz formulieren zu können. Das entwickelte simulationsrelevante Produktmodell dient nicht nur der Integration von CAD und Simulation, sondern auch der Datenhaltung. Das SRM enthält Daten zur Beschreibung der Baustellenstruktur mit deren Aufbau- und Ablaufbeziehungen. Diese Daten werden im nächsten Schritt als Parameter für das Simulationsmodell herangezogen. Es ist als ein ‚Teilproduktmodell‘ zu verstehen, das mit anderen relevanten Produktmodellen zu verlinken ist. Das SRM wurde entsprechend dem zu beobachtenden Trend in XML umgesetzt. Die Anbindungsmöglichkeiten an OKSTRA, im Fall einer Erweiterung dieses allgemeinen Produktmodells um Simulationsdaten, werden zudem erörtert. Mit SRM wird eine nahtlose Datenmodellierung für die beiden integrierten Systeme geschaffen, die hohe Dateneffizienz und Transparenz zugleich verspricht. Das gleiche Konzept kann auch auf den Anwendungsbereich ‚Simulationen im Hochbau‘ übertragen werden, wobei ein Produktmodell, wie IFC, zu erweitern wäre.

5 Aufbau des Petri-Netz-basierten Simulationssystems

5.1 Die Modellierungsumgebung

Die Modellierung erfolgt in einer hierarchischen, objektorientierten und zeitbewerteten Umgebung, die durch das Simulationssystem PACE gewährleistet wird. PACE ist eine auf Petri-Netzen basierende allgemeine Simulatorenentwicklungsumgebung, die seit 1994 von IBE Simulation Engineering GmbH gepflegt und weiterentwickelt wird. In dieser Umgebung können aufgabenspezifische Simulatoren entwickelt werden. Die hierarchische Modellierung erfolgt in PACE durch die Zusammenfassung der statischen Petri-Netz-Elemente, also Transitionen, Plätze und Konnektoren, in Modulen, welche beliebig verschachtelt werden können. Zur Erweiterung der Funktionalitäten der Petri-Netze und zur Integration der Zeitmodellierung ist in PACE die objektorientierte Programmiersprache SMALLTALK implementiert. Programmierzeilen (Code) können unter anderem in die Transitionen geschrieben werden und somit gewisse Änderungen an Markenattributen hervorrufen. Die Markenattribute gelangen in die Transition über Konnektorattribute und werden als solche angesprochen. Deshalb muss die Anzahl der Marken- mit den Konnektorattributen übereinstimmen.

Außerdem sind in PACE vier Arten von Variablen definiert: Konnektor-Variablen, temporäre Variablen, Modulvariablen und globale Variablen (*Eichenauer 2002 a S. 3-38 ff.*).

- Konnektor-Variablen sind lokale Variablen, das heißt, sie sind innerhalb des Transitions-Cods und den mit der Transition verbundenen Konnektoren bekannt. Sie werden nicht deklariert. Je nach Konnektortyp werden Input- oder Output-Variablen unterschieden.
- Temporäre Variablen kommen u. a. innerhalb einer Transitions-Inskription vor und werden nach einer interaktiven Bestätigung des Anwenders automatisch deklariert. Der Name von diesen Variablen muss mit einem Kleinbuchstaben beginnen.
- Modulvariablen sind an ein Modul gebunden und werden mit diesem gespeichert. Eine Modulvariable repräsentiert ein Smalltalk-Symbol und wird mit einem Schlüsselwort, beginnend mit Raute (#), beschrieben. Sie kann mit einem Initialisierung-

Code versehen werden. Während der Simulation können Modulvariablen gelesen, verändert oder initialisiert werden.

- Globale Variablen gelten für das ganze Petri-Netz und werden bei der ersten Benutzung nach einer interaktiven Bestätigung vom Anwender automatisch deklariert. Die Namen der globalen Variablen müssen mit einem Großbuchstaben beginnen.

Ein Transitions-Code bzw. eine Inskription besteht aus drei Teilen: Bedingung (normalerweise in grün geschrieben, hier 1. Zeile), Verzögerung (normalerweise in rot geschrieben, hier 2. Zeile) und Aktion (normalerweise in blau geschrieben, hier 3. Zeile), siehe Abbildung 5.1 (*Eichenauer 2002 a S. 3-15 ff.*). In allen drei Teilen können alle Arten der zuvor beschriebenen Variablen verwendet werden.

- Der Bedingungs-Code steuert das Aktivieren einer Transition in Abhängigkeit von den Werten der Input-Variablen bzw. der Input-Marken. Je nach Kombination der Input-Marken ergibt die Abarbeitung des Bedingungs-Codes den Wert ‚true‘ oder ‚false‘. Bei ‚true‘ wird die Transition aktiviert, bei ‚false‘ jedoch nicht. Die Bedingung der Transition ‚Vorgang‘ in der Abbildung 5.1 ist, dass das dritte Konnektattribut der Zeichenkette ‚bestätigt‘ gleicht. Erst wenn so ein Fall eintritt, kann die Transition schalten. Das Beispiel der Abbildung 5.1 zeigt den Fall, dass die Transition schaltet.
- Der Verzögerungs-Code bestimmt die Zeiteinheiten, um die das Feuern einer Transition verzögert werden soll und darf nur positive oder keine Werte annehmen. Hier können auch Zufallszeiten nach einer bestimmten Verteilung generiert werden. Im Beispiel (Abbildung 5.1) schaltet die Transition nach zwölf Zeiteinheiten, einer Zufallszahl gemäß der definierten Gleichverteilung, siehe Abschnitt 5.2.1.

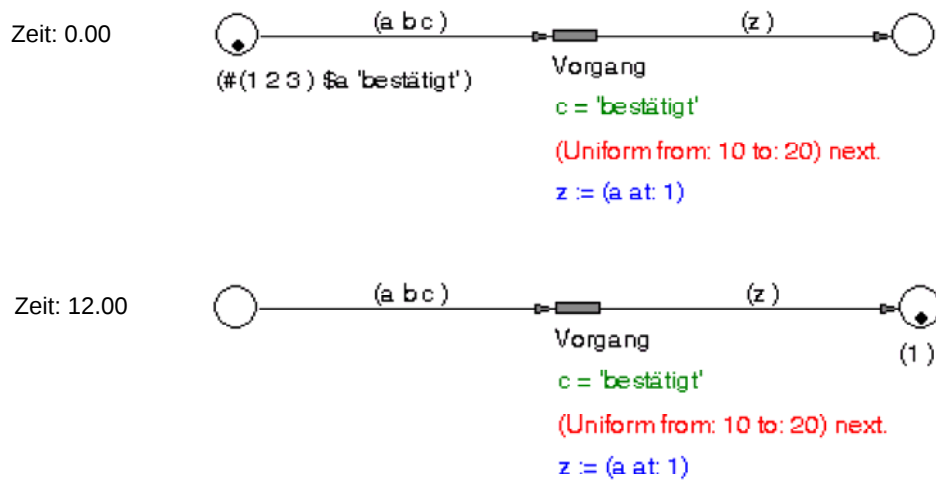


Abbildung 5.1: Beispiel für Inskriptionen einer Transition

- Der Aktions-Code wird ausgeführt, sobald die Transition feuert und folglich Output-Variablen berechnet, Attribute verändert oder andere Effekte auslöst. In dem Beispiel wird der Wert der Output-Variable ‚z‘ als das erste Element des ersten Konnektorattributes berechnet.

5.2 Zeitmodellierung und Stochastik

5.2.1 Grundlagen der Zeitmodellierung

Zahlreiche Einflussfaktoren wirken auf die Bauprozesse und beeinflussen ihre Dauer, so dass sich eine deterministische Zeitmodellierung dem realen Prozessablauf nur unzureichend annähern kann. Mit einer stochastischen Zeitmodellierung können jedoch mögliche Abweichungen der Bauprozessdauern besser erfasst werden.

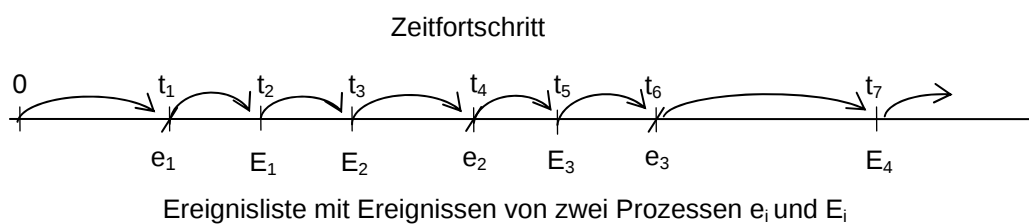


Abbildung 5.2: Ereignisorientierte Zeitführung

Für die Zeitführung gibt es zwei Ansätze, die ereignisorientierte (next-event time advance) und die periodenorientierte (fixed-increment time advance) Zeitführung. Nach dem ersten Ansatz, der in den meisten Simulatoren implementiert ist, wird die Simulationsuhr in den ereignisorientierten Simulatoren zunächst initialisiert. Anschließend wird die Eintrittszeit des ersten Ereignisses aus der Ereignisliste der Simulationsuhrzeit zugewiesen und die zugehörige Zustandsvariable aktualisiert. Dieser Prozess wiederholt sich für die folgenden Ereignisse so lange, bis die Ereignisliste abgearbeitet wird oder ein Einbruchkriterium erfüllt ist (*Law und Kelton 2000 S. 7*), siehe Abbildung 5.2.

In PACE wird die Zeit durch Verzögerung des Feuerns bzw. des Schaltens der Transitionen um entsprechende Simulationszeiteinheiten modelliert. Bei dieser Verzögerung handelt es sich um Simulationszeit, die ungeachtet der echten Zeit verstrichen wird. Die Zeiteinheit – also Sekunden, Tage, Wochen etc. – werden in das System als Zahlen aufgefasst und sollen deshalb einheitlich eingegeben werden.

Die Größe einer Zeitverzögerung soll durch den Verzögerungs-Code eingegeben oder errechnet werden. Sie kann außerdem von den Attributen der Inputgrößen abhängen, so dass unterschiedliche Attribute der Eingangsmarken, z.B. Baggertyp, andere Zeitverzögerungen auslösen können.

Das stochastische Modellverhalten kann mit Hilfe von mehreren, in PACE als Klassen definierten Verteilungsfunktionen modelliert werden. Mit der Methode ‚next‘, die einer Instanz dieser Klassen gesendet wird, kann der nächste, entsprechend verteilte Zufallswert ausgegeben und als Zeitverzögerung verwendet werden. Aus den relevanten statistisch verteilten Messgrößen der Systemgrößen (Prozesszeiten) sollen im ersten Schritt mathematische Verteilungsfunktionen approximiert werden. Für den Fall, dass diese nicht bekannt sind, können empirische Verteilungsfunktionen gebildet werden (*Eichenauer 2002 S. 3-51 ff.*).

Für die Suche nach der passenden mathematischen Verteilungsfunktion einer Stichprobe empfehlen mehrere Literaturquellen ein dreistufiges Verfahren (*Liebl 1995 S.128 ff.; Law und Kelton 2000 S. 332 ff.*):

1. Die erste Aufgabe besteht in der Bestimmung des Verteilungstyps. Dabei können grafische Darstellungen der Stichprobe gebildet, z.B. Häufigkeitsdiagramme, und Untersuchungen an den ermittelten statistischen Kennzahlen durchgeführt werden, z.B. bei einer Exponentialverteilung gilt, dass der Mittelwert der Standardabweichung gleicht. Vorherige Untersuchungen an Bauprozessen können ebenfalls die Eignung bestimmter Verteilungen zur Modellierung dieser Prozesse belegen, siehe Abschnitt 5.2.2.
2. Hat man sich für einen Verteilungstyp entschieden, sind die dazugehörigen Parameter zu schätzen. Dazu gibt es verschiedene Schätzer, wie moment matching, percentile matching, maximum likelihood etc., wobei der Maximum-Likelihood-Schätzer am häufigsten verwendet wird (*Law und Kelton 2000 S. 343*).
3. Abschließend soll die Anpassungsgüte der approximierten Verteilung beurteilt werden. Dazu werden entweder heuristische und graphische Verfahren, wie P-P oder Q-Q Plots oder Anpassungstests verwendet, am häufigsten der Chi-Quadrat-Test und Kolmogorov-Smirnov-Test.

Speziell für die Wahl der Verteilungsfunktion einer Stichprobe wurde im Rahmen dieser Arbeit ein eigenständiges Java-Tool entwickelt, das die Planer bei der Anpassung der aufgenommenen Stichproben an einer Verteilungsfunktion unterstützen kann. Die Stichprobe kann aus einer Excel-Tabelle importiert und weiterbearbeitet werden. Für die Schätzung der Parameter wurde der Maximum-Likelihood-Schätzer implementiert. Der Anpassungstest wird auf Grund des Kolmogorov-Smirnov-Tests durchgeführt; dabei werden zum Vergleich die aufgenommene und die approximierte Verteilung grafisch dargestellt.

5.2.2 Statistische Eigenschaften der Prozessdauern im Erdbau

Die Frage nach der geeigneten Verteilung für Bauprozessgrößen ist Gegenstand vieler Forschungsarbeiten. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aus diesen Forschungsarbeiten erörtert, um daraus Schlüsse für das zu entwickelnde Simulationssystem ziehen zu können.

Neben der Modellierung sind die Eingangsparameter für die Genauigkeit eines Simulationsmodells von maßgebender Bedeutung. Besonders im Erdbau unterliegen die Prozesse vielen Schwankungen, die massive Abweichungen von den abgeschätzten Dauern hervorrufen. Hinzu kommt, dass sich einige Einflussfaktoren, wie Boden, Wetter oder Einsatzbedingungen, während der Simulationszeit verändern können. Deshalb sind die aufgenommenen Daten meistens durch eine geeignete Verteilung stochastisch auszudrücken. Es stellt sich hier die Frage nach der Verteilung, die solche variablen Rahmenbedingungen annähernd repräsentieren kann. *Gehbauer (1974)* hat in seiner Dissertation festgestellt, dass die Anwendung der Simulation oft daran scheitert, dass die statistischen Verteilungen der auf das System wirkenden Einflussgrößen fehlen. Im ersten Schritt identifiziert er die stochastischen Größen ausgehend von Beobachtungen auf einer großen Baustelle, und empfiehlt daraufhin drei Verteilungstypen: Erlang, Normal, Exponential (*Gehbauer 1974 S.68*). Des Weiteren leitet er Abhängigkeiten zwischen den Parametern dieser Verteilungen und den erörterten Einflussfaktoren.

AbouRizk und Halpin (1992) haben die statistischen Eigenschaften von Bauprozessdauern auf der Grundlage einer großen Datenbasis untersucht, um eine allgemeingültige Verteilung zur Beschreibung dieser Prozessdauern zu finden. Die Bestimmung des Verteilungstyps, durch Auswertung der Häufigkeitsdiagramme, ist nur grob möglich. Das Problem dabei ist, dass mehrere Häufigkeitsdiagramme von den Daten durch Veränderung der Intervalle oder der Klassenbreite aufgebaut werden können (*AbouRizk und Halpin 1990*). Deshalb ist in diesem Zusammenhang ein spezielles Verfahren zur Suche nach einer entsprechenden Verteilung zur Modellierung von Bauprozessdauern von *AbouRizk und Halpin (1992)* angewendet worden.

Sie verwenden das 3. und das 4. Moment, also die Schiefe (skewness), Gleichung 5.1, und die Wölbung (kurtosis), Gleichung 5.2, die die Form der vorliegenden Verteilung bestimmen können. Die Schiefe und die Wölbung sind für eine Stichprobe X_i ($i=1 \dots n$) folgendermaßen definiert:

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \mu}{\sigma} \right)^3 \quad (5.1) \quad \beta_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \mu}{\sigma} \right)^4 \quad (5.2)$$

wobei μ der Mittelwert der Stichprobe und σ die Standardabweichung und n den Stichprobenumfang darstellen.

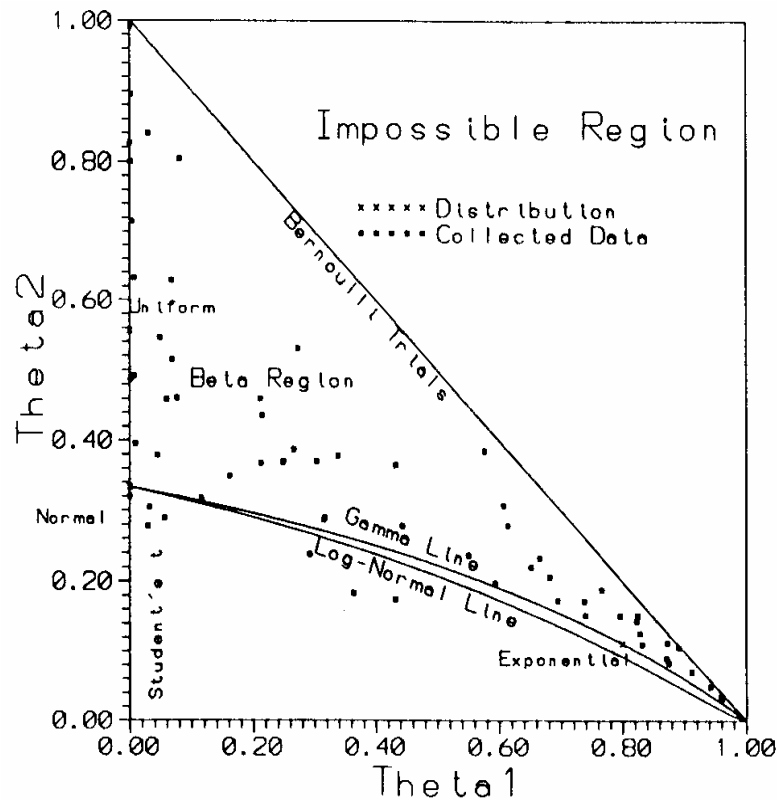


Abbildung 5.3: $(\Theta_1 - \Theta_2)$ Diagramm (AbouRizk et al. 1992)

Das β_1 - β_2 Plan ist eine Darstellung der Werte von (β_1, β_2) Punkte für bekannte Verteilungen. Manche Verteilungen sind nicht flexibel, wie die Normal-Verteilung $\sqrt{\beta_1}=0, \beta_2=3$ und lediglich mit einem Punkt repräsentiert, während andere, wie Beta und Pearson-Verteilung, von variablen Formparametern abhängig und mit einer Region dargestellt sind. Die β_1 - β_2 Pläne sind jedoch auf beiden Achsen nicht begrenzt. Deshalb ist es sehr schwierig, alle möglichen Kombinationen von (β_1, β_2) Punkten darzustellen. Aus diesem Grund wurde eine modifizierte Version des β_1 - β_2 Plans, nämlich das $(\Theta_1 - \Theta_2)$ Diagramm, verwendet (Schmeiser und Deutsch 1977). Damit sind die Werte von Θ_1 und Θ_2 auf $0 \leq \Theta_1 \leq 1.0$ und $0 \leq \Theta_2 \leq 1.0$ begrenzt, wobei:

$$\Theta_1 = \frac{\beta_1}{\beta_1 + 1} \quad (5.3)$$

$$\Theta_2 = \frac{1}{\beta_2} \quad (5.4)$$

Es wurden zunächst Daten für diverse Bauprozesse gesammelt, β_1 und β_2 und daraufhin Θ_1 und Θ_2 berechnet. Die Ergebnisse wurden in $(\Theta_1 - \Theta_2)$ Diagramme eingetragen, siehe Abbildung 5.3 und zeigten folgende Merkmale auf (*AbouRizk und Halpin 1992*):

die nicht flexiblen Verteilungen sind nicht geeignet zur Modellierung von Bauprozessdauern,

die meisten Punkte liegen in der Beta-Region, die sich damit zur Modellierung der Verteilung am besten eignet,

die Punkte zeigen, dass symmetrische Verteilungen, wie Normal oder Gleich-Verteilung, nicht geeignet sind.

AbouRizk und Halpin empfehlen daher, eine flexible Verteilung anzuwenden. Dabei hat sich die Beta-Verteilung am besten bewährt, weil diese alle oben genannten Kriterien erfüllt und zudem im Baubetrieb auf Grund ihrer Einführung in die PERT-Methode sehr gut bekannt ist. Außerdem ist die Beta-Verteilung in den meisten Simulationswerkzeugen – auch in PACE – integriert. Die Form einer Beta-Verteilung hängt von zwei Parametern, „ α “ und „ β “, ab. Dadurch kann diese unterschiedliche Formen annehmen, wie „U“, „J“, Dreieck oder die Form einer Glocke (*Fente et al. 1999*).

Die Verteilung einer Zufallsvariable nach der Beta-Dichtefunktion ergibt sich aus der Gleichung 5.5.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{B(\alpha_1, \alpha_2)} x^{\alpha_1-1} (1-x)^{\alpha_2-1} & \text{falls } 0 < x < 1 \\ 0 & \text{anderenfalls} \end{cases} \quad (5.5)$$

wobei $B(\alpha_1, \alpha_2)$ die Beta-Funktion ist und mit der Gleichung 5.6 definiert wird.

$$B(\alpha_1, \alpha_2) = \int_0^1 t^{\alpha_1-1} (1-t)^{\alpha_2-1} dt \quad (5.6)$$

Wie die Gleichung 5.5 zeigt, nimmt die Dichtefunktion der Beta-Verteilung in Abhängigkeit von ihren Formparametern α_1 und α_2 unterschiedliche Verläufe, siehe Abbildung 5.4.

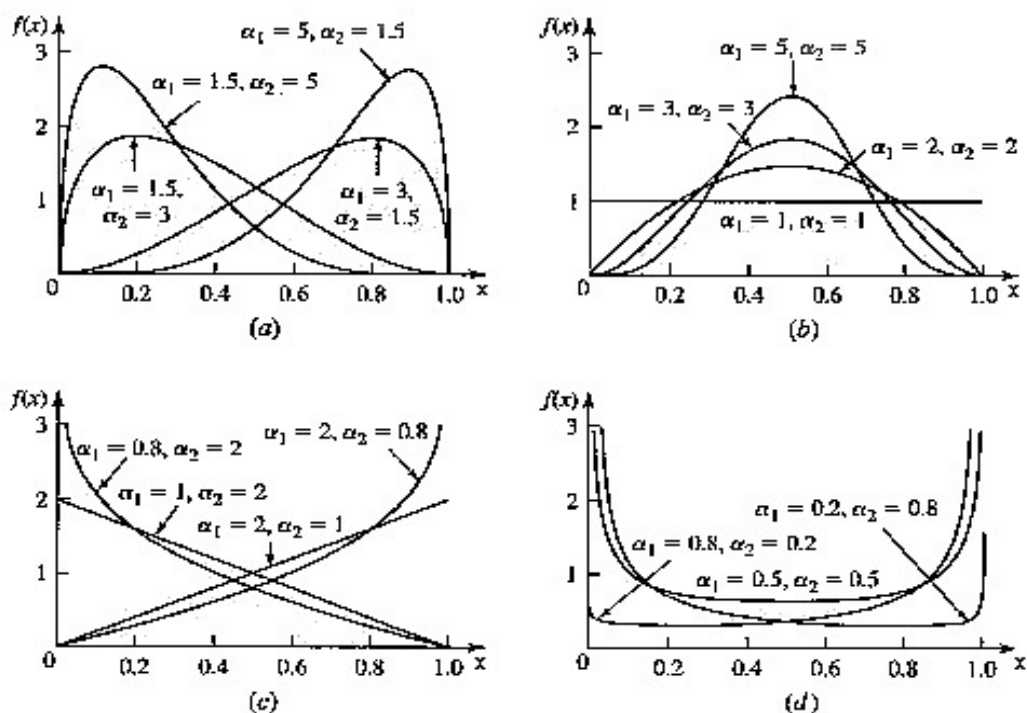


Abbildung 5.4: Dichtefunktionen der Beta-Verteilung (Law und Kelton 2000 S. 309)

5.2.3 Bestimmung der Verteilungsfunktionen ausgehend von Erfahrungswerten

Im vorigen Abschnitt wurde mit Bezug auf eine von *AbouRizk und Halpin (1992)* durchgeführte Studie gezeigt, dass sich die Beta-Verteilung für die Modellierung der Bauprozessdauern am besten eignet. Je nachdem, wann die Simulationsstudie durchgeführt werden soll, liegen unterschiedlich detaillierte Daten vor. Während der Ausführung können aktuelle Baustellendaten aufgenommen und ausgewertet werden. Bei der Planungsphase sind jedoch lediglich die Gegebenheiten auf der Baustelle und vertraute Maschinendaten einigermaßen bekannt. *Law und Kelton (2000 S. 386 ff.)* empfehlen für den Fall, dass keine oder wenige Daten vorliegen, die Anwendung der Dreieck-Verteilung oder der Beta-

Verteilung. Insbesondere die Bestimmung der Beta-Verteilung bei einem Datenmangel ist Gegenstand mehrerer Studien (*AbouRizk, Halpin und Wilson 1992; Fente et al. 1999 und Schexnayder et al. 2005*).

Aus diesen Arbeiten konnten einige Erkenntnisse für die Bestimmung der Parameter einer Beta-Verteilung für die Planungsphase gewonnen werden. Demnach müssen einige, auf Erfahrungen basierende Schätzwerte einbezogen werden. Es sind vier Werte für die Bestimmung der zwei Parameter einer Beta-Verteilung notwendig, die in diesem Fall subjektiv beurteilt werden müssen. Dabei handelt es sich um die minimale und maximale Dauer sowie einen der folgenden Statistikwerte: Modalwert, Mittelwert, Varianz oder eine gewisse Prozentzahl, zu der die Dauer einen bestimmten Wert nicht überschreitet (*Fente et al. 1999*).

AbouRizk und Halpin (1992) entwickelten ein Programm namens VIBES „visual interactive Beta estimation system“, das anhand dieser vier Werte die Parameter einer Beta-Verteilung bestimmen kann. Diese zunächst wichtigsten Werte sind die Endpunkte, also die minimale und maximale Dauer. Die anderen zwei können Mittelwert und Standardabweichung, Mittelwert und eine ausgewählte Prozentzahl, Modalwert und eine ausgewählte Prozentzahl oder zwei ausgewählte Prozentzahlen sein. Nach *Wilson et al. (1982)* sind der Modalwert und die Dauer, die zu 75 % nicht überschritten werden, von Experten gut einzuschätzen. VIBES kann eine Beta-Verteilung aus diesen subjektiven Werten bilden. *Fente et al. (1999)* haben die Parameter der aus aktuellen Daten geformten Beta-Verteilung, die mit Hilfe von Methoden wie Maximum Likelihood Estimates und Method Ordinary Least Square Minimization OLS errechnet und mit den Parametern aus VIBES verglichen. Als Resultat gilt die Aussage, dass die Abweichung der durch die jeweilige Methode errechneten Parameterwerte die Simulationsergebnisse nicht beeinflussen kann. Der Anwender soll dabei in der Lage sein, die resultierende Verteilung hinsichtlich der Abstimmung mit seinen Schätzungen zu beurteilen.

Dieses Verfahren setzt eine gute Erfahrung in Statistik voraus, die nicht unbedingt von den eher praxisorientierten Bauleitern zu erwarten ist. Hilfreicher sein kann in dieser Hinsicht eine aktuelle, auf die Arbeit von *Gehbauer 1974* aufbauende Studie, die Abhängigkeiten zwischen den Beta-Verteilungsparametern und gewissen Einflussgrößen auf Bauprozessen

untersucht. Außerdem können für die Planungsphase die Daten aus der Nachkalkulation ähnlicher Baustellen verwendet werden.

5.3 Das Modellierungskonzept

Das Modellierungskonzept des entwickelten Simulationssystems beruht auf den Grundlagen der Petri-Netz-Theorie, insbesondere auf den darin definierten höheren Prädikat-Transitions Netzen (PrT), siehe Abschnitt 2.2.3.1. Die Vorteile der Petri-Netz-Theorie liegen im Allgemeinen in ihren mathematisch fundierten Grundlagen und in ihrer Modellierungsflexibilität. Dennoch werden Eigenschaften, wie Anwenderfreundlichkeit und Modellierungsaufwand, an diesen Netzen bemängelt. Der entwickelte Ansatz beseitigt diese Nachteile, indem er sich die Möglichkeit einer nachträglichen Parametrisierung von PrT-Netzen zu Nutze macht. Das heißt, ausgehend von einer allgemeinen Simulatorenentwicklungsumgebung, hier PACE, wird ein aufgabenspezifischer Simulator für Erdbauaufgaben entwickelt, siehe Abschnitt 5.1. Dadurch reduziert sich der Modellierungsaufwand für den Anwender erheblich und beschränkt sich auf die Parametrisierung. Damit diese Parametrisierung in einer anwenderfreundlichen Umgebung erfolgen kann, wird ein CAD-System herangezogen. Die Effektivität des Datenaustausches ist durch die Entwicklung produktmodellbasierter Integration gesichert. Die Simulation bildet damit eine Komponente, die in ein Gesamtsystem integriert wird.

Dem Modellierungskonzept liegt das simulationsrelevante Produktmodell zugrunde. Deshalb baut die Modellierung ebenfalls auf den in der Praxis gängigen Strukturen auf. So sind in der obersten Hierarchie die unterschiedlichen Arbeitsstellen einer Straßenbaustelle durch Module repräsentiert: Einschnitte, Dämme, Zwischenlager, Deponien und Förderwege, siehe Abbildung 5.5. Diese Hierarchie beinhaltet jeweils ein Modul der Arbeitsstellen, insgesamt fünf Module. Auch wenn das Straßenprojekt aus mehreren solcher Arbeitsstellen der gleichen Art – beispielsweise mehrere Einschnitte oder Dämme – besteht, ist nur ein Modul der jeweiligen Arbeitsstelle erforderlich. Die spezifischen Eigenschaften sind durch Modulvariablen abgebildet, siehe Abschnitt 5.1. Zusätzliche Modulvariablen sollen in SRM definierte Strukturhierarchien zum Ausdruck bringen, wie z.B. bei Einschnitten und Arbeitsabschnitten. Die Letzteren sind als Modulvariablen in dem Modul ‚Einschnitte‘ definiert, so dass auf ihre Eigenschaften zurückgegriffen werden kann.

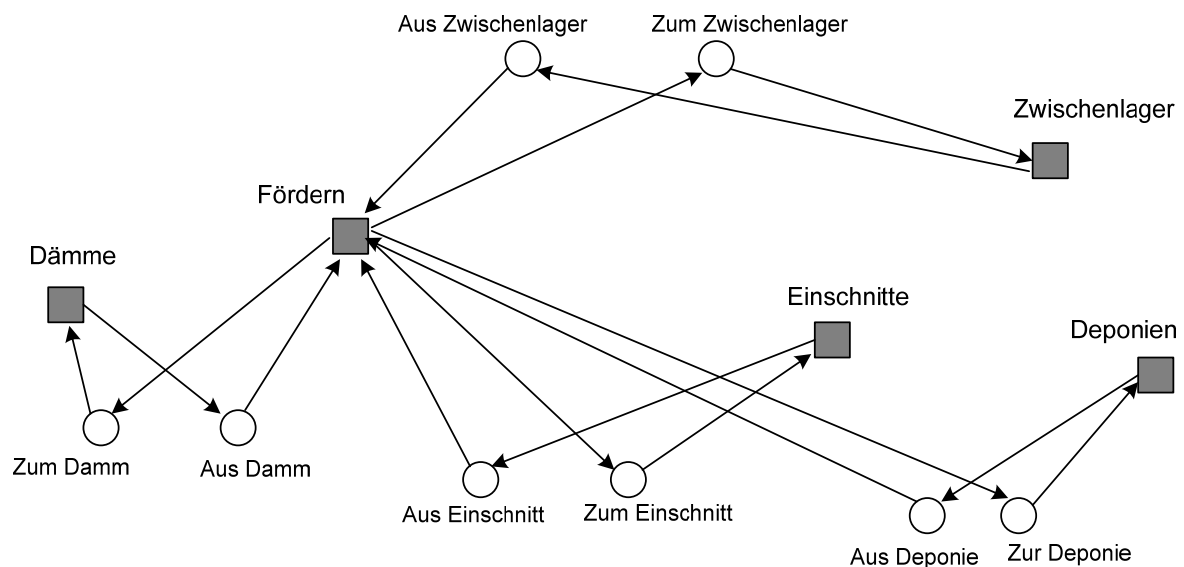


Abbildung 5.5: Die oberste Hierarchie der Erdbaustelle in PACE

Außerdem ist das Modellierungskonzept betriebsmittelorientiert. Dies wird in der untersten Hierarchie deutlich, in der die Prozesse eines Betriebsmittels wie z.B. Laden, Fahren, Manövrieren etc., modelliert werden. Diese Prozesse repräsentieren die üblichen Bewegungsarten des jeweiligen Betriebsmittels. Deshalb sind sie mit Hilfe der statischen Elemente der PrT-Netze modelliert. Im Gegensatz zu den gleichartigen Standardprozessen unterscheiden sich die Betriebsmittel durch verschiedenartige Eigenschaften. Die Betriebsmittel werden daher als Marken mit variablen bzw. veränderbaren Attributen abgebildet. Die Betriebsmittelmarken bearbeiten die Erdkörper, die ebenfalls als Marken in das System modelliert werden.

Der entwickelte erdbauspezifische Simulator ist exemplarisch auf eine nähere Betrachtung der Einschnitte beschränkt und geht dort von einem Bagger-Lkw-Betrieb aus. Eine weitere Ausdehnung der hier praktizierten Modellierungstiefe auf Dämme oder auf andere Betriebsmittel, wie Schürfwagen (Scraper), Planiertraupen, Walzen etc., ist nicht Gegenstand der Arbeit, wäre jedoch möglich und empfehlenswert.

Bei der vorliegenden Arbeit wird angenommen, dass von den Input-Daten lediglich zeitliche Daten stochastisch auftreten können. Andere Größen wie z.B. Füllfaktor wurden als deterministische Variablen integriert. Diese Annahme gewährt eine Abstimmung der Men-

gen mit den Kalkulations- und Abrechnungsmengen. Außerdem stellen die Prozesszeiten reine Betriebszeiten dar. Das heißt, mögliche Störungs-, Wartungs- oder Reparaturzeiten werden nicht in Betracht gezogen. Diese Zeiten sollen nicht als eine Grundlage der Entscheidungsfindung angesehen werden. Deren Wirkung würde deshalb beim Vergleich mehrerer Varianten entfallen. Für „What-if“ Szenarien können die Folgen von gewissen Störungen in Form größerer Abweichungen der Prozessdauern simuliert werden.

Das Simulationssystem umfasst keine gesonderte Behandlung der Kosten. Diese können auf einfache Art und Weise auf einen m^3 oder auf eine Stunde betriebsmittelabhängig bezogen und für jede Variante errechnet werden. Kosten in den Simulator zu integrieren, bedeutet lediglich einen zusätzlichen Parameter für die Betriebsmittelkosten vorzusehen und kann deshalb mit einem geringen Aufwand umgesetzt werden.

5.4 Nahtlose Datenmodellierung

5.4.1 Datenmodellierung auf der Systemebene

Die Grundsteine der Produktmodellierung sind hauptsächlich mit der Entwicklung des simulationsrelevanten Produktmodells (SRM) festgelegt. Das SRM beschreibt die hierarchische Struktur und die relevanten Eigenschaften der Arbeitsstellen auf der Straßenbaustelle und deren Beziehungen zueinander. Auch Betriebsmittel und Bodenmaterial sind mit ihren Eigenschaften in die Struktur integriert. Die Integration der Daten des Produktmodells in die Petri-Netz-basierte Simulation erfolgt mit Hilfe eines dafür modellierten Schnittstellenmoduls, das im Abschnitt 5.5 präsentiert wird. In das CAD-System ist das SRM über die DOM-Schnittstelle als eine Klassenbibliothek (DLL) integriert. Da die Systeme anders geartet sind, werden bei der Integration systemabhängige Terminologien verwendet. Die unterschiedlichen Bezeichnungen beschreiben jedoch dieselben Daten, die nahtlos zwischen den Systemen ausgetauscht werden können.

Die Tabelle 5.1 verdeutlicht die Parallelität der Daten in den drei Umgebungen im Hinblick auf drei Kriterien. Die Darstellung der Systemstruktur mit den einzelnen Komponenten einer Baustelle erfolgt anhand von Einheiten, die mit Eigenschaften gekennzeichnet werden. Das zweite Kriterium stellt die Umsetzung der Komponentenzuordnung in den

drei Systemen dar. Die Daten dieser Komponente repräsentieren ein weiteres Kriterium und werden je nach System anders implementiert.

Tabelle 5.1: Parallelität der Daten

	CAD-System	SRM	Simulationssystem
Darstellung	Klassen	Elemente, komplexe und einfache Typen	Module, Modulvariablen, Netzelemente
Zuordnung	Verbindungen	Beziehungen	Hierarchie, Konnektoren
Daten	Klasseneigenschaften	Elemente	Modulvariablen, Markenattribute

5.4.2 Datenmodellierung auf der Simulationsebene

Auch innerhalb des Simulationssystems ist die nahtlose Datenmodellierung zwischen den einzelnen Modulen durch einheitliche Strukturierung der Markenattribute gegeben. Bei den Marken- bzw. Konnektorattributen handelt es sich hauptsächlich um Betriebsmittel- oder Materialdaten. Aufgrund der großen Anzahl der simulationsrelevanten Daten werden Markenattribute schnell unübersichtlich. Dies wirkt sich auch auf die Konnektorattribute aus, über die Marken weitergeleitet werden. Zur besseren Übersichtlichkeit der umfangreichen Datenmenge - für z.B. eine spätere Programmerweiterung - und zur schnellen Identifikation der Daten bei einer Fehlersuche während der Verifizierung wird für alle Netzhierarchien eine einheitliche Datenstruktur verwendet.

Für eine leichtere Identifizierung bestehen die Namen der Marken, die in den Betriebsmittelnetzen über die Konnektoren geschrieben werden (Konnektorattribute), standardmäßig aus einem Auszug oder aus einer Silbe des jeweiligen Betriebsmittelnamens, demnach heißt z.B. die Marke eines Baggers: „bag“.

In dem Beispiel der Abbildung 5.6 sind größtenteils solche betriebsmittelspezifischen Konnektorattribute zu finden, wie „bag“, „lkw“, die auf einen Bagger oder LKW hindeu-

levante Daten gesammelt, die bei der anschließenden Visualisierung der Ablaufergebnisse benötigt werden, siehe Tabelle 5.2.

Somit ist eine transparente Datenstruktur für alle Betriebsmittel geschaffen, um auf diese jederzeit zugreifen und Daten ablesen zu können. Dies ist besonders bei der Steuerung wichtig, da bereits beim ersten Blick die gesuchten Daten zu kontrollieren sind. Außerdem hat sich diese Vorgehensweise schon bei der Modellierung und der Validierung bewährt, da hierdurch die Programmierung viel übersichtlicher und einfacher ausfällt.

Tabelle 5.2: Betriebsmittel-Collection am Beispiel des Baggers

Parameter Nr.	ident	temp	auswert
1	ID	Erdkörper (ident)	Summe Arbeitszeit
2	Bezeichnung	anzLKW	Summe m ³
3	Löffelinhalt	auflockerung	Summe Takte
4	ZeitabhängigVon	spezGewicht	Anfang Warten
5	ZeitabhängigWert	abgetrageneMenge	Ende Warten
6	Taktzeitverteilung		Summe Wartezeit
7	Zeitparamter1		Leistung
8	Zeitparamter2		Auslastung
9	Zeitparamter3		Taktzeit
10			Anfang Einsatz
11			Ende Einsatz
12			Summe Einsatzzeit
13			Wartezeit
14			Größe Warteschlange

5.5 Modellierung des Schnittstellenmoduls

Um der Parallelität der Datenstruktur in den zwei Umgebungen - CAD und Simulation - Rechnung zu tragen, die Entwicklungsarbeit zu erleichtern und um gleichzeitig eine einfache Erweiterbarkeit zu gewähren, wird im Folgenden eine spezielle Methodologie für den Aufbau der Schnittstelle entwickelt und für das ganze System nutzbar gemacht. Im Folgenden wird zunächst die grobe Struktur der Anbindung beschrieben, um anschließend auf die Modellierungseinzelheiten einzugehen.

5.5.1 Konzeption der Anbindung in der Simulationsumgebung

Das Anbindungskonzept wird aus den oben genannten Gründen so universell gehalten, dass die Grundstruktur für alle Stellen und Betriebsmittel einheitlich ist. Folglich müssen nur wenige Module komplett neu geschrieben werden, um einen reibungslosen und automatisch ablaufenden Datenaustausch zwischen den beiden Systemen zu ermöglichen. Das zentrale Modul mit dem Namen ‚XMLManager‘ ist in der obersten Hierarchie bzw. Netzebene angesiedelt und kommt im System nur einmal vor, siehe Abbildung 5.6. Wie der Name schon sagt, hat dieses Modul die Aufgabe, die Daten aus einer entsprechenden XML-Datei zu importieren und der richtigen Variable zuzuweisen; eine Aufgabe, die den Anforderungen der Vielfalt und der Kompatibilität der Daten genügen muss, siehe Abschnitt 5.4.2.

Die extrahierten Daten erscheinen in Form von Collections auf einem entsprechenden Platz im Modul ‚XMLManager‘. Die Namen der vorhandenen Plätze setzen sich aus ‚XML‘ und aus dem Namen der Betriebsmittel- oder der Arbeitsstellenmodule zusammen. Jedes Modul hat u. a. zwei Modulvariablen, die für Anbindungszwecke bestimmt sind. Es handelt sich dabei um die Modulvariablen ‚#XML‘ und ‚#ModulName‘. Initialisiert wird nur die Variable ‚#ModulName‘, und zwar mit einer Zeichenkette (String), die den Namen des Moduls wiedergibt, z.B. ‚Einschnitte‘, ‚Bagger‘ etc. Auf tieferen Hierarchieebenen ist in jedem Betriebsmittelmodul, wie ‚Bagger‘ oder ‚LKW‘ und in jedem Arbeitsstellenmodul, wie ‚Einschnitte‘ oder ‚Dämme‘, jeweils ein einziges ‚Datenmanager‘-Modul integriert.

Nach dem Speichern der Daten von der CAD-Umgebung in das XML-Dokument, soll die Simulation innerhalb der CAD-Umgebung interaktiv gestartet werden. Die XML-Daten werden von dem ‚XMLManager‘ komplett importiert und zur Weiterbearbeitung in den Netzebenen in entsprechende Collections umgewandelt, siehe Abbildung 5.7. Dieser Prozess wird im Abschnitt 5.5.2 detailliert beschrieben. Im Anschluss daran wird eine Transition in allen ‚Datenmanager‘-Modulen der Betriebsmittel- und Arbeitsstellenmodule aktiviert. Diese Transition liest den Inhalt der Modulvariable ‚#ModulName‘ und greift mit diesem Namen auf den richtigen Platz innerhalb des ‚XMLManagers‘ zurück. Damit ist der Zugang zu der dort vorhandenen Marke bzw. zu deren Daten realisiert. Die Daten die-

ser Marke werden dann von dem ‚Datenmanager‘ in eine weitere Modulvariable ‚#XML‘ geschrieben.

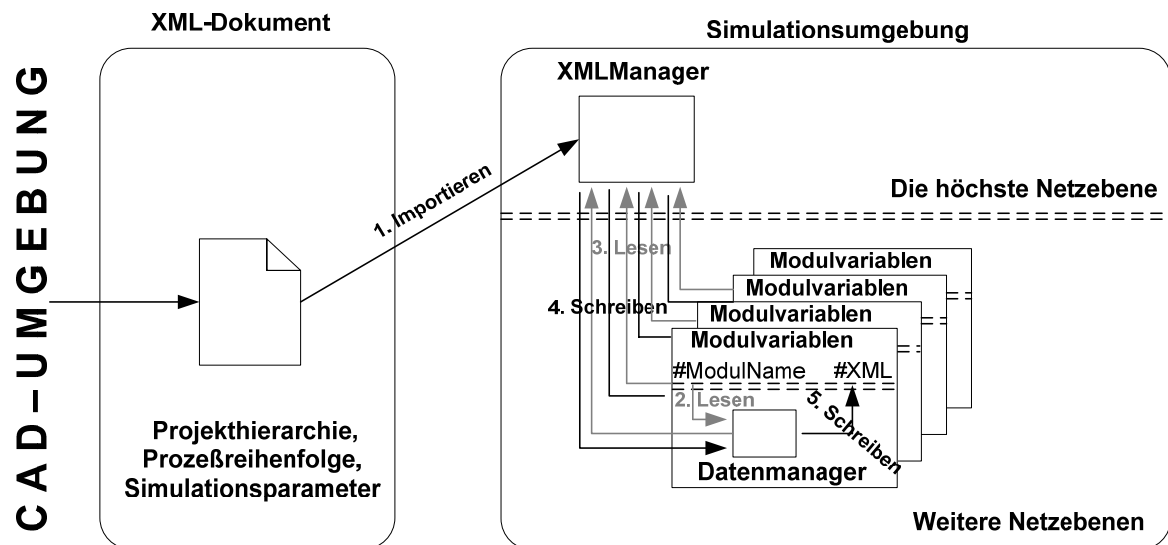


Abbildung 5.7: Das Anbindungskonzept

Unabhängig von einer Programmiersprache gibt es mehrere Methoden zur Beschreibung von Algorithmen für Programmierzeilen. Außer Flussdiagrammen findet auch der Pseudocode in diesem Zusammenhang Anwendung. Bei einem Pseudocode handelt es sich um eine halbformale, nicht standardisierte Sprache, mit der die Ablaufstrukturen eines Algorithmus grob durch Texte, meist umgangssprachlich, beschrieben werden (Davis 1999 S. 314). Der Pseudocode für die Aktion der Transition innerhalb des ‚Datenmanager‘ ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

```

Lese Variable ‚#ModuleName‘
Setze Platzname aus ‚XML‘ und dem Wert der Variable ‚#ModuleName‘
Lese das Attribut der Marke auf diesem Platz
Weise den Wert dieses Attributes der Modulvariable ‚#XML‘ zu
  
```

Abbildung 5.8: Pseudocode für den ‚Datenmanager‘

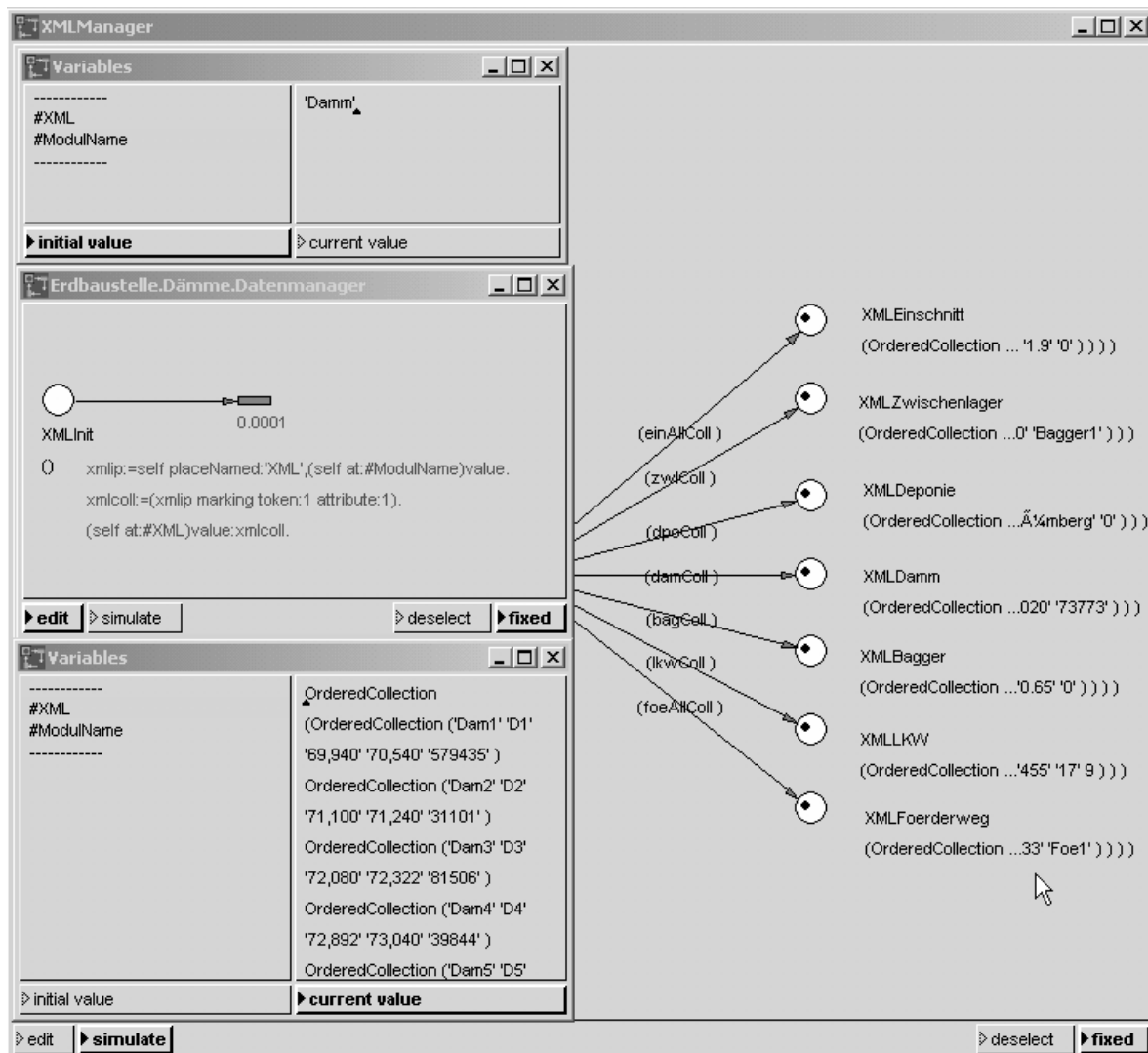


Abbildung 5.9: Das Anbindungskonzept am Beispiel ‚Damm‘

Wenn der ‚Datenmanager‘ sich beispielsweise im Modul ‚Dämme‘ befindet, wird der initialisierte Inhalt der Modulvariable ‚#ModulName‘ ‚Damm‘ heißen, siehe Abbildung 5.9. Dieser Inhalt wird mit dem Präfix ‚XML‘ zusammengesetzt und damit der Zugang zu der Marke auf einen Platz namens ‚XMLDamm‘ innerhalb des Moduls ‚XMLManager‘ gewährleistet. Die Daten von allen Dämmen der Baustelle werden daraufhin, in Form einer Collection, in die Modulvariable ‚#XML‘ des Moduls mit dem Namen ‚Damm‘ geschrieben und für die weitere Nutzung innerhalb der Netzhierarchien bereitgehalten.

5.5.2 Der ‚XMLManager‘

Wie im letzten Abschnitt beschrieben, dient das Modul ‚XMLManager‘ dazu, die Daten der XML-Datei zu importieren und für die Simulation in Form von Marken bereitzustellen.

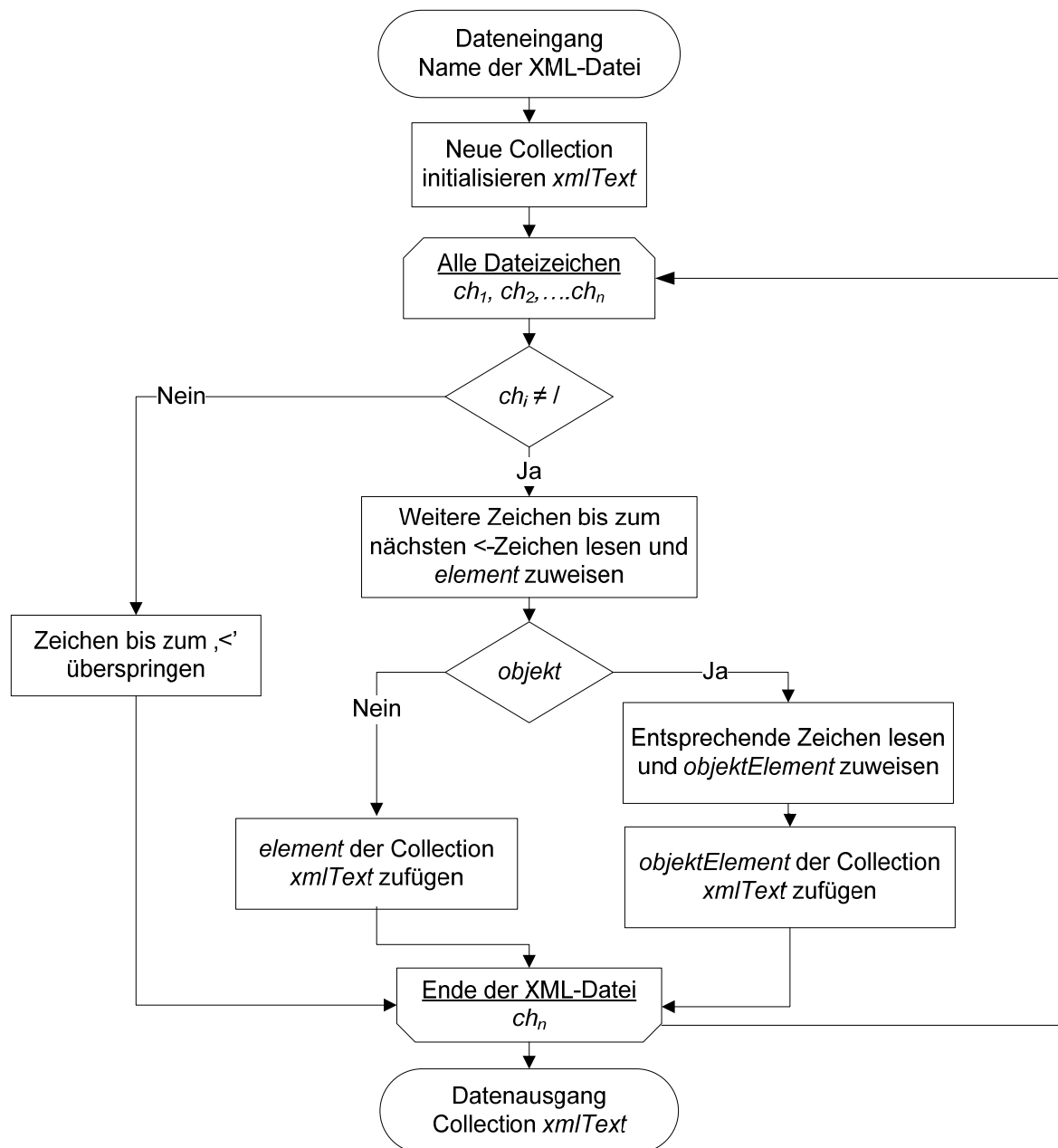


Abbildung 5.10: Datentransfer vom SRM zum Simulationssystem - der erste Schritt

Dabei sollen alle zulässigen Varianten einer XML-Datei, die in der Regel mit einem Schema definiert sind, in Betracht gezogen werden. Eine XML-Datei ist nichts anderes als eine übliche ASCII-Datei mit vordefinierten Formatierungsregeln und Aufbaustrukturen, wobei die einzelnen XML-Elemente als ‚Tags‘ beschrieben werden. Die Daten werden also in ein

‚Tag‘ gespeichert, das mit dem Zeichen ‚<Tag-Bezeichnung>‘ beginnt und mit ‚</Tag-Bezeichnung>‘ endet. Deshalb werden von Smalltalk für die Bearbeitung von Zeichenketten bereitgestellte Methoden verwendet, um aus den strukturierten Daten der XML-Datei entsprechende Marken generieren und vordefinierte Variablen parametrisieren zu können.

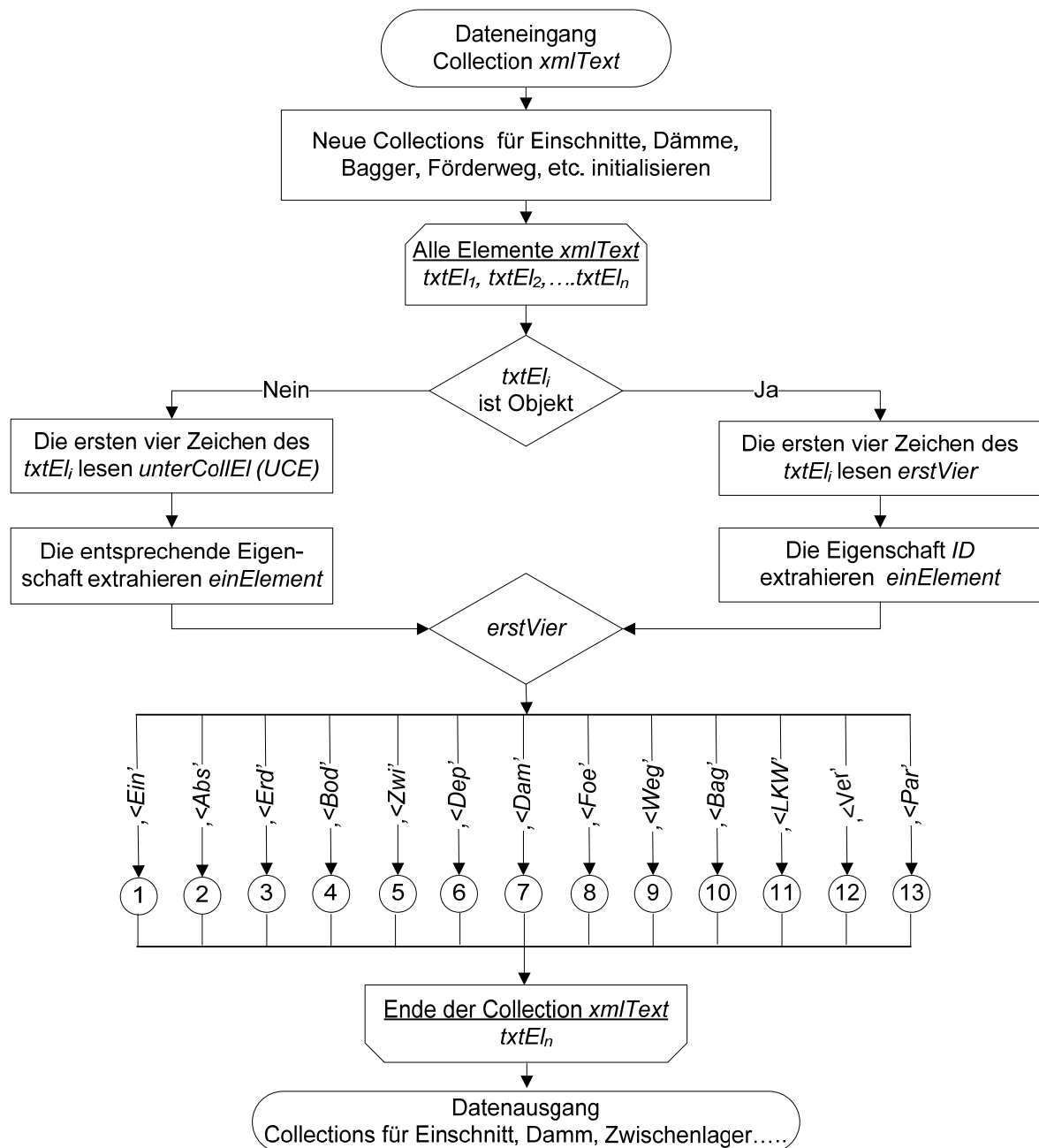


Abbildung 5.11: Datentransfer vom SRM zum Simulationssystem – der zweite Schritt

Dies wird in zwei Schritten umgesetzt. Der erste Schritt übernimmt den Datentransfer aus der XML-Datei über eine dafür bestimmte, von PACE bereitgestellte Schnittstelle

‚Stream‘. Die ausgetauschten Daten werden auf die weitere Bearbeitung abgestimmt, indem für die Simulation überflüssige Zeichenketten nicht weiter integriert werden. Die komprimierten Daten gehen aus diesem ersten Schritt als eine umfassende Collection ‚xmlText‘ hervor. Die Abbildung 5.10 zeigt die grobe Struktur der Programmierung in Form eines Programmablaufplans nach DIN 66001.

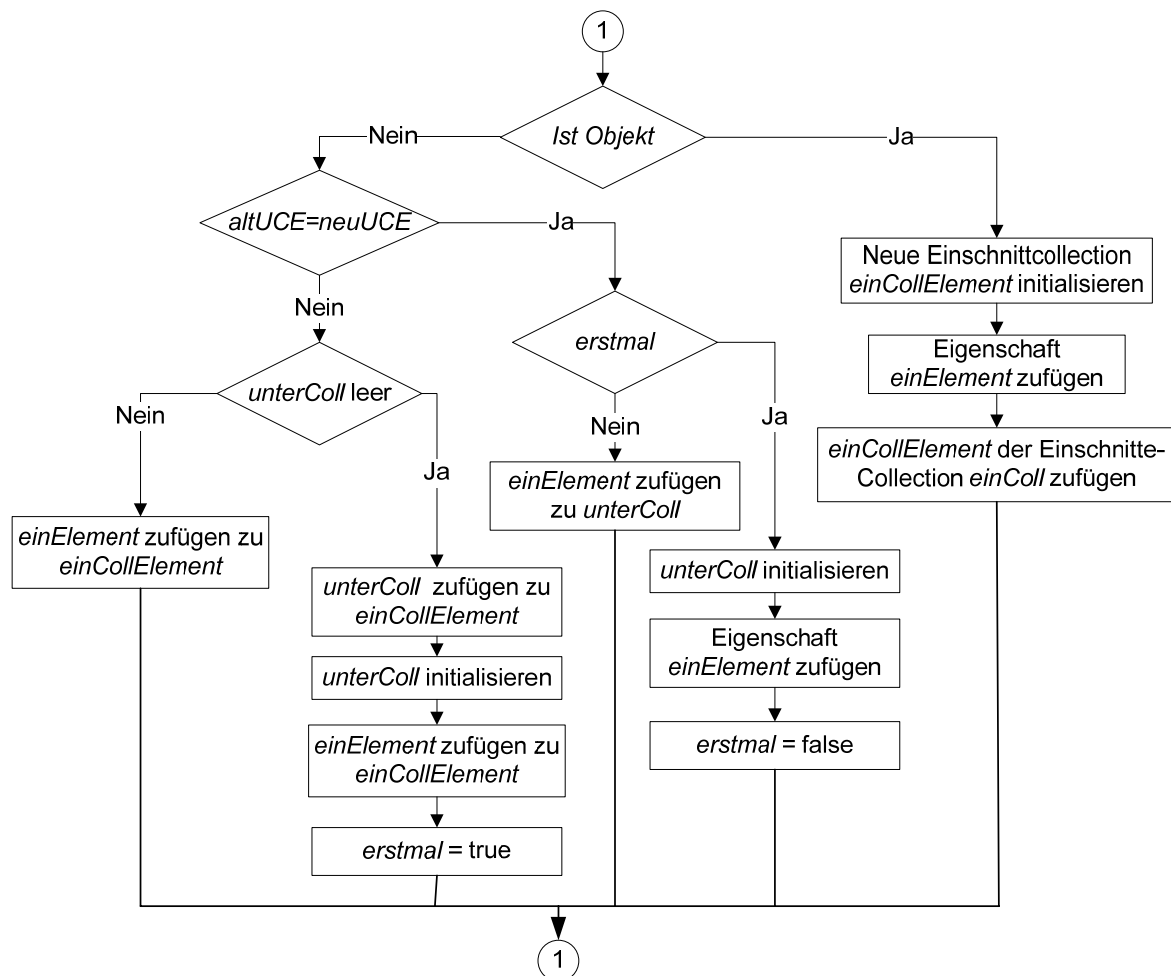


Abbildung 5.12: Datentransfer vom SRM zum Simulationssystem – XML-Elemente

Im nächsten Schritt sollen aus der umfassenden Collection ‚xmlText‘ mehrere Collections formuliert werden, wodurch die Modellobjekte mit ihren Eigenschaften simulationsgerecht strukturiert werden. Mit anderen Worten, es sollen unterschiedliche Ausgangscollections entstehen, die jeweils alle Objekte einer Klasse beinhalten.

Zum Beispiel enthält eine Bagger-Klassencollection ‚bagColl‘ Objektcollections für alle zur Verfügung stehenden Bagger. Diese Objektcollection repräsentiert eine Untercollecti-

on der später zu generierenden Marke, die als ‚ident‘ definiert wird, siehe Abschnitt 5.4.2, und trägt identifizierende Informationen, die aus der CAD-Umgebung in die Simulation eingelesen werden. Die Abbildung 5.11 gibt einen Überblick über die Vorgehensweise bei der Programmierung dieses zweiten Schrittes. Für alle Verzweigungen von 1 bis 13 zur Behandlung von XML-Elementen ist nur die Nummer 1 exemplarisch in der Abbildung 5.12 dargestellt. Für einfache und komplexe Typen der XML-Datei, wie für ‚Verteilung‘ oder ‚Parameter‘, die sich innerhalb der einzelnen XML-Elemente wiederholen, gilt eine andere Vorgehensweise, die hier nicht thematisiert wird.

Die Simulation ‚weiß‘ nicht, um welche Daten es sich handelt, sie verarbeitet nur Daten an bestimmten Stellen in einer Collection, nach einem im Netz vorprogrammierten Muster. Aus diesem Grund sind die Reihenfolge der Informationen und deren Position innerhalb einer Collection von großer Bedeutung für die Simulation. In der XML-Datei können sich einige ‚Tags‘ beliebig wiederholen und dadurch theoretisch die Positionen der Daten in der ident-Collection verändern. Um dieses Problem zu lösen, werden solche Wiederholungen in eine zusätzliche Untercollection ‚unterColl‘ innerhalb der ‚Haupt‘-Collection, also ident-Collection, gespeichert. Mehrere LKW können beispielsweise für die Bedienung eines Baggers, der zum Aushub eines Erdkörpers bestimmt ist, eingesetzt werden, siehe in Abbildung 4.5 die Klasse ‚Erdkörper‘. Dies würde die Position der nächsten Eigenschaft ‚Füllfaktor‘ um einige Positionen verschieben und die Transitionsinskriptionen, die auf diese Stelle in der Collection zurückgreifen folglich nicht auf den Füllfaktor zutreffen, sondern auf den zweiten LKW. Deshalb sind alle LKW in einer Untercollection zu speichern und nur die eine Position der Eigenschaft ‚LKW‘ zu belegen.

5.6 Modellierung des Systems

Die Beschreibung der Modellierung orientiert sich an der von der VDI-Richtlinie empfohlenen methodischen Vorgehensweise (*VDI 3633 Blatt 1 S. 14 ff.*), wobei die dort definierten zwei Modellierungsstufen nicht getrennt behandelt werden.

5.6.1 Festlegung der Modellelemente und der Systemgrenzen

Die Gestaltung der Netzhierarchien folgt dem im Abschnitt 4.4.1 beschriebenen Konzept und gliedert die Baustelle in der ersten Hierarchie in fünf Unternetze bzw. Module. Diese

repräsentieren Einschnitte, Dämme, Zwischenlager, Deponien und Förderwege, siehe Abbildung 5.5. Da die ganze Modellierung betriebsmittelorientiert ist, werden in den folgenden Hierarchien entsprechende Betriebsmittelmodule aufgebaut. So sind die Module ‚Bagger‘ und ‚Lkw‘ innerhalb des Moduls ‚Einschnitte‘ zu finden. Die tiefere Hierarchie umfasst die von den jeweiligen Betriebsmitteln durchgeführten Standardprozesse. Die Betriebsmittel an sich werden als Marken modelliert und repräsentieren somit die Transportmittel im System. Das Modul ‚Förderwege‘ stellt eine Verteilungsstelle an die anderen Module dar. Es wird in zwei Untermodule ‚Hinfahrt‘ und ‚Rückfahrt‘ untergliedert.

Die in dem SRM definierte Einteilung der Einschnitte in Abschnitte oder der Förderwege in Förderwegabschnitte wird in der Simulation mit Hilfe der Modulvariablen umgesetzt. Die Erdkörper sind die Materialien, die mit den Betriebsmitteln die entsprechenden Prozesse durchlaufen. Sie werden somit als Prozessträger modelliert. Mit anderen Worten kann man Bagger, Lkw und Erdkörper als dynamische Systemlasten bezeichnen, während alle anderen Modellelemente als statische Netzelemente abgebildet werden.

Eingangsgrößen sind die in dem SRM gespeicherten Daten. Sie gelangen in das Simulationssystem über mehrere Quellen, und zwar ist in jedem Modul ein weiteres Initialisierungsmodul integriert mit einem entsprechenden Namen, wie ‚BagInit‘, das die Daten aus dem ‚XML‘-Modul an die entsprechende Stelle weiterleitet. Somit werden Abschnittdaten in eine Modulvariable ‚Abschnitte‘ des Moduls ‚Einschnitte‘ geschrieben, während Baggerdaten innerhalb des Initialisierungsmoduls zu Marken mit dem im Abschnitt 5.4.2 beschriebenen Aufbau umgesetzt werden. Die drei Arten von Marken, die Prozessträger Bagger, Lkw und Erdkörper, werden auf die relevanten Plätze ‚Bagger frei‘, ‚Warteschlange Lkw‘ und ‚Erdkörper‘ verteilt. Alle Systemquellen befinden sich somit in dem Modul ‚Einschnitte‘.

Die Systemsenken stellen die Module ‚Deponien‘ und ‚Dämme‘ dar. Hier kommen die Erdkörperdaten mit den Lkw-Marken an und werden zur Auswertung genutzt. Die Erdkörpermarken gehen also an diesen Stellen aus dem System.

Ausgangsgrößen des Simulationssystems sind ebenfalls an unterschiedlichen Stellen abzulesen. Einerseits sammeln die Marken in der dritten Collection Auswertungsdaten der Betriebsmittel, wie Leistung, Auswertung etc., andererseits können bestimmte Daten, wie das

Volumen, in den Modulvariablen gespeichert werden. Eine weitere Anwendung können die Ausgangsgrößen durch erneute Übernahme in das SRM finden, z.B. können die Dauern für die Bearbeitung eines Erdkörpers zur Vervollständigung der Terminplanung dienen.

5.6.2 Festlegung der Aufbaustruktur des Systems

Die Struktur des Systems wird in dem vorigen Abschnitt grob beschrieben und in Abbildung 5.13 anschaulich, mit Hilfe eines Flussdiagramms, dargestellt. Dabei werden die Beziehungen zwischen den Elementen ersichtlich. Die Erdkörper werden im Flussdiagramm als Prozessträger durch einen Kreis dargestellt. Sie gehen in das System innerhalb des Moduls ‚Einschnitte‘ ein. Alle nachfolgenden Elemente des Flussdiagramms bis zum nächsten Modul verstehen sich als Inhalt des oberen Moduls. So werden ‚Baggerarbeit‘ und ‚Lkw‘ in das Modul ‚Einschnitte‘ integriert, wobei die Bearbeitung durch den Bagger als eine einzige Bearbeitungsstation ‚Baggerarbeit‘ und die ‚Lkw‘ als ein Transportmittel dargestellt sind. Diese Bearbeitungsstation deutet auf die Bearbeitung durch den Bagger hin und beinhaltet somit mehrere Prozesse, wie Warten, Manövrieren, Laden usw. Sie ist als ein statisches Element dargestellt, so dass mehrere Bagger parallel arbeiten können. Die Bagger gehen deshalb auch in das System als Prozessträger ein.

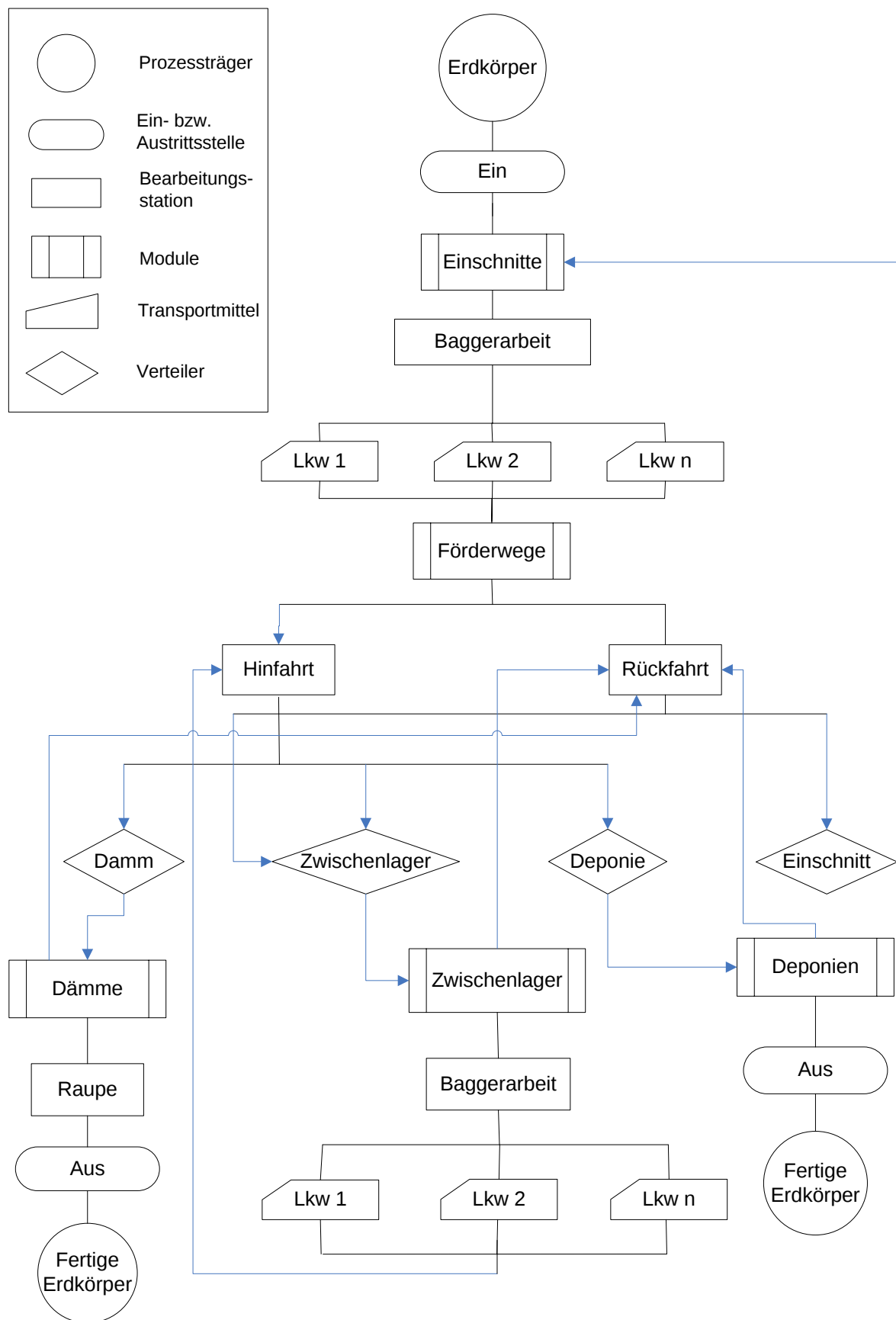


Abbildung 5.13: Die Aufbaustruktur des Simulationssystems als ein Flussdiagramm

Nach der Bearbeitung werden die Erdkörper auf Lkw geladen und gelangen dann in das Modul ‚Förderwege‘. Innerhalb des Moduls ‚Förderwege‘ zeigt der Pfeil die Flussrichtung der Lkw. Wenn die Lkw das Modul ‚Einschnitt‘ verlassen, wird die Bearbeitungsstation ‚Hinfahrt‘ eingeschaltet. Je nach dem definierten Ziel kann der Lkw Richtung Damm, Zwischenlager oder Deponie fahren und somit in die Module ‚Dämme‘, ‚Zwischenlager‘ oder ‚Deponie‘ münden. Wenn die Erdkörper zwischengelagert werden, werden sie zu einem späteren Zeitpunkt von Baggern bearbeitet und auf Lkw geladen. Anschließend gehen sie aus dem Modul ‚Zwischenlager‘ in das Modul ‚Förderwege‘ über die Bearbeitungsstation ‚Hinfahrt‘ ein und werden zu dem entsprechenden Damm gefahren. Die leeren Lkw kommen zum Modul ‚Förderwege‘ über die Bearbeitungsstation ‚Rückfahrt‘ zurück und werden zu dem entsprechenden Einschnitt oder Zwischenlager befördert. In den Modulen ‚Dämme‘ und ‚Deponien‘ werden dann Daten gesammelt, und die fertig bearbeiteten Erdkörper verlassen das System.

5.6.3 Festlegung der Ablaufstruktur des Systems

5.6.3.1 Prozess- und Projektmodellierung

Das entwickelte Simulationssystem eignet sich sowohl für die Prozess- als auch für die Projektanalyse. Die beschriebene Struktur des Straßenbauprojektes besteht aus fünf aufeinander folgenden Prozessen: Lösen, Laden, Transportieren, Einbauen und Verdichten. Diese Prozesse werden von Mensch und Maschine durchgeführt und verändern somit die Systemelemente und ihre Struktur. Sie wiederholen sich solange, bis das ganze Projekt fertig gestellt ist. Insofern stellt ein Straßenbauprojekt ein Arbeitssystem im Sinne der REFA-Methoden dar. Die Behandlung der Prozesse in Arbeitssystemen beinhaltet die Beschreibung der Ablaufabschnitte als Teile des gesamten Arbeitsablaufes. In diesem Zusammenhang definiert REFA Makro- und Mikro-Ablaufabschnitte (*REFA 1984 S. 58*). Das entwickelte Simulationssystem stellt einen Teilablauf der definierten Aufgabe, also des Erdbaus, gemäß Abbildung 5.14 dar.

Bei der Simulation werden lediglich folgende Ablaufstufen der Erdarbeiten, gemäß des Leistungsverzeichnisses, betrachtet: Lösen/Laden und Transportieren. Das Konzept kann auf die Ablaufstufen: Einbauen und Verdichten übertragen werden, stellt jedoch keinen Gegenstand der Arbeit dar. Jedoch können für diese Ablaufstufen wichtige Aussagen mit-

tels der Simulation, wie erforderliche Planierleistung, getroffen werden. Da eine Simulationsstudie so detailliert wie nötig durchzuführen ist, stellt sich die Frage nach der Abbildungstiefe. Die Darstellung der Vorgangselemente dieser Aufgabe, also Lösen, Heben, Schwenken, Entleeren, Senken, ist lediglich für reine Prozessverbesserungsmaßnahmen von Relevanz. Zur baubetrieblichen Durchführung der Erdbauprozesse auf der Baustelle werden Vorgangsstufen repräsentiert, durch Maschinenspiele bzw. Takte betrachtet (*Franz und Chahrour 2002*).

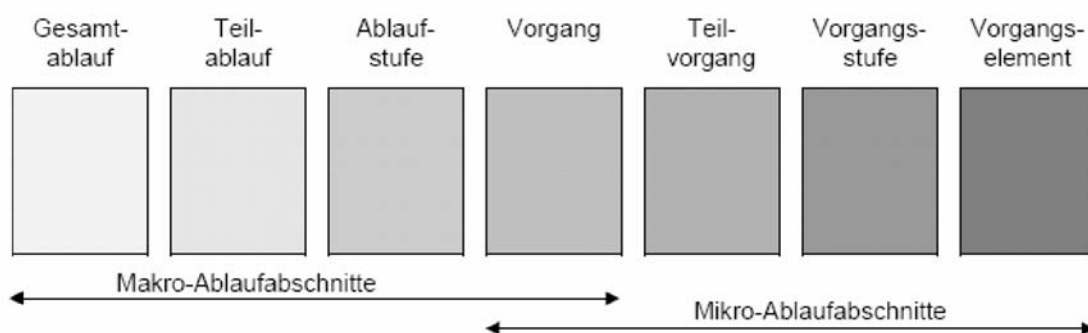


Abbildung 5.14: Makro- und Mikroablaufabschnitte (REFA 1984 S. 58)

Die betrachteten Prozesse umfassen also Bagger- und Lkw-Spiele, die im Sinne von *REFA* Vorgangsstufen darstellen. Dabei können bestimmte Prozessregeln definiert werden. Prozessregeln sind nach *Komarnicki (1980 S. 89 ff.)* in Prozesssteuerungs- und in Bearbeitungsregeln gegliedert, und diese wiederum in verschiedene Regelarten unterteilt. Im Folgenden werden diese Regeln auf das zu simulierende System angewandt:

- Prozesssteuerungsregeln beschreiben die Steuerung des Flusses der Prozessträger durch die anderen Modellelemente. Sie beinhalten:
 - a) Eintrittsregeln: Die Erdkörper fließen als Prozessträger in das System ein nach einer bestimmten, in der Terminplanung definierten Reihenfolge. Die Ankunftszeitintervalle können nicht mathematisch durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben werden.
 - b) Durchlaufregeln: Die Prozessträger bewegen sich vom Bagger zum Lkw und werden dann entweder temporär auf Zwischenlager oder permanent auf Dämmen oder Deponien gelagert. Die temporär gelagerten Erdkörper werden dann nach einer ebenfalls in der Terminplanung de-

finierten Eintrittsreihenfolge wieder der gleichen Durchlaufregel folgen.

- c) Verteilungsregeln: Im Wesentlichen sind drei Verteilungsregeln identifizierbar. Die Erdkörper werden nach einem Attribut, das als eine Eigenschaft ‚Abbaumaschine‘ den jeweiligen Erdkörper identifiziert, auf Bagger verteilt. Das Gleiche gilt für die Zuweisung einiger Lkw zu einem bestimmten Bagger; das wird mit der Erdkörpereigenschaft ‚Lkws‘ beschrieben. Ferner werden Lkw über Förderwege zu einem bestimmten Ziel hin- und zurückbefördert, wobei ‚Förderweg‘ und ‚Ziel‘ ebenfalls Erdkörpereigenschaften sind.
 - d) Störungsregeln: Wie schon erwähnt, werden keine technischen Störungen, wie beispielsweise Maschinenausfall, implizit behandelt. Nur solche Störungen, wie in Folge schlechten Wetters, anderer unerwarteter Bodenart, deren Wirkung auf die Bearbeitungsdauer mathematisch durch Verteilungsfunktionen erfassbar ist, können einbezogen werden.
- Bearbeitungsregeln beschreiben die Beziehungen zwischen den Modellelementen, die zum betrachteten Ablauf im Realsystem führen und umfassen die in der ersten Spalte der Tabelle 5.3 dargestellten Regeln. In der Tabelle sind außer Erdkörpern auch Bagger und Lkw als Prozessträger erfasst, wobei diese beiden eigentlich eher als Transportmittel zu betrachten sind. Der Grund dafür ist, dass sie auch Bearbeitungsstationen durchlaufen und somit Bearbeitungsregeln unterliegen. Obwohl die Regeln unterschiedlich für Prozessträger und/oder für Bearbeitungsstationen gelten, können sie mit Hilfe der Angabe des jeweiligen Moduls in Tabellenform verdeutlicht werden.

Tabelle 5.3: Bearbeitungsregeln des Simulationssystems

Bearbeitungsregeln	Erdkörper	Bagger	Lkw
Zutrittsregeln	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: Je nach Reihenfolge und zugewiesenen, verfügbarem Bagger werden die Erdkörper beladen.	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: Wenn ein Bagger einen Erdkörper und freie Lkw zugewiesen bekommt, beginnt das Laden.	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: Lkw wartet vor der Beladestation in einer FIFO*-Warteschlange. Das Beladen erfolgt, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind: Lkw leer, der mit dem Attribut ‚LKWs‘ des Erdkörpers bestimmten Bagger frei ist. - Module ‚Dämme‘, ‚Zwischenlager‘ und ‚Deponien‘: Lkw voll, gemäß Angaben in der Ziel-Collection werden folgende Ziele angefahren: Deponie, Damm oder Zwischenlager.
Kapazitätsregeln	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: Ein Erdkörper wird von einem Bagger bearbeitet.	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: Der Bagger nimmt einen Erdkörper auf und arbeitet in jedem Takt je nach Löffelgröße ein Teil von ihm ab. Für jeden Takt werden nur ein Bagger und ein Lkw benötigt.	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: Warteschlange kann so groß wie die Anzahl der vorhandenen Lkw sein. In jedem Takt wird nur ein Lkw einbezogen. Bodenmenge auf Lkw wird von seinen technischen Eigenschaften bestimmt.
Transformationsregeln	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: mathematische Funktionen zur Berechnung der mit jedem Takt abgetragenen Teilmenge des Erdkörpers, so wird er in Löffelmengen dann in Lkw-Ladung umgewandelt.	Erfährt keine Transformationsregeln	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: durch das Laden wird der Lkw mit Bodenmengen nach mathematischer Funktionen beladen. - Module ‚Dämme‘, ‚Zwischenlager‘ und ‚Deponien‘: in diesen Modulen wird der volle Lkw wieder in einen leeren transformiert.

* FIFO: First in first out

Bearbeitungsregeln	Erdkörper	Bagger	Lkw
Freigaberegeln	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: wird allmählich Löffel- und Lkw-Weise freigegeben.	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: Bagger wird freigegeben, wenn der zugewiesene Erdkörper fertig ist.	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: wenn der Lkw beladen wird. - Modul ‚Förderwege‘: wenn die Fahrtdauer verstrichen ist. - Module ‚Dämme‘, ‚Zwischenlager‘ und ‚Deponien‘: wenn der Lkw leer ist.
Regeln für die Bearbeitungsdauer	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: hängt von der Menge des Erdkörpers und von den für das Laden benötigten Dauern, die meist durch Verteilungsfunktionen modelliert werden, ab.	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: durchläuft mehrere Stationen, wie warten und laden, deren Dauern entweder ablaufabhängig oder als Parameter des Erdkörpers stochastisch sind.	- Module ‚Einschnitte‘ und ‚Zwischenlager‘: durchläuft mehrere Stationen, wie warten, manövrieren und laden teilweise mit stochastischen Dauern. - Modul ‚Förderwege‘: hier wird je nach Lkw- und Weg- Parameter die möglicherweise zufallsbedingte Fahrtdauer berechnet. - Module ‚Dämme‘, ‚Zwischenlager‘ und ‚Deponien‘: Entladezeit ist deterministisch oder stochastisch als Parameter des Lkw definiert.

5.6.4 Beschreibung der Netzhierarchien

Im Folgenden werden die Netzhierarchien beschrieben, deren Anordnung am Simulationsablauf orientiert ist. Dabei wird der Durchlauf eines Prozessträgers über alle Hierarchien verfolgt, ferner werden die ablaufenden Prozesse beschrieben. Die beschriebenen Aktivitäten sind mit Smalltalk programmiert und in den Transitionen in Form von Bedingungen-, Verzögerungs- oder Aktions-Codes hinterlegt, siehe Abschnitt 5.1.

5.6.4.1 Initialisierung des Systems

Mit der Systeminitialisierung wird die Simulationsuhr auf Null gesetzt. Sobald die Simulation startet, werden im ersten Schritt alle Transportmittel- und Prozessträgermarken generiert. Sobald die Marken generiert sind, kann ein Simulationslauf beginnen. Wie im Abschnitt 5.5.2 erläutert ist, werden von Untermodulen namens ‚...Init‘ entweder Moduldaten in Modulvariablen gespeichert oder Marken nach einem festgelegten Schema generiert, siehe Abschnitt 5.4.2. Diese Init-Module greifen auf entsprechende Stellen in dem Modul ‚XML‘ zurück und lesen die Daten entsprechend ein, siehe Abschnitt 5.5.

Einschnitte, Abschnitte und Erdkörper werden gesondert in einem Modul mit dem Namen ‚Terminplanung‘ initialisiert. Während die Daten der Einschnitte und der Abschnitte in Modulvariablen auf Modulebene bereitgehalten werden, werden die Erdkörperdaten in Marken umgewandelt, gemäß einer aus der Terminplanung extrahierten Reihenfolge. Zunächst wird ein Basisterminplan automatisch erstellt, in dem die hierarchische Struktur des Projektes mit Einschnitten, Abschnitten und Erdkörpern in die Vorgangsliste geschrieben wird. Die Verarbeitung des jeweiligen Erdkörpers wird somit als ein Vorgang betrachtet. Dazu werden die benötigten Ressourcen ebenfalls automatisch in die entsprechende Spalte des Basisterminplans abgelegt. Die Vorgänger-Beziehungen der Vorgänge bzw. der Erdkörper sollen interaktiv vom Anwender eingegeben und dabei drei Erdkörpereigenschaften gespeichert werden: ‚MsId‘, ‚Vorgaenger‘ und ‚Reihenfolge‘. Die ersten zwei Eigenschaften werden aus dem Basisterminplan in XML gespeichert, siehe Abschnitt 6.4.3.

Setze Vorgaenger zu Null und Reihenfolge zu eins
 Trenne Erdkörper mit AA- von denen mit EA-Beziehung in eine gesonderte Collection
 Schleife anfangen
 Suche in EA-Collection nach Erdkörper mit Vorgaenger und Reihenfolge zuweisen
 Vorgaenger initialisieren und die MsId dieser Erdkörper Vorgaenger zuweisen
 Suche in AA-Collection nach jedem Element in Vorgaenger und Reihenfolge zuweisen
 MsId aus AA-Collection in Vorgaenger schreiben
 Reihenfolge erhöhen
 Schleife wiederholen bis an alle Erdkörper eine entsprechende Reihenfolge vergeben ist

 Je Erdkörper eine Marke mit drei Untercollections ident, temp und auswert erzeugen
 Die Marken der Reihenfolge nach sortieren
 Marken auf ‚Erdkörper’-Platz in Modul ‚Bagger’ legen.

 Die gleichen Schritte mit Erdkörpern auf Zwischenlagern wiederholen
 Marken ebenfalls auf ‚Erdkörper’-Platz in Modul ‚Bagger’ legen.

Abbildung 5.15: Pseudocode für die Initialisierung von Erdkörpermarken

In diesem Basisterminplan sind von den bekannten Vorgängerbeziehungen lediglich Anfang-Anfang- (AA) und Ende-Anfang (EA)-Beziehungen zugelassen, mit dem Ziel, eine geeignete Reihenfolge für die Simulation zu erzeugen. Die Abbildung 5.15 beschreibt exemplarisch, mit Hilfe eines Pseudocodes, die Vorgehensweise bei der Berechnung der Reihenfolge und der Generierung der Erdkörpermarken. Auch Erdkörper, in deren ‚Ziel’-Eigenschaft eine Zwischenlagerung vorgesehen ist, werden erfasst und an die anderen Erdkörper angefügt.

5.6.4.2 Das Modul ‚Einschnitte’

Nach der Initialisierung stehen alle XML-Daten für die weitere Bearbeitung, mittels der die entwickelten Petri-Netz-Module zur Verfügung. Der Ablauf beginnt in dem Modul ‚Einschnitt’, siehe Abbildung 5.5, genauer gesagt, in dem Untermodul ‚Bagger’, siehe Abbildung 5.16. Dort werden die Bagger auf dem Platz ‚Baggerfrei’, die Lkw auf dem Platz

‚Warteschlange Lkw‘ und die Erdkörper auf dem Platz ‚Erdkörper‘ initialisiert. Zuerst werden durch die Transition ‚Input aktuelle Erdkörper‘ die aktuellen Erdkörper sortiert, also beginnend mit der Reihenfolge 1. Diese werden in der Transition ‚Zuweisung‘ dem Bagger, der in der Erdkörpereigenschaft ‚Abbaumaschine‘ benannt ist, zugewiesen. Dies geschieht, in dem die Erdkörpermarke in die temp-Collection der Baggermarke geschrieben wird. Auf dem Platz ‚Verteiler‘ entscheidet sich, ob der Erdkörper in dem Einschnitt-Module weiterbearbeitet, was anfangs immer der Fall ist, oder ob er auf Zwischenlager von dem entsprechenden Bagger ausgehoben werden muss, siehe Abschnitt 5.6.4.4.

Auf dem Einschnitt wird die Marke zu der Transition ‚WeiterEinschnitt‘ weitergeleitet und dort für den aktuellen Bagger in die Modulvariable ‚AktBagger‘ gespeichert. Dies ist nötig, weil die später zugewiesenen Lkw freigestellt werden, nach dem der Bagger den Erdkörper fertig stellt. Im Anschluss an diesen Schritt wird ein Lkw gemäß der Erdkörpereigenschaft ‚Lkws‘ gewählt und ein Verweis auf den zu bedienenden Bagger in seine temp-Collection geschrieben. Hier muss darauf geachtet werden, dass nur die dem Bagger zugewiesenen Lkw nach einer FIFO-Strategie geladen werden. Wenn dieser nicht vor Ort ist, soll der Bagger warten. Nach dem Warten kommt die Manövrierung, die sowohl den Bagger als auch den Lkw bindet. Dabei ist die Verzögerung von den herrschenden Einsatzbedingungen insofern abhängig, als dass eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Dauer für jeden Erdkörper definiert werden kann.

Anschließend kann das eigentliche Laden beginnen, wobei einzelne Takte bzw. Baggerspiele modelliert werden. Da das System nicht nur zur Analyse des Gesamtablaufs der Erdarbeiten auf Straßenbaustellen dient, also eine Produktsimulation ermöglicht, können auch Prozesse näher betrachtet und somit eine Prozesssimulation durchgeführt werden. Allerdings ist die Detaillierungstiefe der Prozessbetrachtung auf einem Niveau gehalten, dem die Bauleitung bei dem täglichen Baustellenbetrieb auch Beachtung schenkt. Die Prozesssimulation liefert dadurch quantitative Aussagen über die Dimensionierung und das Zusammenspiel der Maschinen, unter den Gegebenheiten der Baustelle. Dies ist dadurch realisiert, dass für jeden Bagger attributabhängige Spielzeiten definierbar sind. Die Attribute lauten ‚Baggerfahrer‘, ‚Bodenklasse‘ oder ‚Einsatzbedingungen‘, wobei diese für jeden Erdkörper frei definiert werden können.

Außerdem kann ein unterschiedlicher Füllfaktor für jeden Erdkörper eingegeben werden, so dass die Anzahl der erforderlichen Baggerlöffel pro Lkw, auch in Abhängigkeit von dem abgetragenen Boden, entsprechend anders ist. Es sei darauf hingewiesen, dass, in Abweichung von dem hier beschriebenen Verfahren, die Füllmenge auch mit einem Füllfaktor, basierend auf einer statistischen Verteilung, beschrieben werden kann.

Die Berechnung der Ladezeit erfolgt somit unter Bezugnahme auf alle relevanten Attribute, die sowohl in Marken als auch in Modulvariablen gespeichert sind. So wird z.B., wenn die Ladezeit eines Baggers von der Bodenklasse abhängig ist, das spezifische Gewicht des Bodens des bearbeiteten Erdkörpers benötigt. In diesem Fall ist dieses Attribut in der Modulvariable ‚Bodenklasse‘ bereitgehalten.

Die Schleife des Ladens wiederholt sich solange, bis der Lkw beladen oder der Erdkörper ausgehoben ist. Danach verlässt der beladene Lkw das Modul ‚Einschnitte‘ in Richtung des Moduls ‚Fördern‘ über den Platz ‚ausEinschnitt‘. Der Platz ‚ausEinschnitt‘ befindet sich in einer oberen Hierarchie und wird deshalb in Grau dargestellt. Später wird dieser Lkw in das Modul ‚Einschnitte‘ über den Platz ‚zumEinschnitt‘ fließen. Der Bagger wird dann einen anderen Lkw aus der Warteschlange bedienen, wenn der Erdkörper noch in Bearbeitung ist. Im anderen Fall wird dem Bagger der nächste Erdkörper, gemäß der eingegebenen Reihenfolge, zugewiesen. Dann werden alle die ihm zuvor zugewiesenen Lkw abgelöst. Das heißt, die Lkw tragen keinen Verweis auf diesen Bagger mehr, sondern stehen dem nächsten Bagger zur Verfügung.



5.6.4.3 Das Modul ‚Fördern‘

Dieses Modul bildet die Transportprozesse bzw. die Last- und Leerfahrten der Lkw in allen Richtungen ab. Daher ist es in die beiden Untermodule ‚Hinfahrt‘ und ‚Rückfahrt‘ gegliedert. Die Förderrichtung des Lkw hängt von den entsprechenden Eigenschaften der abgetragenen Erdkörper, wie Ziel und Quelle, ab, die in die temp-Collection des Lkw gespeichert werden. Weil dieses Modul eine Verbindungsstelle aller anderen Module darstellt, liegen alle Plätze dieser Ebene eigentlich in anderen Modulen und sind deshalb in Grau angezeigt, siehe Abbildung 5.17. In diesem Modul werden keine zusätzlichen Marken initialisiert. Lediglich wird auf die Daten der Modulvariablen zurückgegriffen, um die Förderwegeigenschaften für die Berechnung der Fahrzeit durchführen zu können.

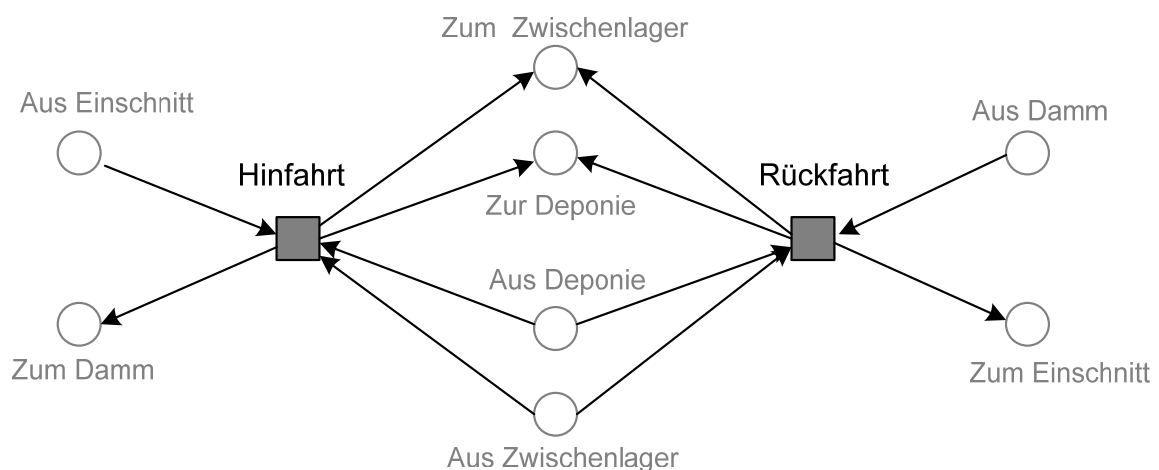


Abbildung 5.17: Das Modul ‚Fördern‘

Die Schnittstellenplätze des Moduls ‚Fördern‘ werden entsprechend der Anbindung an die jeweiligen Module benannt. Dem Namen eines Moduls wird das Präfix ‚Aus‘ für Quelle oder ‚Zum‘ für Ziel vorgeschaltet. Dabei ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten, die in der Abbildung 5.18 skizziert sind.

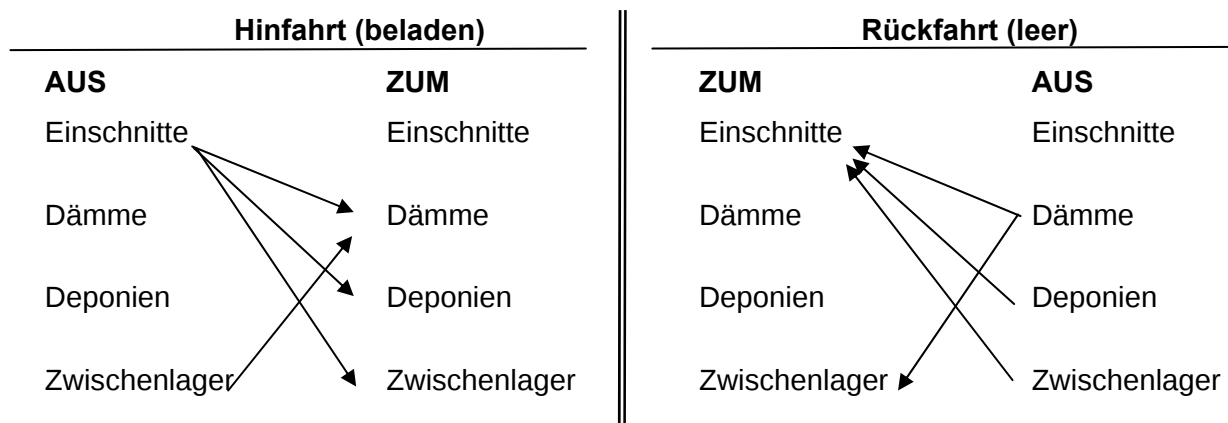


Abbildung 5.18: Verteilungsmöglichkeiten der Lkw in dem Modul ‚Fördern‘

Weitere Möglichkeiten, wie z.B. zusätzliche Bodenmengen für den Einbau der Dämme aus Deponien zu transportieren, deckt die Arbeit nicht ab, weil der Schwerpunkt vor allem auf den Bereich der Einschnitte gelegt wird. Diese Möglichkeit einzuschließen, bedarf einer Erweiterung der in SRM definierten Deponie-Klasse um Erdkörper, die als Dämme einzubauen sind.

In dem Modul ‚Hinfahrt‘ wird zuerst die Dauer der Fahrt berechnet und in der temp-Collection des Lkw gespeichert. Die weiteren Transitionen dienen dem Verteilen der Erdkörper auf die entsprechenden Stellen und zum Durchführen aller erforderlichen Berechnungen, siehe Abbildungen 5.19 und 5.20. Die Dauer ergibt sich aus der Geschwindigkeit, die als Attribut des ‚Wegabschnittes‘ in einer entsprechenden Modulvariablen bereitgehalten wird, und aus der Entfernung. Bezüglich der Geschwindigkeit sind in dem SRM zwei Möglichkeiten vorgesehen:

- Die erste Möglichkeit besteht darin, einen Geschwindigkeitswert für jeden Abschnitt eingeben zu können. Dieser Wert kann entweder deterministisch oder mit einer Verteilungsfunktion stochastisch errechnet werden.
- Die zweite Möglichkeit besteht darin, einen Geschwindigkeitswert für die Lastfahrt auf jedem Wegabschnitt berechnen zu können. Diese Berechnung baut auf dem Zusammenspiel des Lkw und des Wegs, unter Berücksichtigung der Fahrwiderstände und der Lkw-Leistung, auf. Demnach ergibt sich die Geschwindigkeit aus der folgenden Gleichung (Kühn 1984 S. 182), wobei alle benötigten Attribute, gemäß SRM, eingegeben werden müssen:

$$V_{\max} = \frac{3,6 \cdot P_{mo} \times \eta}{(G_N + G_E)(w_r \pm w_i)} \quad [Km / h] \quad V_m = k \times V_{\max}$$

Wobei:

K Geschwindigkeitskorrekturfaktor, hängt u.a. von der Streckenabschnittslänge ab und ist einer Tabelle in *Bauer (1994 S. 123)* zu entnehmen, siehe Tabelle 5.4.

P_{mo} Motorleistung [kW].

η Gesamtwirkungsgrad und liegt zwischen 0,75 und 0,85 (*Bauer 1994 S.123*)

$(w_r \pm w_i)$ Roll- und Steigungswiderstandsbeiwerte (*Kühn, 1984 S.180*).

$(G_N + G_E)$ Gesamtgewicht des Fahrzeuges als Summe des Eigengewichtes und der Nutzlast [kN].

Die Geschwindigkeit für die Rückfahrt errechnet sich vereinfacht aus Reduzierung der

$V_{\max}$ um 15% bis 25% (*Kühn, 198 S.183*).

Tabelle 5.4: Geschwindigkeitskorrekturfaktor k (*Bauer 1994 S. 123*).

Streckenabschnittslänge [m]	Geschwindigkeitsfaktor k	
	Stehender Start	Fliegender Start
0-100	0,20-0,50	0,50
100-250	0,30-0,60	0,60-0,75
250-500	0,50-0,65	0,70-0,80
500-800	0,60-0,70	0,75-0,80
800-1200	0,65-0,75	0,80-0,85
1200 und mehr	0,70-0,85	0,80-0,90

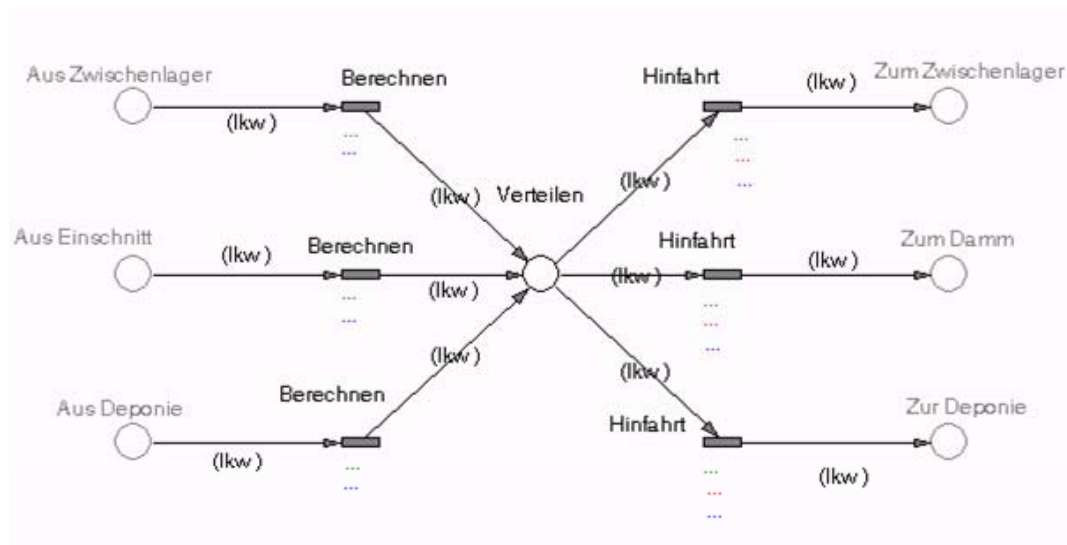


Abbildung 5.19: Das Modul ‚Hinfahrt‘

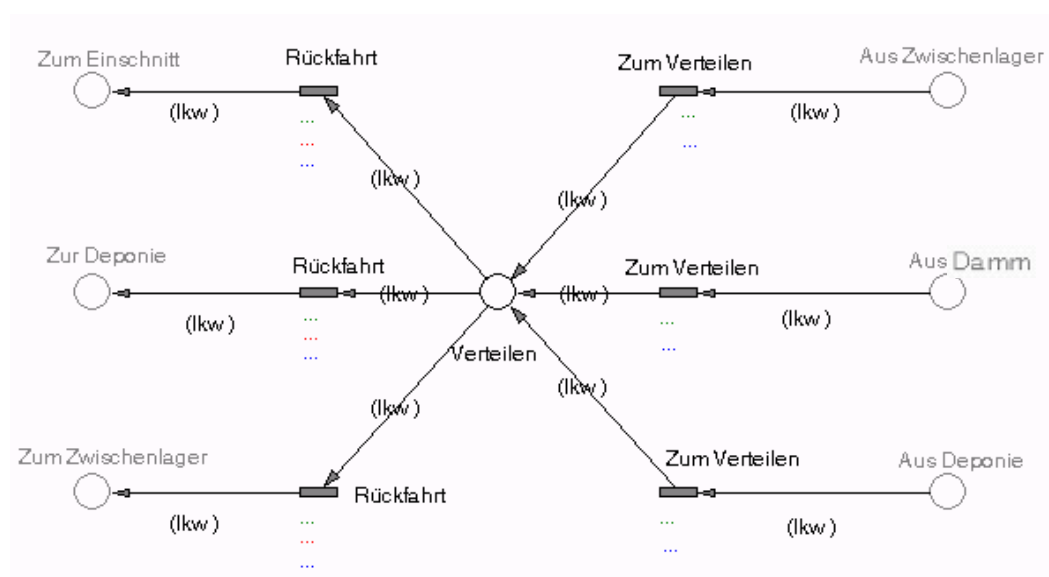


Abbildung 5.20: Das Modul ‚Rückfahrt‘

Die Entfernung wird vom eingesetzten CAD-System bestimmt. Sie geht in die Simulation als ein Attribut des Erdkörpers ein, das in die temp-Collection der Lkw übernommen wird. Die Dauer wird dann, unter Berücksichtigung der Eigenschaften der gefahrenen Wegabschnitte, berechnet. Da die einzelnen Stationsmengen durch die Eigenschaften ‚Station‘ und ‚Teilmenge‘ in jedem Erdkörper als Attribute gespeichert und über die Modulvariable ‚Erdkörper‘ im Modul ‚Einschnitte‘ auch in dem Modul ‚Fördern‘ lesbar sind, kann die Entfernung für jede Station zu dem Anschlusspunkt des Förderweges und weiter zum Ziel präzise berechnet werden. Der Anschlusspunkt wird dann anhand der im ‚Wegabschnitt‘

gespeicherten Anfangs- und Endkoordinaten bestimmt. Es kann aber auch für den gesamten Abschnitt eines Einschnittes eine durchschnittliche Entfernung berechnet werden.

5.6.4.4 Die Module ‚Zwischenlager‘, ‚Dämme‘ und ‚Deponien‘

In den Modulen ‚Zwischenlager‘, ‚Dämme‘ und ‚Deponien‘ kommen die vollen Lkw an und entleeren den beladenen Boden, um wieder über das Modul ‚Rückfahrt‘ zu dem ursprünglichen Modul weitergeleitet zu werden. Die Dauer des Entladens kann aus der Lkw-Marke abgelesen werden. Außerdem werden in diesen Modulen Daten über die ankommenden Mengen auf den jeweiligen Stellen gesammelt.

Lediglich innerhalb des Moduls ‚Zwischenlager‘ wird unterschieden, ob der ankommende Lkw entladen oder beladen werden muss. Das Modul ‚ZumEntladen‘ ähnelt dem von den Dämme und Deponien, während das Modul ‚ZumBeladen‘ mit dem ‚Einschnitte‘-Modul zu vergleichen ist. In dem Modul ‚ZumBeladen‘ wird von der Objektorientierung in PACE Gebrauch gemacht, und zwar wird der Bagger mit dem entsprechenden Zwischenlager-Erdkörper aus dem Modul ‚Einschnitte‘ auf den Platz ‚BaggerAnkunft‘ in diesem Modul als Marke gelegt. In dem ein Platz mit dem gleichen Namen für die Lkw-Warteschlange in das ‚ZumBeladen‘-Modul modelliert wird, kann auf dieselbe Marke zurückgegriffen werden. Somit ist die Verfügbarkeit der Lkw für alle relevanten Netze über das ganze System kontrollierbar. Alle anderen Schritte zum Beladen der Lkw auf Zwischenlager erfolgen wie im Modul ‚Einschnitte‘, siehe Abschnitt 5.6.4.2.

5.7 Ergebniserfassung und Ergebnisdarstellung

5.7.1 Erfassung der Ergebnisse

Eine der vielen Vorteile der Simulation ist die dynamische Ergebniserfassung. Hierdurch gibt das System mit dem Fortschritt der Simulationszeit einen Aufschluss über definierte Output-Größen. Für eine Erdbaustelle können diese Größen auf die Effizienz des Maschineneinsatzes, wie Leistung, Auslastung etc. oder auf die Wirtschaftlichkeit der Logistikprozesse, wie gefahrene Kilometer, Förderwegbelastung etc., hindeuten.

In dem entwickelten Simulationssystem werden ergebnisrelevante Daten an unterschiedlichen Stellen gesammelt und ausgewertet. Dabei wird die in Abschnitt 5.4.2 beschriebene

Datenstruktur angewendet. Demnach werden Auswertungsdaten in Marken immer an der dritten Stelle, also in ‚auswert-Collection‘, gespeichert. Beispielsweise werden in den Transitionen, die den Warten-Anfang und das Warten-Ende des Lkw und des Baggers ankündigen, die entsprechende Zeit an einer bestimmten Stelle in der auswert-Collection des Lkw bzw. des Baggers vermerkt. Schließlich wird die jeweilige Wartezeit berechnet, siehe Abbildung 5.16. Eine ähnliche Vorgehensweise gilt auch für die Erfassung der Baggerleistung. Hierbei werden die abgetragenen m³ Erde und die Einsatzzeiten der Bagger mit dem Fortschritt der Simulationszeit aufsummiert, um sie anschließend ins Verhältnis zu setzen und die Leistung zu berechnen. Außerdem wird die Auslastung des jeweiligen Baggers durch das Verhältnis der Betriebszeit zur Einsatzzeit prozentual ermittelt.

Da die Simulationszeit, ungeachtet der angenommenen Zeiteinheit, verstrichen wird, soll diese für alle Prozessdauern gleichartig eingegeben werden. Das entwickelte Simulationssystem erfordert deshalb die Eingabe aller Zeiten in Minuten, siehe Abschnitt 5.2.1. Mit dem Simulationslauf werden also in einem entsprechenden Fenster ‚Time‘ die vergangenen Minuten angezeigt. Ein weiteres Fenster ‚Dauer‘ ist im System integriert, um die Dauer in Tagen, Stunden und Minuten auszudrücken. Dies wurde mit Hilfe von zusätzlichen Codes realisiert, und zwar bietet PACE die Möglichkeit, vier weitere Programm-Codes zu schreiben. Diese werden bei der Initialisierung, bei dem Anhalten, beim Weiterlaufen und beim Ende der Simulation aufgerufen und durchgeführt. Sie heißen entsprechend: ‚initialization-, break-, continuation- und termination-Code‘. Der Code zur Umrechnung der Zeit ist in den ‚break-Code‘ integriert und wird daraufhin beim Anhalten der Simulation durchgeführt.

Da die Simulation stochastisch ist und somit viele Eingangsdaten in Form von Zufallszahlen eingegeben werden können, sind die Ergebnisse eines einzigen Simulationslaufs nicht ausreichend aussagekräftig, insbesondere wenn der Startwert der Zufallsgeneratoren (seed) in der Simulation so eingestellt wird, dass bei jedem Lauf neue Zufallszahlen generiert werden. In PACE ist dies der Standardfall, wobei man auch reproduzierbare Folgen von Zufallszahlen generieren kann. Der Mittelwert einer Outputgröße mit einem entsprechenden Vertrauensbereich, der sich aus den Ergebnissen mehrerer Simulationsläufe ergibt, ist demzufolge als Endergebnis dieser Größe aufzufassen.

5.7.2 Darstellung und Visualisierung der Ergebnisse

5.7.2.1 Animation

Die Animation stellt die Zustandsänderungen und die Bewegungen der Modellelemente als eine Abfolge von Bildern dar. Im Allgemeinen gibt es im Zusammenhang mit der Repräsentation eines Visualisierungsverfahrens u. a. bildhafte bzw. fotorealistische (pictorial) und ikonische (iconic) Visualisierung (*VDI 3633 Blatt 11*). Die Relevanz der Visualisierung in Bezug auf Zielgruppen und Einsatzfelder ist in der VDI-Richtlinie 3633 in Form einer Matrix dargestellt, siehe Abbildung 5.21. Gemäß dieser Matrix ist die Visualisierung für das Einsatzfeld ‚Betriebsbegleitung‘, das in der Bauindustrie der Bauausführung entspricht, für die mit der Bauleitung vergleichbare Zielgruppe ‚Produktion und Logistik‘ der stationären Industrie ‚voll zutreffend‘ bezeichnet (*VDI 3633 Blatt 11*).

Zielgruppen Einsatzfelder	Simulationsfachabteilung	Planung	Management	Technischer Einkauf	Werktechnik und -betrieb	Produktion und Logistik	Vertrieb und Marketing	Kunde	Öffentlichkeit
Systemanalyse	●	●		●					
Modellerstellung	●	○							
Validierung	●	●						○	
Experimentdurchführung	●	●						○	
Ergebnisdarstellung und Interpretation	●	●	●	●	●	●	●	●	
Schulung						●	○	●	
Betriebsbegleitung		●	○			●		○	
Absatzförderung und Außendarstellung			●				●	●	●
Interdisziplinäre Kommunikation	●	●	●	●	●	●	●	●	

● voll zutreffend ○ teils zutreffend

Abbildung 5.21: Relevanz der Visualisierung in Bezug auf Zielgruppen und Einsatzfelder, (*VDI 3633, Blatt 11*)

Auch bei einer voll zutreffenden Relevanz der Visualisierung stellt sich die Frage nach dem Maß des Einsatzes graphischer Methoden in Ergänzung zur Simulation. Dabei soll die Tatsache Berücksichtigung finden, dass sich Aufwand und Inhalt einer Simulationsstudie

im Falle eines massiven Visualisierungseinsatzes von der eigentlichen Simulationsmethodik in Richtung einer graphischen Modellgestaltung verlagern können (Wenzel 1999).

Das Ziel einer Simulationsstudie ist es nach wie vor, ein System entsprechend einer bestimmten Aufgabenstellung zu modellieren und die dabei auftretenden Ereignisse zu simulieren, um schließlich mehr Kenntnisse über das System zu erwerben und auf das Realsystem übertragen zu können. Der Einsatz der Visualisierung soll von diesen Zielen nicht ablenken oder abweichen und schon gar nicht diesen widersprechen. Die Visualisierung soll im Gegenteil die Simulation möglichst unterstützen und dabei ihre eigentliche Aufgabe, der Vereinfachung und der Veranschaulichung, nicht überschreiten und nicht zum Selbstzweck durchgeführt werden. Dennoch kann sie zur Kommunikation unter den Projektbeteiligten bzw. den Zielgruppen der Matrix in der Abbildung 5.21 und zum Verständnis des vorliegenden Problems massiv beitragen.

Speziell für den Erdbau auf Projektebene wird in dieser Arbeit eine fotorealistische Visualisierung als nicht von großer Bedeutung erachtet, wenn man den Visualisierungsaufwand des Layouts, das sich mit jedem Baggerlöffel verändert, und die lange Simulationsdauer in Betracht zieht. Auf Prozessebene kann eine solche Visualisierung die Entscheidungen bezüglich der Manövrierbewegungen oder der Stellung der eingesetzten Betriebsmittel zueinander unterstützen, wenn sie mit vertretbarem Aufwand zu realisieren ist. Ein Beispiel dafür ist die Arbeit von *Bargstädt und Blickling*, in der die Visualisierung auf Prozessebene mit Hilfe der visuellen interaktiven Simulation erfolgt (Bargstädt, Blickling 2005). Diese Entscheidungstiefe wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht abgedeckt. Sie bildet jedoch eine interessante Forschungsperspektive, da die neusten Forschungsarbeiten sich der Frage widmen, wie eine effiziente Visualisierung durch die Integration mit CAD zu realisieren ist, siehe Abschnitt 2.3.3.

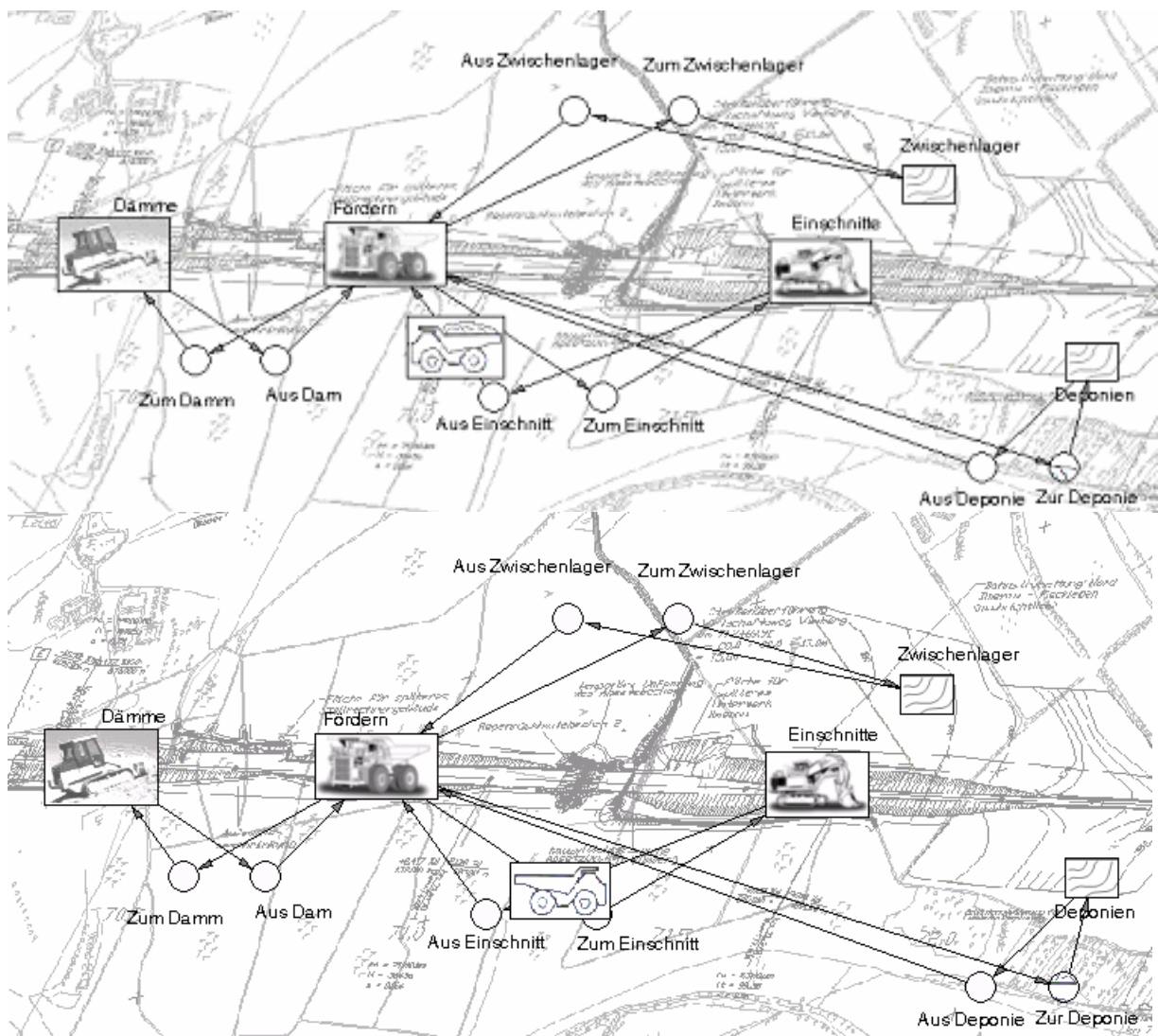


Abbildung 5.22: Visualisierung der obersten Hierarchieebene mit vollen (oben) und leeren (unten) Lkw

Aus diesen Gründen wird sich die Visualisierung bei dem entwickelten Simulationssystem auf die von PACE gebotenen Möglichkeiten beschränken, so dass kein zusätzlicher Aufwand zur Anbindung an speziellen Animationstools unternommen wird. Und zwar stellt die Entwicklungsumgebung PACE eine ikonische Visualisierung bereit, die zusammen mit der hierarchischen Anordnung der Netzelemente in Modulen viel zur Verdeutlichung der Netzfunktionalitäten und zur Validierung beitragen können. Die Abbildung 5.22 visualisiert die oberste Hierarchie des Systemnetzes, die mit einem Umriss einer Straßenbaustelle als Bild hinterlegt ist. Die Module sind auch entsprechend als Symbole der arbeitenden Maschinen angezeigt. Aus dieser Hierarchieebene stellen die Lkw die einzigen Prozessträ-

ger bzw. Marken dar. Diese werden im Simulationslauf als volle oder leere Lkw eingebildet.

5.7.2.2 Monitoring

Monitoring ist eine weitere Möglichkeit zur Visualisierung, wobei keine Modellelemente, sondern Outputgrößen während des Simulationslaufes am Bildschirm angezeigt werden. Die Visualisierung für das Einsatzfeld ‚Ergebnisdarstellung und Interpretation‘ wird von der Richtlinie (*VDI 3633 Blatt 11*) für die meisten Zielgruppen empfohlen und in dieser Arbeit als Monitoring bezeichnet, siehe Abbildung 5.21. Beim Monitoring kommen mehrere Darstellungsformen, wie z.B. Balken, Tortendiagramme, Kurven etc. zur Anwendung. Zudem ist es in PACE möglich, einige Monitoring-Fenster in einem so genannten ‚Szenario‘ anzuordnen. Aus einem ‚Select Scenery‘ Fenster können Szenarien während des Simulationslaufes angeklickt und die entsprechenden Ergebnisse beobachtet werden. Für das entwickelte System werden hier zwei Szenarien vorgestellt: ‚Hauptmodell‘ und ‚Logistik‘, siehe Abbildungen 5.23 und 5.24.

- ‚Hauptmodell‘

In diesem Szenario werden die Simulationsergebnisse der eingesetzten Bagger zusammengefasst, siehe Abbildung 5.23. Das Fenster ‚Anzahl Lkw‘ zeigt die Anzahl der dem jeweiligen Bagger zugewiesenen Lkw. In dem gezeigten Beispiel sind insgesamt fünf Bagger auf der Baustelle, wobei in der festgehaltenen Momentaufnahme nur drei im Einsatz sind. Die Leistung und die Auslastung dieser drei Bagger können aus den Balkendiagrammen abgelesen werden. Außerdem erlaubt eine Kurvendarstellung die Beobachtung der vor jedem Bagger – und somit vor jedem Erdkörper – entstandenen Warteschlange an wartenden Lkw. Zum besseren Verständnis der Diagramme wird für jeden Bagger eine kennzeichnende Farbe einheitlich für alle Diagramme gewählt.

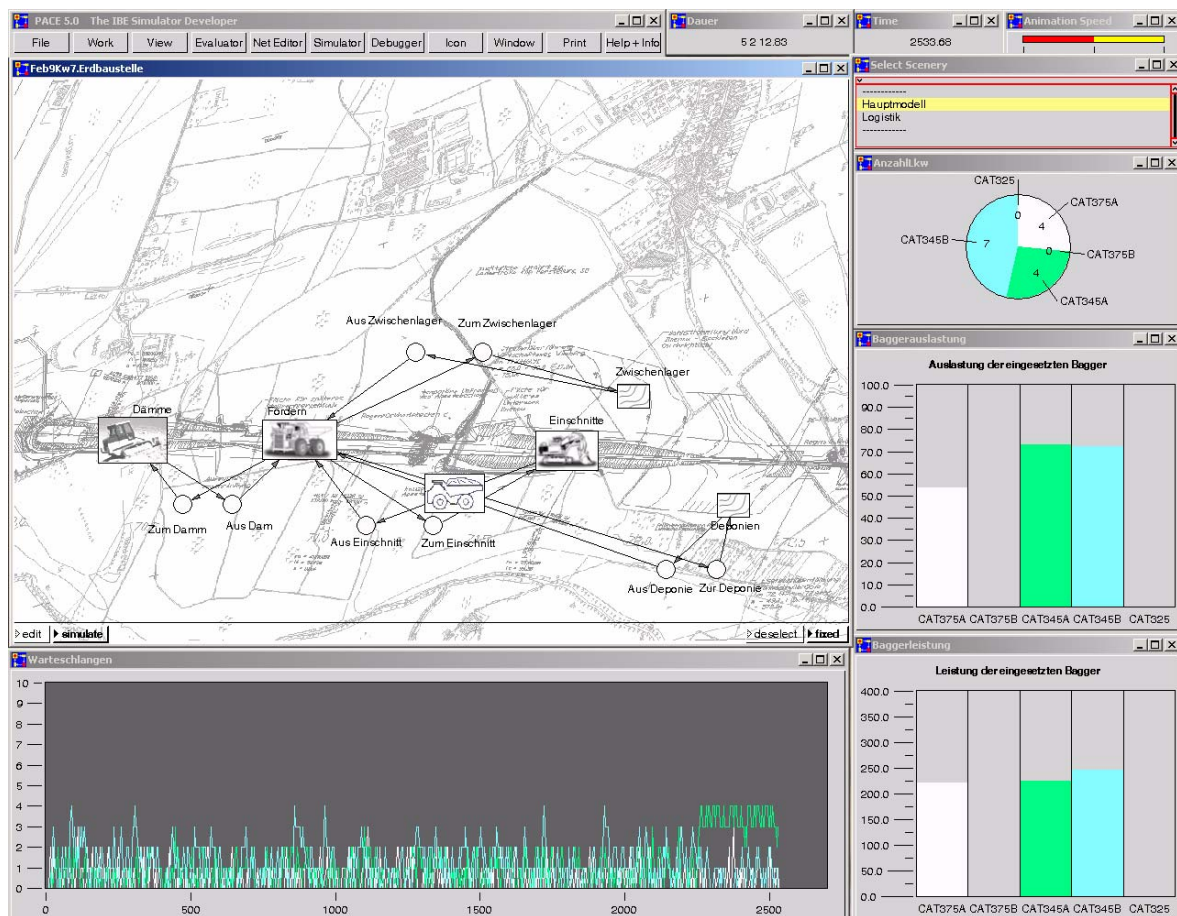


Abbildung 5.23: Das Monitoringszenario ,Hauptmodell'

Die Ergebnisse können mit dem Fortschritt der Simulation beobachtet werden, so dass sie zur Unterstützung von Entscheidungen in unterschiedlichen Bauphasen einbezogen werden können. Der Anwender kann die Geschwindigkeit der Simulation in dem Fenster ,Animation speed' einstellen oder gar die Simulation im Hintergrund laufen lassen. Die Simulation im Hintergrund lässt die Diagrammwerte im Schnelllauf auch beobachten, während die Animation komplett eingestellt wird.

- ,Logistik'

Das zweite Szenario fasst einige Ergebnisse der Logistikprozesse zusammen. Dabei wird das Netz ,Fördern' angezeigt, das wiederum zwei Module zur ,Hinfahrt' und ,Rückfahrt' beinhaltet. Hier können auch die fahrenden Lkw als voll oder leer animiert werden, siehe Abbildung 5.24.

Die zwei Tabellen ‚Matrix_der_gefahrenen km‘ und ‚Matrix_der_transportierten_m³‘ zeigen die Einschnitte und Zwischenlager in den Spalten und die Dämme, Deponien und Zwischenlager in den Zeilen. Diese Tabellen werden entsprechend der auf der Baustelle vorhandenen Anzahl an Arbeitsstellen, also Einschnitte, Dämme, etc. automatisch initialisiert. Die Bezeichnungen der Arbeitsstellen werden durch den Anwender in CAD eingegeben. Mit dem Simulationsfortschritt können so in jedem Moment die genauen Arbeitsstellen und der Bearbeitungsstand abgelesen werden. Am Ende geben diese beiden Tabellen wichtige Aufschlüsse über die Massenverteilungsvariante und machen einen Variantenvergleich sehr gut möglich. Außerdem werden die Gesamtsumme der gefahrenen Strecke in km und die Anzahl der Touren in gesonderten Fenstern angezeigt.

Zwei zusätzliche Balkendiagramme veranschaulichen die Anzahl der für jeden Bagger fahrenden Lkw. Dabei wird die Unterscheidung nach Hinfahrt und Rückfahrt deutlich.

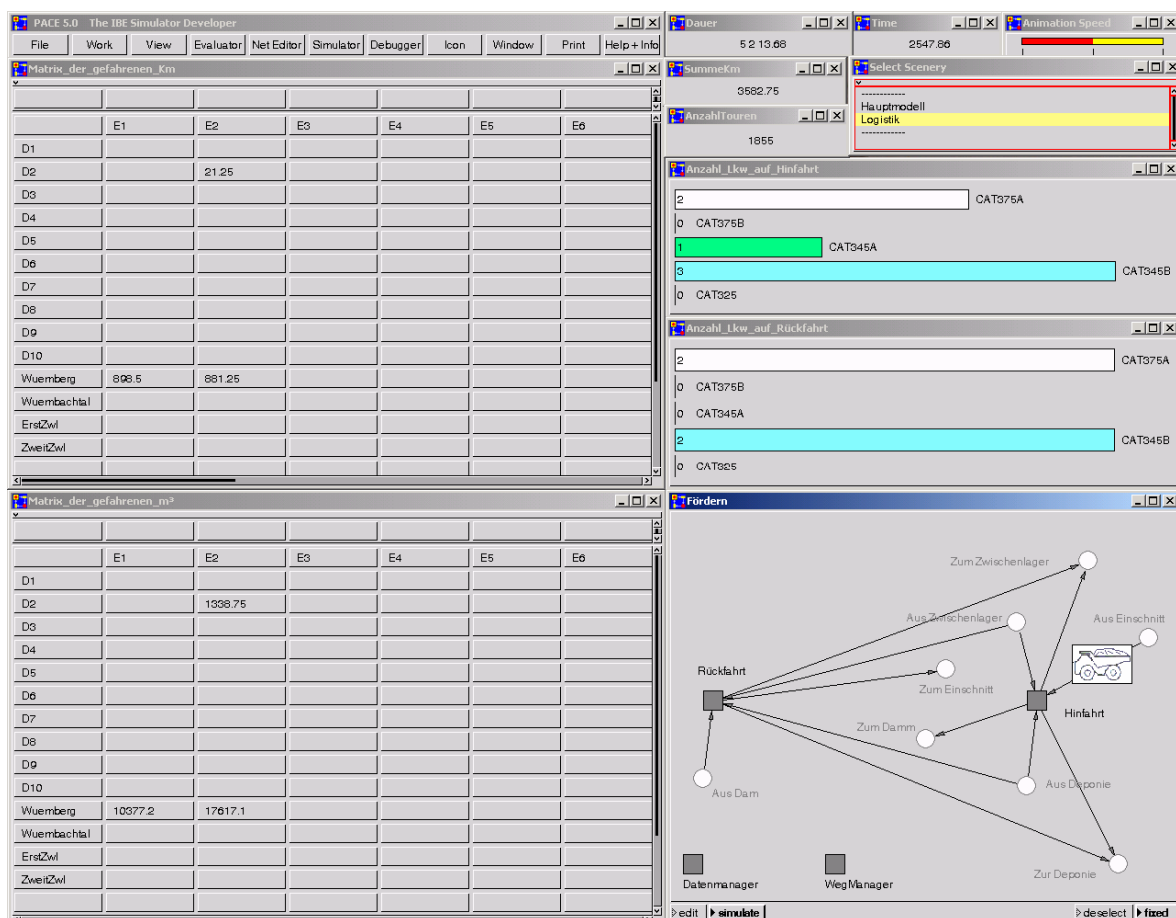


Abbildung 5.24: Das Monitoringszenario ‚Logistik‘

5.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird das entwickelte Konzept des aufgabenspezifischen Simulationssystems für den Erdbau vorgestellt, das auf einer Petri-Netz-basierten Simulationsumgebung aufbaut. Dabei werden die Systemparameter variabel gehalten, so dass eine nachträgliche Parametrisierung durch eine produktmodellbasierte Integration mit CAD ermöglicht wird.

Außerdem werden einige Ansätze zur stochastischen Modellierung vorgestellt, die zum Verständnis des siebten Kapitels beitragen.

Beim Aufbau des Systems konnte eine nahtlose Modellierungsvorgehensweise entwickelt werden, die auch zur Abbildung anderer Systeme mit PrT-Netzen ebenfalls anwendbar ist. Die Vorteile dieser nahtlosen Modellierung werden im Abschnitt 5.4 vorgestellt.

Des Weiteren werden die Modellierung der Schnittstelle zu CAD über das im vorigen Kapitel beschriebene simulationsrelevante Produktmodell detailliert dargelegt und das Simulationssystem in seinem Aufbau und Ablauf erläutert. Es wird auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Programme, die u. a. den Transitionen hinterlegt sind, verzichtet und lediglich die Systemfunktionalität erklärt.

Das Kapitel schließt mit der Darstellung der Ergebnisse ab, wobei diese in zwei Schritten erfolgt. Zunächst wird die Ergebniserfassung, ebenfalls ohne tief auf die einzelnen Programmierschritte einzugehen, kurz beschrieben und im Anschluss die Ergebnisdarstellung erläutert. Die Darstellung deckt die mit PACE derzeit mögliche, symbolische Animation und das Monitoring bestimmter Outputgrößen ab. Sowohl die Animation als auch das Monitoring können während eines Simulationslaufes dynamisch beobachtet werden, um dabei wichtige Aufschlüsse über baustellenrelevante Daten zu erhalten.

6 Prototypische Implementierung

6.1 Hintergründe

Die Implementierung in diesem Kapitel bezieht sich auf die Integration des im Kapitel 4 beschriebenen SRM in einem CAD-System und auf den Aufbau einer Benutzeroberfläche zur Extraktion und Eingabe erforderlicher Daten. Im Folgenden wird auf eine Beschreibung der im Quellcode enthaltenen Algorithmen auf Grund des Umfangs verzichtet.

Das CAD-System hat für das entwickelte System eine Doppelfunktion. Auf der ersten Seite werden die dort gespeicherten geometrischen Daten extrahiert und für die CAD-basierte Simulation nutzbar gemacht. Auf der anderen Seite soll das CAD-System erweitert werden, um andere simulationsrelevante Daten einzugeben. Es stellt sich dabei die Frage nach dem geeigneten CAD-System für die beabsichtigte Implementierung.

Da das entwickelte Simulationssystem aufgabenspezifisch ist, erweist sich eine gründliche Untersuchung der in diesem spezifischen Aufgabenfeld, hier Straßenbau, eingesetzten CAD-Systeme als unumgänglich. Straßenbauprojekte werden, wie schon erwähnt, fast ausschließlich mit CAD-basierten Planungssystemen bearbeitet. Eine Untersuchung einiger Straßenplanungssysteme hat gezeigt, dass die meisten Systeme geschlossen sind. Das heißt, sie können nicht erweitert werden, ohne einen vollen Zugriff auf den Quellcode zu erhalten. Dies ist natürlich nicht ohne weiteres möglich. Einige Systeme sind als add-on-Programme auf allgemeinen CAD-Systemen zu verstehen und gewähren trotzdem keinen Zugang zu ihren internen Objekten, so dass der Anwender im Fall einer Erweiterung immer zwischen diesen Systemen und dem entwickelten System zur Erfüllung von Berechnungsaufgaben wechseln müsste. Außerdem soll die Implementierung nicht an ein einziges Straßenplanungssystem gebunden werden, sondern allgemeingültig sein. Nur so kann das System von allen Projektbeteiligten ungeachtet der ohnehin unterschiedlichen Planungssysteme genutzt werden, siehe Abschnitt 4.2.1.1. Diese Überlegungen führen zu dem Ergebnis, dass nur ein allgemeines, bei den meisten Unternehmen verfügbares CAD-System eine geeignete, praxisgerechte Entwicklungsumgebung darstellt. Die Entscheidung fiel in dieser Hinsicht auf AutoCAD, das um weitere Funktionalitäten zur Eingabe simulationsrelevanter Daten erweitert wird.

Diese Entscheidung erfordert die Übernahme von Planungsdaten der zu untersuchenden Straße in die neutrale allgemeine Umgebung von AutoCAD. Auch bei dieser Fragestellung sollen die gängigen Methoden der Praxis nicht außer Acht gelassen werden. Im Abschnitt 4.2.1 sind die im Straßenbau häufig angewandten Schnittstellen aufgezählt. Obwohl die meisten Straßenplanungssysteme die Produktmodelle, insbesondere OKSTRA, integriert haben, hat sich diese Art der Schnittstellen in der Praxis noch nicht durchgesetzt. Vielmehr werden Daten über konventionelle Schnittstellen, wie DXF und REB, ausgetauscht. Außerdem erwies sich die Integration von einem totalen, alles umfassenden Produktmodell für Simulationszwecke als unwirtschaftlich, zumal die Simulation lediglich auf geometrische Daten zurückgreifen muss. Da das implementierte System den Anspruch der Praxis-tauglichkeit erhebt, sollen die Daten nur aus praxisgerechten Schnittstellen, also DXF und REB, zu extrahieren sein. Eine spätere Erweiterung auf OKSTRA ist jedoch möglich.

6.2 Erweiterung der CAD-Umgebung

Die Erweiterung der CAD-Umgebung soll zwei Ziele erfüllen: zum einen sollen die alphanumerischen Parameter, die zum automatischen Aufbau des Simulationsmodells dienen, eingegeben werden können, zum anderen sollen die geometrischen Parameter extrahiert und zur Modellierung bereitgestellt werden. Die Erweiterung kann in AutoCAD anhand unterschiedlicher Techniken vollzogen werden. Welche davon gewählt wird, hängt von den Anforderungen und von den Programmierkenntnissen ab. Einige dieser Techniken sind im Folgenden aufgeführt (*AutoCAD 2006*):

- **ActiveX-Automatisierung:** Diese von Microsoft entwickelte Technologie wird zur benutzerspezifischen Anpassung von AutoCAD, zur gemeinsamen Verwendung von Zeichnungsdaten mit anderen Anwendungen und zum Automatisieren von Aufgaben einbezogen.
- **AutoCAD VBA:** Microsoft Visual Basic for Applications (VBA) ist eine objektbasierte Programmierumgebung, die vielfältige Entwicklungsmöglichkeiten bietet. Sie unterscheidet sich von VB (Visual Basic) darin, dass sie in der gleichen Umgebung, wie AutoCAD ausgeführt wird. Mit VBA hat man somit eine auf AutoCAD zugeschnittene und sehr schnelle Programmierumgebung zur Hand.

- AutoLISP und Visual LISP: AutoLISP basiert auf der einfach zu erlernenden und leistungsstarken LISP-Programmiersprache. Da AutoCAD über einen integrierten LISP-Interpreter verfügt, kann man AutoLISP-Code in der Befehlszeile eingeben oder AutoLISP-Code aus externen Dateien laden. Visual LISP (VLISP) ist ein Software-Werkzeug, das zur Beschleunigung der AutoLISP-Programmentwicklung dient.
- ObjectARX: Diese Technologie bildet die Grundlage für eine gemeinsame Nutzung von Softwareanwendungen, die von dem Benutzer selbst oder von Fremdanbietern entwickelt werden.

Die Kombination von AutoCAD ActiveX und VBA bietet viele Vorteile und eignet sich besonders gut zum Erstellen von Prototypen, insbesondere weil sie schnell und einfach anzuwenden ist. Außerdem ist eine gute Kompatibilität mit dem Windows Betriebssystem gegeben, wodurch ein anwendungsübergreifender Datenaustausch ermöglicht wird. Daher stößt diese Kombination auf breite Zustimmung bei den Programmierern (*AutoCAD 2006*). In dieser Arbeit wird deshalb diese Kombination zur Anpassung von AutoCAD zur prototypischen Implementierung des entwickelten Ansatzes gewählt.

Der erste Schritt der Erweiterung ist die Anbindung des entwickelten simulationsrelevanten Produktmodells SRM an AutoCAD. Dies geschieht über die DOM Technologie, mit der man das SRM zur baumähnlichen Struktur aus Objekten umwandeln kann. Diese Objekte werden dann als eine dynamic link library DLL gespeichert und in AutoCAD angesprochen. Eine DLL ist kein lauffähiges Programm, sondern als eine Funktionsbibliothek zu verstehen, die dynamisch bzw. während der Kompilierung an ein Programm gebunden wird (*Franke 1998 S. 228*). Nach diesem Schritt kann AutoCAD ‚erkennen‘, dass z.B. das Objekt ‚Bagger‘ Eigenschaften wie ‚Löffelinhalt‘ oder ‚Taktzeit‘ hat, für die Parameter eingegeben und in eine XML-Datei nach dem definierten Schema geschrieben werden.

Um die Erweiterung anwenderfreundlich zu gestalten, werden alle erforderlichen Eingaben in einem zusätzlichen Menü, namens ‚Simulation‘, integriert, das nach der Installation in AutoCAD erscheint. Bei komplexeren Eingabeschritten werden die entwickelten Wizards (Assistenten), die den Anwender über einen bestimmten Verlauf mit mehreren Schritten führen eingesetzt, siehe Abbildung 6.5. Zudem werden Windows API verwendet, die die Integration von programmierten Blöcken von Windows in das eigene Programm ermögli-

chen. Zum Beispiel kann damit der Windows-Dialog zum Öffnen einer Datei aufgerufen werden, der zum Laden des Lageplans dient. Dabei sind vorzugsweise DWG- oder DXF-Dateien zu importieren.

6.3 Erweiterungsarchitektur

Nach der Installation erscheint in AutoCAD ein zusätzliches Menü mit der Bezeichnung ‚Simulation‘. Dieses Menü ist in weitere Untermenüs unterteilt, über die alle benötigten Daten eingegeben werden können. Alle Daten können während des Programmablaufs bearbeitet oder erweitert werden. Die Abbildung 6.1 stellt die Architektur der Erweiterung dar, wobei die Untermenüs in Gruppen zusammengefasst werden können. Im Folgenden werden zunächst die Funktionalitäten der Menüpunkte erläutert:

- **Variantenverwaltung:** In dieser Gruppe soll entweder ein neues Projekt erstellt oder ein vorhandenes geöffnet werden. Hinter einem Projekt verbirgt sich nichts anderes als ein XML-Dokument, das dem entwickelten Schema entspricht. Wenn ein vorhandenes Projekt geöffnet werden soll, hat sich der Anwender zu entscheiden, ob das Projekt zum Bearbeiten oder als eine neue Variante geöffnet werden soll. Das Letztere führt zur Generierung eines neuen XML-Dokumentes mit dem gleichen Inhalt des geöffneten Projektes, so dass noch geltende Parameter nicht noch einmal eingegeben werden müssen.
- **Baustellenstruktur:** Hier werden die statischen Elemente der obersten Hierarchie beschrieben, siehe Abschnitt 5.3. Da die Daten zum Teil auch aus dem CAD-Layout extrahiert werden, ist zuerst ein Lageplan zu importieren. Die Projektbeschreibung umfasst dann die Eingabe von allgemeinen und zeitlichen Projektdaten sowie Baustellengrenzen.

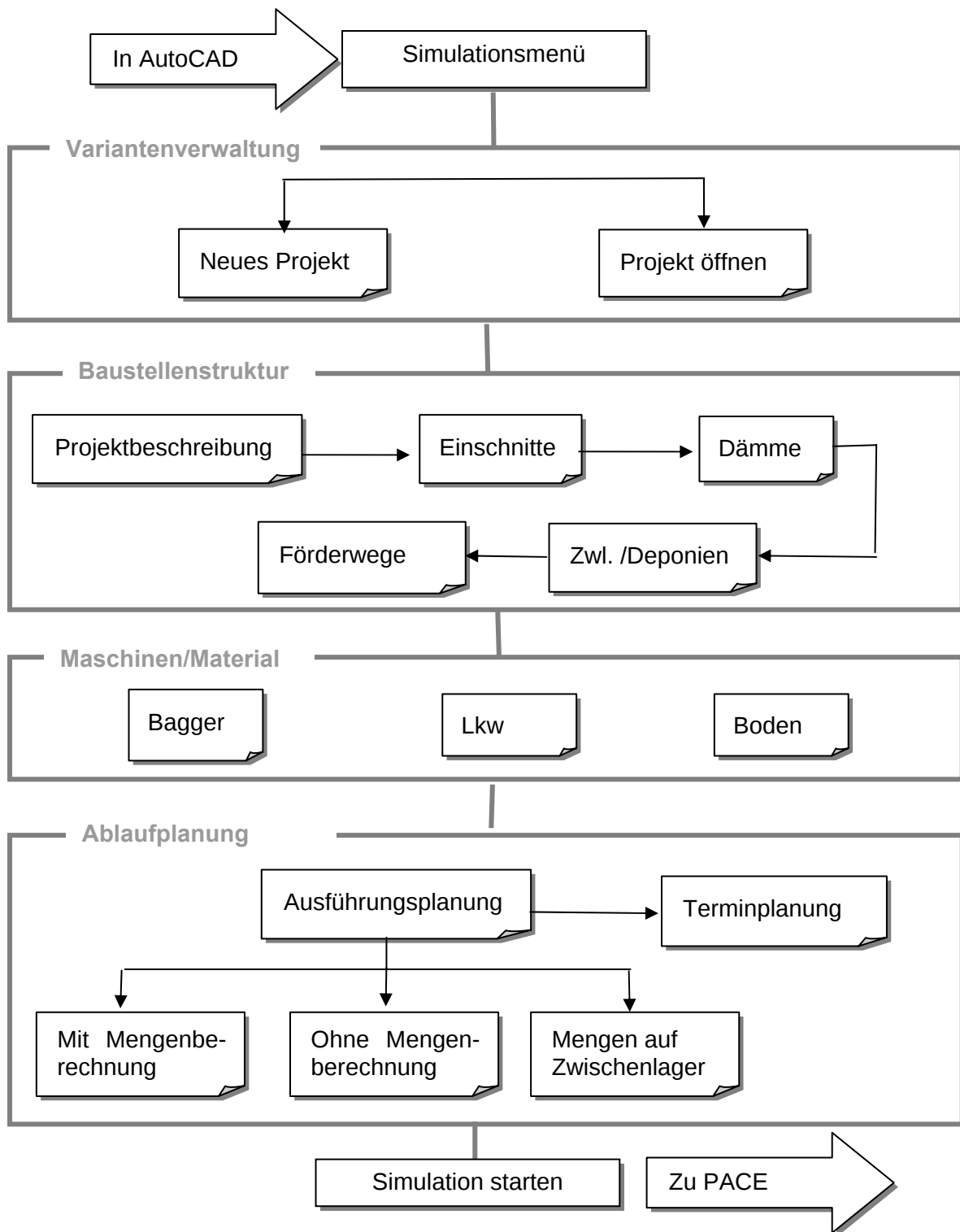


Abbildung 6.1: Struktur des zusätzlichen Menüs ‚Simulation‘ in AutoCAD

- **Maschinen / Material:** Diese Gruppe beinhaltet die zur Verfügung stehenden Maschinen, also Bagger und Lkw. Hierzu sollen technische und baustellenbezogene Daten, wie Fassungsvermögen, Gewicht, Taktzeiten etc. eingegeben werden. Außerdem sollen die vorliegenden Bodenschichten mit ihren relevanten Eigenschaften in das entsprechende Formular eingetragen werden.
- **Ablaufplanung:** Nach dem Festlegen der Aufbauorganisation der Baustelle kann mit der Ablauforganisation begonnen werden. Es handelt sich in diesem Schritt um die manuelle geometrische Zerlegung der Einschnitte in Abschnitte und Erdkörper, wobei dies mit oder ohne Mengenermittlung durchgeführt werden kann. Wenn einige Erdkörper zwischengelagert werden sollen, können deren weiteren Eigenschaften zur Bearbeitung auf Zwischenlager und zum Endziel über den Menüpunkt „Mengen auf Zwischenlager“ eingegeben werden. Die ‚Terminplanung‘ speichert die gesamte Struktur in ein MS-Projekt-Dokument, wobei die Erdkörper in ihrer Hierarchie für die Vorgänge stehen, für die auch die Betriebsmittel automatisch eingegeben werden. Der Anwender soll hier nur die Vorgänger-Beziehungen definieren, wobei lediglich AA- und EA-Beziehungen zu verwenden sind, siehe Abschnitt 5.6.4.1.

Sobald alle Eingaben vervollständigt sind, kann ein Simulationslauf gestartet werden. Dafür ist ein zusätzlicher Menüpunkt integriert, der das in PACE entwickelte System startet. Nach der Initialisierung entsteht automatisch das Modell der eingegebenen Baustelle.

Das Programm ist dahingehend anwenderfreundlich gestaltet, als dass die Reihenfolge der Eingaben dem Aufbau des Simulationsmenüs entspricht. Außerdem können geometrische Daten durch das Anklicken von Objekten automatisch extrahiert werden. Da die Ablaufplanung eine Reihe von abhängigen Eingaben erfordert, sind diese in einem Wizard zusammengefasst. Damit ist sichergestellt, dass die Eingabe vollständig erfolgt.

Der Ablauf und die Abhängigkeiten der einzelnen Menüpunkte sind der Abbildung 6.2 zu entnehmen. Die Abbildung zeigt einen Ablaufplan des entwickelten Programms nach DIN 66001, wobei zusätzlich für jeden Schritt bestimmt wird, welche Daten benötigt werden und wozu sie weiterverwendet werden.

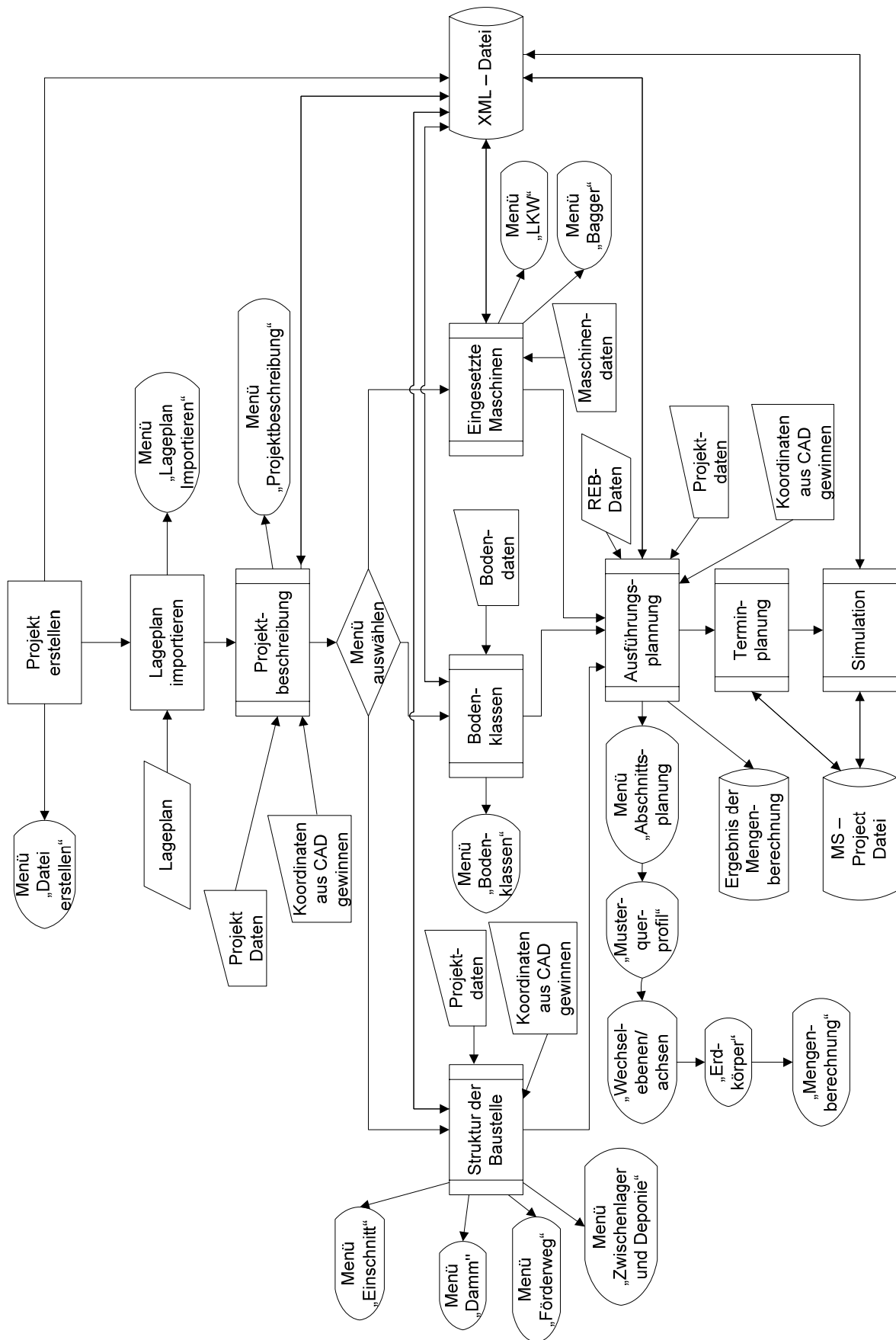


Abbildung 6.2: Ablaufplan des entwickelten Programms nach DIN 66001

6.4 Beschreibung einiger Benutzeroberflächen

Dieser Abschnitt geht auf die wesentlichen Eingabeformulare der Programmoberfläche exemplarisch ein, um die Vorzüge des Systems herauszustellen und den Ablauf der Modellierung bzw. Parametrisierung aufzuzeigen. Aufgrund des Umfanges wird auf die Aufführung des Quellcodes verzichtet.

6.4.1 Menügruppen ‚Baustellenstruktur‘ und ‚Maschinen / Material‘

Der Menüpunkt ‚Simulation‘ wird nach der Installation an der letzten Stelle der Menüleiste platziert. Die einzelnen Untermenüs dienen dazu, das entwickelte Simulationssystem zu parametrisieren bzw. das Modell einer bestimmten Baustelle aufzubauen. Hierbei gibt es zwei Arten der Benutzerangaben. Zum einen sollen einige Angaben unmittelbar in die Formulare geschrieben werden. Zum anderen erfordern geometrische Angaben, dass der Anwender in einem zuvor geladenen Layout ein Objekt anklickt oder weitere Aktionen in AutoCAD direkt durchführt.

In diesem Abschnitt werden lediglich einige Formulare detailliert erläutert. Um einen Überblick über die in jedem Formular einzugebenden Attribute zu erhalten, sind diese in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die Tabelle 6.1 zeigt die erforderlichen alphanumerischen sowie geometrischen Angaben für die Gruppen ‚Baustellenstruktur‘ und ‚Maschinen/Material‘ auf.

Das implementierte System wird in einer neutralen Umgebung – also in AutoCAD und nicht in einem Straßenplanungssystem – entwickelt. Zudem werden die Daten über konventionelle Schnittstellen – wie DXF und REB und nicht OKSTRA oder LandXML – importiert. Aus diesen Gründen gehen Daten verloren, die für die Simulation benötigt werden. Deshalb müssen Daten im Rahmen dieser prototypischen Implementierung z. T. von dem Benutzer ergänzt werden.

Sollte der entwickelte Ansatz künftig in ein Straßenplanungssystem implementiert werden, würden viele Eingaben entfallen. Beispiele dafür sind die Eingaben der Baustellengrenzen in dem Formular ‚Projektbeschreibung‘ oder der Stationspunkte der Anfangs- und Endpunkte in den Formularen ‚Einschnitte‘ und ‚Dämme‘.

Tabelle 6.1: Erforderliche Eingaben der Gruppen ‚Baustellenstruktur‘ und ‚Maschinen/Material‘

Gruppe	Formular	Alphanumerische Eingaben	Geometrische Eingaben
Baustellenstruktur	Projektbeschreibung	- Projektbezeichnung - Firma - Bearbeiter - Arbeitsstunden/Tag - Arbeitstage/Woche - Anfangstermin - Freie Tage	- Koordinaten des Anfangsgrenzpunktes - Koordinaten des Endgrenzpunktes
	Einschnitte	- Bezeichnung - Anfangsstation - Endstation	- Koordinaten des Anfangsstationspunktes - Koordinaten des Endstationspunktes
	Dämme	- Bezeichnung - Anfangsstation - Endstation	- Koordinaten des Anfangsstationspunktes - Koordinaten des Endstationspunktes
	Zwl./Deponie	- Bezeichnung	- Koordinaten des Massenschwerpunktes
	Förderwege	- Bezeichnung - Geschwindigkeit auf einzelne Wegabschnitte oder deren Eigenschaften	- Layer - Förderweg zeichnen
Maschinen / Material	Bagger	- Bezeichnung - Löffelinhalt - Spielzeit auch in Abhängigkeit der Bodenklassen, Fahrer oder Einsatzbedingungen	
	Lkw	- Bezeichnung - Anzahl - Fassungsvermögen - Nutzlast - Gewicht - Motorleistung - Entladezeit	
	Boden	- Bezeichnung - Auflockerung - Spez. Gewicht - Beschreibung	

Alle zeitlichen Angaben können sowohl deterministisch als auch stochastisch eingegeben werden. Bei den anderen Eingaben genügt vorwiegend ein deterministischer Wert. Der Eingabebereich für zeitliche Daten wird in allen Formularen ähnlich gestaltet, siehe Abbildung 6.3. Hier kann die Taktzeit für die Bagger allgemein oder in Abhängigkeit von Bodenklasse, Baggerfahrer oder Einsatzbedingungen deterministisch oder stochastisch eingegeben werden, wobei eine der Verteilungsfunktionen gewählt werden muss: Gleich, Dreieck, Normal, Exponential, Lognormal, Gamma, Weibull oder Beta. Je nach Verteilungstyp sind unterschiedliche Parameter einzugeben.

Bagger

Eigenschaften

Bezeichnung: CAT375a

Löffelinhalt [m³]: 4,8

☐ CAT375a
☐ CAT375b
☐ CAT345a
☐ CAT345b
☐ CAT325

Bagger	Verteilung	Abhängig von	Wert	1. Parameter	2. Parameter	3. Parameter
CAT375a	Beta	ohne Angabe	0	4,69	17,55	0

☐ Deterministisch
☐ Gleichverteilt
☐ Dreieck
☒ Normal
☐ Exponential
☐ Lognormal
☐ Gamma
☐ Weibull
☐ Beta

Taktzeit

Abhängig von : ohne Angabe

Normalverteilung

Mittelwert:

Stdabw.:

Hinweis: Zeitangaben in Minuten

Minimum:

Maximum:

Abbildung 6.3: Das Formular zur Eingabe der vorhandenen Bagger

Die Förderwege sind meist temporär und werden daher in der Praxis nur bei Bedarf zusätzlich in das Layout gezeichnet, vorwiegend auch nicht in das Straßenplanungssystem, sondern in ein allgemeines CAD-System. Im Rahmen des entwickelten Systems ist ein Tool

programmiert werden, mit dem die Förderwege so gezeichnet werden, dass ihre geometrischen Eigenschaften automatisch extrahiert und für die Simulation bereitgestellt werden. Somit können die Förderwege, die sich mit der Entwicklung der Baustelle ergeben, in das Simulationssystem übernommen werden.

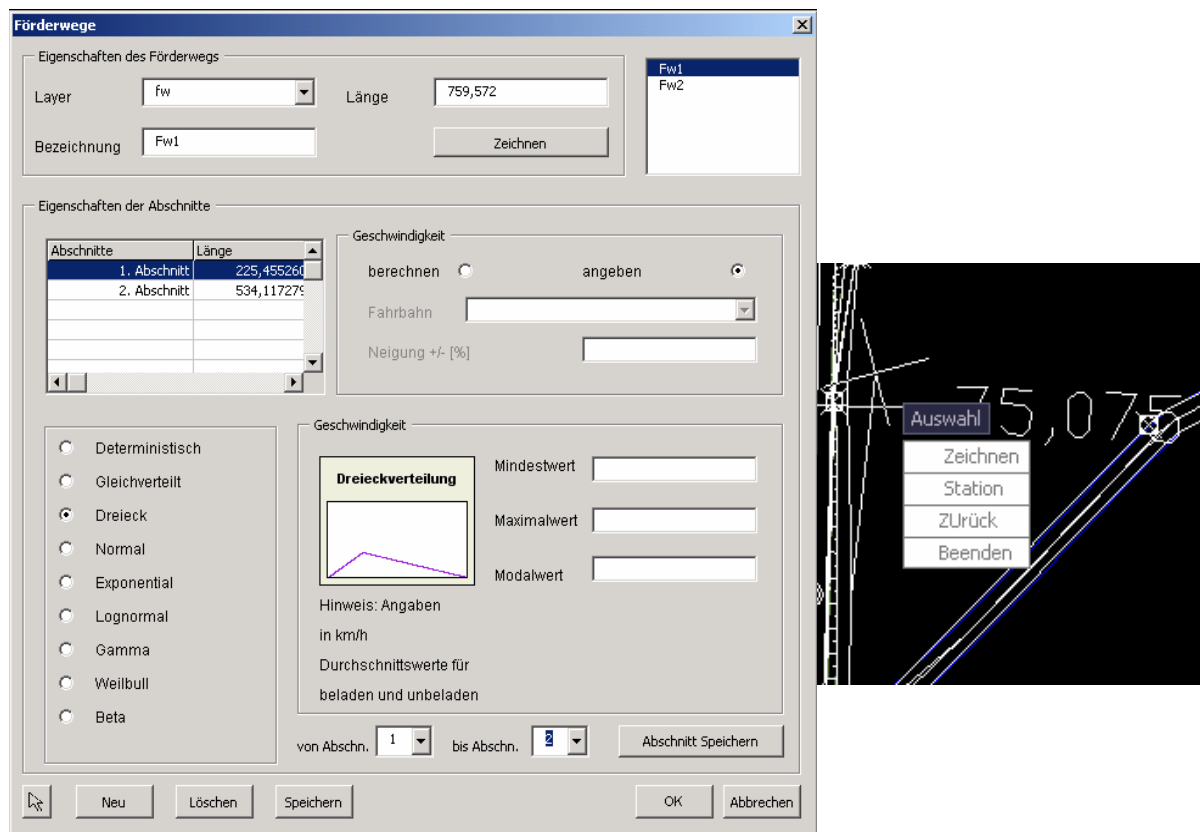


Abbildung 6.4: Das Formular zur Eingabe der vorhandenen Förderwege

Nach dem Definieren eines vorhandenen oder neuen Layers kann mit dem Zeichnen begonnen werden. Der Förderweg wird als eine Polylinie, bestehend aus mehreren Wegabschnitten, verstanden. Nach dem Anklicken des Anfangspunktes erscheint ein Kontextmenü mit vier Auswahlmöglichkeiten: ‚Zeichnen, Station, Zurück, Beenden‘, siehe Abbildung 6.4. Die Wahl ‚Zeichnen‘ rundet die Polylinie an dem angeklickten Punkt ab, so dass eine Kurve entsteht. Die Wahl ‚Station‘ führt dazu, dass ein neuer Abschnitt beginnt. Die Abschnitte unterscheiden sich durch die Wegeigenschaften. Zudem sollen Wegabschnitte Massenschwerpunkte markieren, um später Transportentfernungen automatisch berechnen zu können. Mit ‚Zurück‘ wird der bereits gezeichnete Förderweg bis zum letzten Abschnitt gelöscht. Der Befehl ‚Beenden‘ lässt das Förderwegformular wieder erscheinen. Dort wer-

den die Längen der definierten Wegabschnitte automatisch berechnet und ausgegeben. Für jeden Wegabschnitt soll dann die Geschwindigkeit als Wahrscheinlichkeitsverteilung eingegeben oder berechnet werden, wobei dies gleichzeitig für mehrere Abschnitte erfolgen kann, siehe Abbildung 6.4. Diese Berechnung erfordert die Wahl einer Fahrbahnbeschaffenheit und die Eingabe der Neigung, wodurch die Berechnung der erreichbaren Geschwindigkeit ermöglicht wird, siehe Abschnitt 5.6.4.3.

6.4.2 Menügruppe ‚Ablaufplanung‘ / ‚Ausführungsplanung‘

Um mit der Ablaufplanung beginnen zu können, müssen zumindest ein Einschnitt, ein Zielort – also Damm, Zwischenlager oder Deponie –, ein Förderweg, ein Bagger, ein Lkw und eine Bodenschicht eingegeben worden sein. Die Ausführungsplanung kann mit oder ohne Mengenermittlung erfolgen. Bei Implementierung in ein Straßenplanungssystem kann auf die Mengenermittlung verzichtet werden, weil sie in diesen Systemen bereits integriert ist. Damit jedoch diese prototypische Implementierung die Unabhängigkeit von einem bestimmten Straßenplanungssystem gewährt, ist eine Mengenermittlung nach REB 21.013, siehe Tabelle 4.1, realisiert. Wenn keine Mengenermittlungen durchgeführt werden müssen, können die Mengen in das entsprechende Formular direkt eingegeben werden.

Da die Ablaufplanung eine Reihe von aufeinander folgenden Aktionen darstellt, wurde sie als ein Wizard bzw. Assistent realisiert. Somit kann der Anwender die nächste Aktion nur durchführen, wenn die vorherige abgeschlossen ist. Das Wizard umfasst folgende Schritte:

- a) Ablaufabschnitt: Dieser Schritt beginnt mit dem Import von zwei REB-Dateien der Datenarten 50 und 66 (*REB 1979*). Datenarten werden nach einem in REB definierten Muster gespeichert. Das Kurvenband wird als eine Textdatei der Datenart 50 importiert, die Daten über die Straßenachse beinhaltet. Die Querprofile mit den unterschiedlichen Horizonten, wie Erdoberfläche, Mutterboden, Planum etc., werden als Koordinatenpunkte in Textdateien der Datenart 66 gespeichert. Die relevanten Horizonte sollen in einer Datei zusammengefasst und in das System importiert werden. Diese Daten sind bei jeder Straßenbaustelle bekannt und werden in der Praxis in der gleichen Form ausgetauscht, siehe Abbildung 6.5.

Aus einer Liste der bereits definierten Einschnitte soll ein Einschnitt gewählt werden, um in Abschnitte zerlegt zu werden. Ein Abschnitt wird dadurch definiert, dass eine Bezeichnung eingegeben und Anfangs- sowie Endstation aus der Liste gewählt wird, wobei die Stationsliste nach dem Import der REB-Dateien erscheint.



Abbildung 6.5: Das Wizard ‚Ausführungsplanung / Ablaufabschnitte‘

- b) Musterquerprofil: Für jeden Abschnitt kann ein Musterquerprofil definiert werden, das eine für den gesamten Abschnitt gültige Zerlegung in Erdkörper repräsentiert. Das Musterquerprofil kann als DXF bzw. DWG geladen und über entsprechende Schaltflächen ‚Zoom Alles‘ bzw. ‚Zoom Fenster‘ in dem Formular vergrößert werden. Nach der Wahl der entsprechenden Station aus der Stationsliste soll der Bezugshorizont angeklickt und seine Höhe über NN eingegeben werden. Dies sorgt dafür, dass das Koordinatensystem des Querprofils initialisiert wird. Auch die Bezugsachse kann in AutoCAD angeklickt werden, die nichts anderes als die Straßenachse darstellt und normalerweise auf den Querprofilen zu sehen ist, siehe Abbildung 6.6.

Abbildung 6.6: Das Wizard ‚Ausführungsplanung / Musterquerprofil‘

c) Wechselebenen: Eine Wechselebene steht für einen Horizont, der eine geplante oder durchgeführte Aushubtiefe darstellt. Sie kann die jeweilige Aushubschicht, eine bestimmte Schicht, die einen Wechsel der gegebenen Bedingungen ankündigt oder eine Schicht, die eine bestimmte Abrechnungsmenge abgrenzt, darstellen. Deshalb stehen für die Eingabe einer Wechselschicht mehrere Möglichkeiten bereit. Sie kann als eine Linie oder automatisch als eine Kopie eines vorhandenen Horizontes in das Querprofil auf einem bestimmten Layer und mit einer bestimmten Farbe gezeichnet werden. Ihre Höhe über NN oder eine zusätzliche REB-Datei der Datenart 66 sind weitere Eingabevarianten einer Wechselebene. Da ein Erdkörper nicht nur eine gesamte Schicht, sondern auch ein Teil dieser Schicht sein kann, werden gegebenenfalls auch Wechselachsen benötigt. Solche Wechselachsen können als eine vertikale Linie direkt in das Querprofil auf dem gleichen Layer der Wechselebenen gezeichnet werden. Die Eingabe eines bestimmten Abstandes von der Straßenachse in das Formular bewirkt ebenfalls, dass eine entsprechende Wechselachse automatisch in das Layout angezeigt wird, siehe Abbildung 6.7.

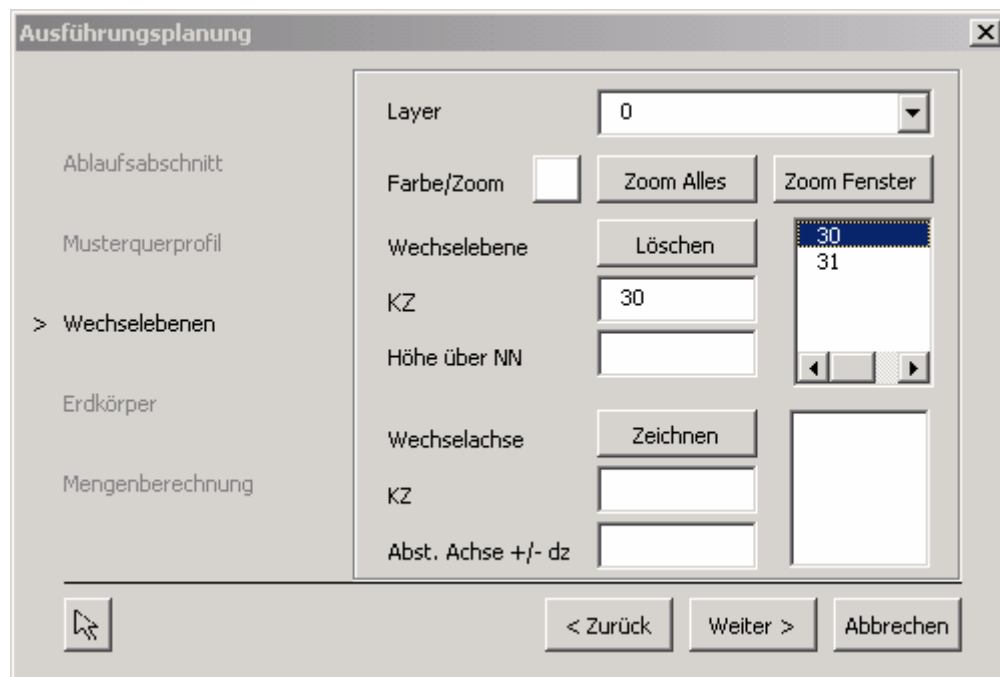


Abbildung 6.7: Das Wizard ,Ausführungsplanung / Wechselebenen'

- d) Erdkörper: Mit diesem Schritt werden Erdkörper auf einem zu definierenden Layer erstellt. Gleichzeitig werden ihnen auch Eigenschaften zugewiesen. Jeder Erdkörper wird von einem Bagger bearbeitet, dem mehrere Lkw zugeordnet werden. Außerdem erscheinen eingegebene Bodenklasse, Zielort und Förderweg in Listen, die zur Charakterisierung des jeweiligen Erdkörpers dienen. Durch die Eingabe eines Füllfaktors und einer Manövrierzeit können weitere erdkörperspezifische Eigenschaften abgedeckt werden. Mit der Schaltfläche ,Erstellen' gelangt der Anwender wieder in AutoCAD, wo er einen Punkt innerhalb des definierten Erdkörpers anklicken muss. Damit wird der Erdkörper als Objekt erstellt, siehe Abbildung 6.8.

Abbildung 6.8: Das Wizard ‚Ausführungsplanung / Erdkörper‘

- e) Mengenberechnung: Wie bereits erwähnt, erfolgt die Mengenberechnung nach REB 21.013 „Mengen zwischen Begrenzungslinien“. Diese Methode errechnet die Mengen zwischen maximal vier Horizonten bzw. Begrenzungslinien, die durch Angabe der Koordinaten einiger ihrer Punkte in Datenart 66 definiert werden. Bei der Mengenermittlung wird für einen Erdkörper die Stellung dieser Begrenzungslinien, z.B. oben, unten rechts oder links, definiert. Diese Stellung gilt für einen bestimmten Stationsbereich über der Straßenlinie. Die Veränderung der Stellung der Begrenzungslinien bedarf der Definition einer neuen Position. Die Summe der Mengen aller Positionen ergibt dann die Gesamtmenge eines Erdkörpers. Ein Erdkörper kann also mehrere Positionen umfassen. Für jede Position soll das Verlängerungsmaß KOEL definiert werden, um das die Horizonte bzw. Begrenzungslinien verlängert werden, damit sich Schnittpunkte ergeben (REB 1979). Ferner sind auch Anfangsstation, Endstation und maximal vier Begrenzungslinien für jede Position aus den entsprechenden Listen zu wählen. Die Begrenzungslinien der REB-Richtlinie entsprechen den Wechselebenen und Wechselachsen des entwickelten Systems. Dabei umfassen die Stationen den Abschnittsbereich und die Begrenzungen ‚Oben, Unten, Rechts und Links‘ aller importierten Horizonte bzw. aller eingegebenen Wechselebenen und Wechselachsen, siehe Abbildung 6.9. Die Schaltfläche ‚Profil zeichnen‘ öffnet ein Tool, mit dem das An-

schaufen von Begrenzungslinien über mehrere Stationen möglich ist. Es dient zur Bestimmung von Positionen für die Mengenberechnung. Diese kann anschließend über die Schaltfläche ‚Mengen REB 21.013‘ als Textdatei mit den Zwischenmengen aller eingeschlossenen Stationen ausgegeben und gespeichert werden. Die Mengen werden dann dem erstellten Erdkörper zugewiesen.

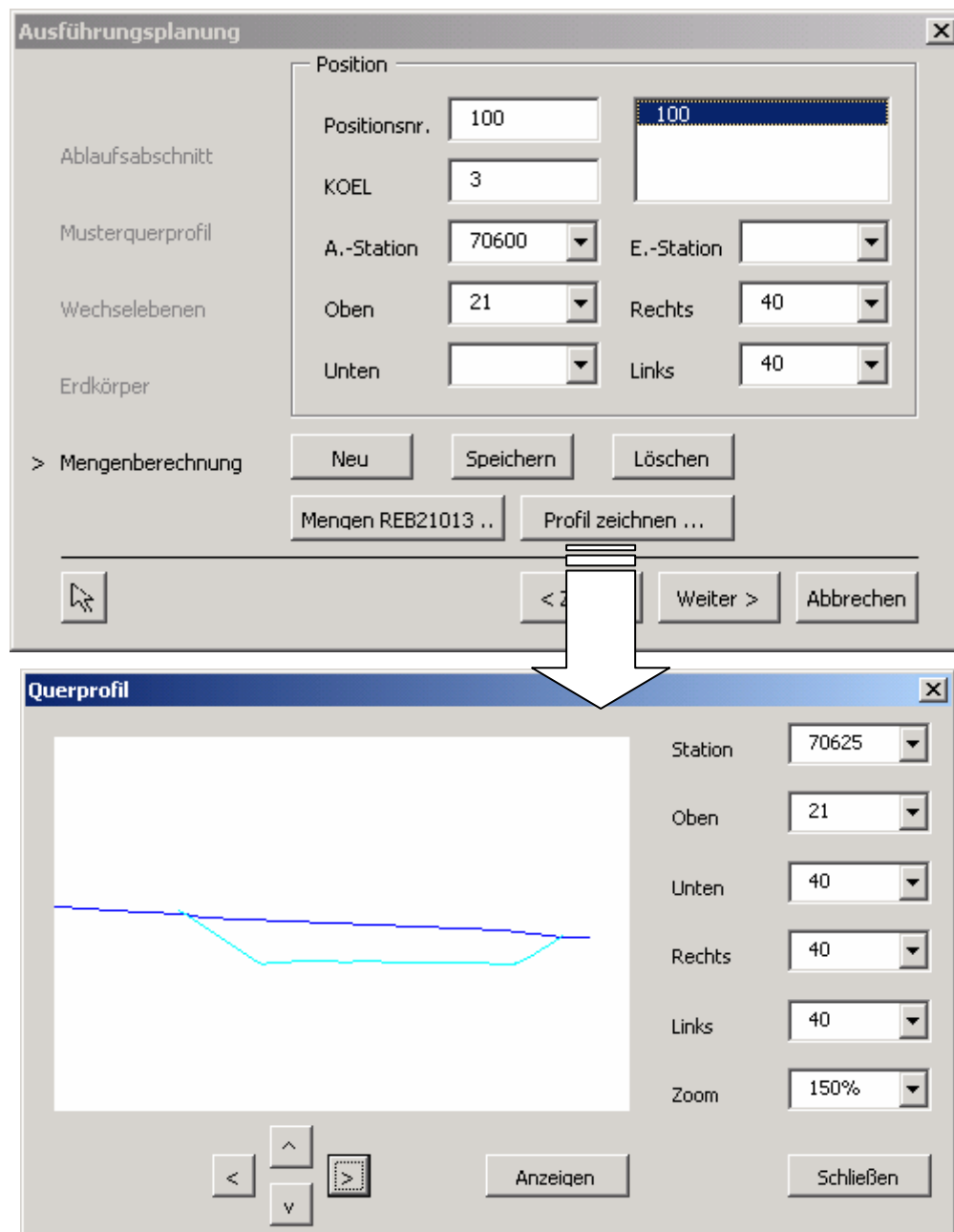


Abbildung 6.9: Das Wizard ‚Ausführungsplanung / Mengenberechnung‘

Für die Erdkörper existiert eine weitere Alternative zur Mengeberechnung, mit der die Mengen direkt über den Menüpunkt ‚Ausführungsplanung/Mit Mengeneingabe‘ eingegeben werden können. Das kann bei der Eingabe von aufgemessenen Ist-Mengen genutzt werden. Des Weiteren wird über den Menüpunkt ‚Mengen auf Zwischenlager‘ ein Dialog aufgerufen, in dem die Erdkörper aufgelistet werden, die zuerst zwischengelagert werden sollen. Zudem beschreibt der Dialog die Weiterbearbeitung der Erdkörper.

6.4.3 Menügruppe ‚Ablaufplanung‘ / ‚Terminplanung‘

Nach dem Eingeben der Aufbaustruktur für das Simulationsmodell soll der Ablauf definiert werden, was über das Terminplanungsprogramm MS-Projekt erfolgt. Mit dem in dieser Menügruppe enthaltenen Menüpunkt ‚Datei öffnen / erstellen‘ wird ein neues MS-Projekt Dokument erstellt und die hierarchische Struktur der Baustelle automatisch in die Vorgangsliste übernommen. Die Erdkörper bilden hier die unterste Hierarchie und repräsentieren somit die Vorgänge. Für jeden Erdkörper wird der jeweilige Bagger in der Ressourcen-Spalte automatisch aufgelistet, siehe Abbildung 6.10. Der Anwender muss dann alle Vorgängerbeziehungen als AA- oder EA-Beziehungen definieren. Daraus wird später die Simulationsreihenfolge der Erdkörper generiert, siehe Abschnitt 5.6.4.1. Nach diesem Schritt sollen die in MS-Projekt eingegebenen Daten in die XML-Datei geschrieben werden, wofür der Menüpunkt ‚Daten aus MS-Projekt speichern‘ zuständig ist.

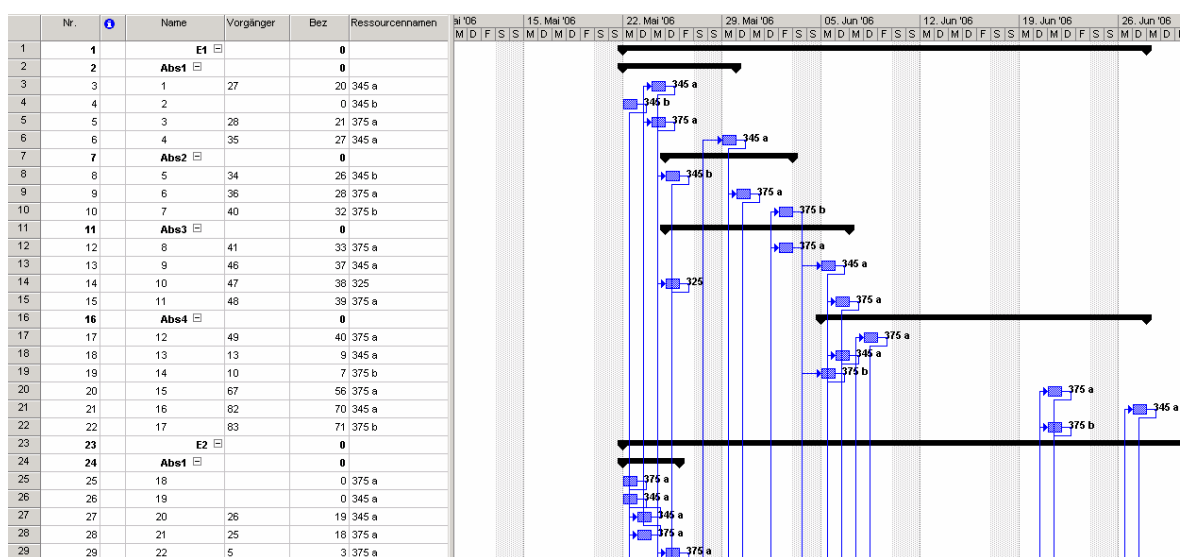


Abbildung 6.10: Automatische Integration der Daten in die Terminplanung

Nach der Simulation kann die Bearbeitungsdauer des jeweiligen Vorganges, also des Erdkörpers, Abschnittes oder Einschnittes, wieder in MS-Projekt integriert werden, so dass ein Basisterminplan entsteht, in dem dann die Beziehungen der Vorgänge genauer definiert werden können.

Dieser Schritt ist ein Beispiel für die Bedeutung der gemeinsamen Datenbasis, die im Abschnitt 5.1 erläutert ist. Zudem wird deutlich, welchen Beitrag die Simulation für andere Managementsysteme spielen kann. So können Informationen, die in die Terminplanung eingegeben werden, zum Aufbau des Simulationsmodells dienen. Im Gegenzug können die Daten der besten Lösungsvariante in die Terminplanung integriert und weiterbearbeitet werden.

6.5 Zusammenfassung und Auswertung

In diesem Kapitel wird eine prototypische Implementierung des entwickelten Ansatzes präsentiert. Zunächst erfolgt die Beschreibung der Randbedingungen, die zu den getroffenen Entscheidungen bezüglich CAD-Programm, Schnittstellen und Erweiterungskonzept führen.

Darauf aufbauend wird das Erweiterungskonzept mit Hilfe der Aufbau- und der Ablaufstruktur im Überblick beschrieben, um dann einen Eindruck über die erforderlichen Benutzereingaben in den unterschiedlichen Menügruppen zu vermitteln. Dabei spielen Kriterien, wie Flexibilität und Benutzerfreundlichkeit bei der Entwicklung der Oberflächen des Programms eine große Rolle.

Das nächste Kapitel greift das entwickelte CAD-basierte System auf und untersucht seinen Nutzen anhand mehrerer Beispiele eines Referenzprojektes. Dies dient gleichzeitig zur Evaluierung, d.h. die Ergebnisse können durch Vergleich der realistischen und der errechneten Werte beurteilt werden.

7 Systemevaluierung und Anwendung

7.1 Einsatzgebiete und Evaluierungsschritte

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten System können sowohl Linien- als auch Punktbaustellen modelliert werden. Bei den Letzteren liegt das Hauptaugenmerk auf der Abtragstelle bzw. dem Einschnitt, ohne zusätzliche Informationen über Auftragstellen bzw. Dämme, Zwischenlager oder Deponien einzugeben. Ein Förderweg mit einem Ziel soll jedoch zumindest eingegeben werden. In den Projektlebenszyklus ordnet sich die Anwendung des Systems in die zwei Phasen Planung und Ausführung ein, wobei jeweils mit unterschiedlicher Datenqualität und unterschiedlicher Zielsetzung gearbeitet wird. In der Planungsphase stehen nur unzureichend detaillierte Daten bezüglich der Maschinentaktzeiten, abzutragenden Erdmengen, Bodeneigenschaften etc. zur Verfügung. Im Gegensatz dazu können in der Ausführungsphase viel genauere Angaben zu den oben aufgezählten Parametern gemacht werden. Die Ziele einer Simulationsstudie sind für diese Projektphasen entsprechend anders. Während in der Planungsphase die Gesamtanalyse der Maschineneinsätze und der Massenverteilung im Mittelpunkt der Untersuchung steht, deren Güte stark von der Datenqualität abhängig ist, kann der Ablauf der Baustelle in der Ausführungsphase mit der Simulation operativ geplant, gesteuert und Schwachstellen detailliert untersucht werden.

Außer in der Planung und in der Ausführung kann auch das System in der Nachtragsbearbeitung eine durchaus sinnvolle Anwendung finden, zumal man mittels Simulation veränderte Randbedingungen nachbilden kann. Diese Nachbildung ermöglicht dem Auftragnehmer (AN), eingetretene Änderungen, die seiner Auffassung nach einen Nachtrag rechtfertigen, dynamisch darzustellen. Die Simulation gibt ihm somit eine aussagekräftige Gegenüberstellung der nachgebildeten Soll- und Ist-Abläufe an die Hand, die zur Kommunikation mit dem Auftraggeber (AG) genutzt werden kann. Damit kann dann der eventuelle Mehraufwand durch Änderungen ermittelt werden.

Im Folgenden wird die Anwendung des Systems anhand seiner Evaluierung demonstriert, die sich auf alle seine Komponenten bezieht. Die Kriterien für die Evaluierung des CAD-basierten Simulationssystems können in den folgenden Punkten zusammengefasst werden:

1. Anwendbarkeit: An einem realen Großprojekt soll gezeigt werden, dass der entwickelte Ansatz und daraufhin das implementierte System anwendbar ist.
2. Allgemeingültigkeit für den definierten Anwendungsbereich: Hier soll mit der Evaluierung aufgezeigt werden, dass das aufgabenspezifische Modell einer beliebigen Baustelle mit unterschiedlichen Parametern automatisch aufgebaut werden kann.
3. Nutzen: In diesem Zusammenhang soll der Nutzen, der mit dem Einsatz des Systems zu erzielen ist, verdeutlicht und belegt werden. Dies wird auf zwei Ebenen und mit unterschiedlichen Zielrichtungen praktiziert. Auf Prozessebene liefert das System bei dem Entscheidungsprozess eine große Unterstützung bezüglich der Zusammenstellung von Betriebsmitteln. Auf der Projektebene kann das System die Logistikoperationen, in Verbindung mit einer vorgeschlagenen Massenverteilungsvariante, analysieren.

Anhand eines Realprojektes wird das Gesamtsystem mit all seinen Komponenten evaluiert. Dabei werden die Vorteile des entwickelten Systems für die Entscheidungsfindung sowohl auf Prozess- als auch auf Projektebene beleuchtet. Eigentlich ist die Grenze zwischen den zwei Ebenen nicht eindeutig, weil sie sich gegenseitig beeinflussen. Z. B. spielt auf Prozessebene die Entscheidung für eine bestimmte Zusammenstellung von Betriebsmitteln beim gesamten Ablauf auf der Projektebene eine große Rolle. Im Folgenden werden die Vorgänge Lösen/Laden und die Wahl des Förderwegs der Prozessebene zugeschrieben. Auf der Projektebene werden hingegen Logistikoperationen durch Vergleich unterschiedlicher Massenverteilungsvarianten betrachtet. Zunächst werden das Realprojekt beschrieben und die vor Ort aufgenommenen Daten gemäß Abschnitt 5.2.2, statistisch aufbereitet. Sodann wird die vorgeschlagene geometrische Raumaufteilung in Abschnitte und Erdkörper an einem Beispiel aus dem Realprojekt aufgezeigt. Eine komplette Aufnahme des Ist-Zustandes wird in das System eingegeben und die Ergebnisse mit den real erzielten und dokumentierten Daten verglichen. Diesen Ergebnissen werden außerdem die Ergebnisse einer weiteren, besseren Ausführungsvariante gegenübergestellt. Der letzte Schritt zeigt eine mögliche und sinnvolle Anwendung des entwickelten Systems auf, die, wie eingangs erwähnt, auch für das Nachtragsmanagement einbezogen werden kann. Dabei sollte

das System schon in wesentlich früheren Projektphasen eingesetzt werden, als erst zum Zeitpunkt von Nachtragsstreitigkeiten.

7.2 Beschreibung des Realprojektes

Bei dem Realprojekt handelt es sich um eine ICE-Neubaustrecke zwischen Ebensfeld und Erfurt, die ein Bestandteil des „Verkehrsprojektes Deutsche Einheit Schiene Nr. 8“ ist. Die Streckenlänge beträgt ca. 107 km³, jedoch wird in dieser Arbeit nur der Bauabschnitt 3220 Ilmenau untersucht. Dieser Abschnitt deckt über ca. 6,2 km die Bau-km von 69,8+00 bis 76,0+70 ab, wobei das Wümbachtal und das Röstal mit zwei Brücken überspannt werden, siehe Abbildung 7.1. Dabei werden ca. 1,5 Millionen m³ Erdbauaushub zwischen verschiedenen Arbeitsstellen, nämlich sechs Einschnitten, neun Dämmen und zwei Deponien, bewegt.

Nahezu im gesamten Trassenbereich sind an der Geländeoberkante anstehende Lockergesteine aus geringmächtigem – 0 bis 3 m – sandigem Hang- oder Decklehm zu finden. Diese, als Schicht 1 genannte Bodenschicht ist in Klassen 3 und 4 klassifiziert (*DIN 18300*). Die nächste Bodenschicht besteht aus fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen mit vereinzelt, zwischengelagerten Ton- und Schluffeinlagen und wird in zwei Schichten unterteilt. Die erste Schicht wird Schicht 2a genannt und nach *DIN 18300* in die Bodenklassen 3 und 4 eingestuft, wobei Böden bis zur Klasse 6 sporadisch angetroffen werden können. Die nächste Schicht 2b hat eine Mächtigkeit von über 26 m und ist in die Klassen 6 bis 7 zu klassifizieren⁴.

³ Die Daten sind den Vergabeunterlagen entnommen.

⁴ Die Daten sind den Bodengutachten entnommen.

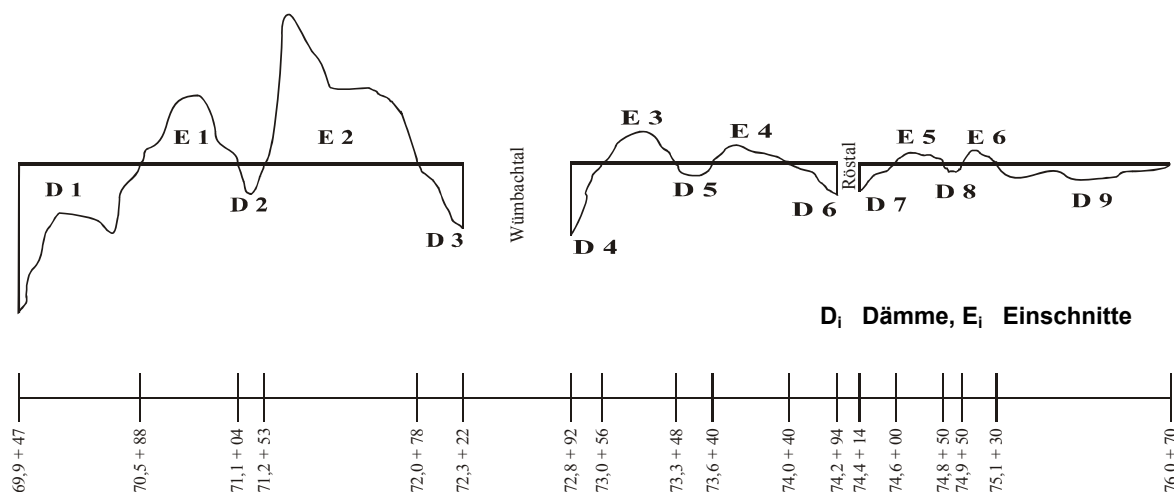


Abbildung 7.1: Längsprofilskizze (Szopa 2006)

Das Projekt wurde als Funktionsbauvertrag vergeben, der nicht nur den Bau der Strecke, sondern auch deren Unterhaltung über einen längeren Zeitraum beinhaltet. Funktionsbauverträge haben als Ziel die Erhöhung des Qualitätsstandards in Bezug auf die Produktivität, Verfahren, Materialien etc. Für solche Aufgaben sind effiziente Instrumente erforderlich, die, wie die Simulation, eine Wirtschaftlichkeitsanalyse der Ausführungsvarianten ermöglichen.

Die Phase der Erdarbeiten erstreckte sich hauptsächlich von März 2003 bis Juni 2004, wobei der größte Teil der Leistung (ca. 77 %) schon im ersten Jahr erbracht wurde. Nach der Winterpause, im März 2004, wurden die Arbeiten wieder aufgenommen.

7.3 Aufbereitung der Inputdaten

7.3.1 Datensammlung

Einer der vielen Vorteile der Simulation ist die Anwendung für den gesamten Zyklus der Planung, Arbeitsvorbereitung und Ausführung, wann immer eine Entscheidung zu treffen ist. Trotzdem ist es empfehlenswert, dass die Simulation schon in den früheren Phasen eingesetzt wird. Die Qualität der Inputdaten bestimmt die Qualität der Outputdaten einer Simulationsstudie. In der Planungsphase können Daten aus früheren, ähnlichen Projekten, zusammen mit vorhandenen Erfahrungswerten, bei der Generierung von Inputdaten für die Simulation helfen. Während der Ausführungsphase können die Daten für die Simulation gesammelt und entsprechend aufbereitet werden.

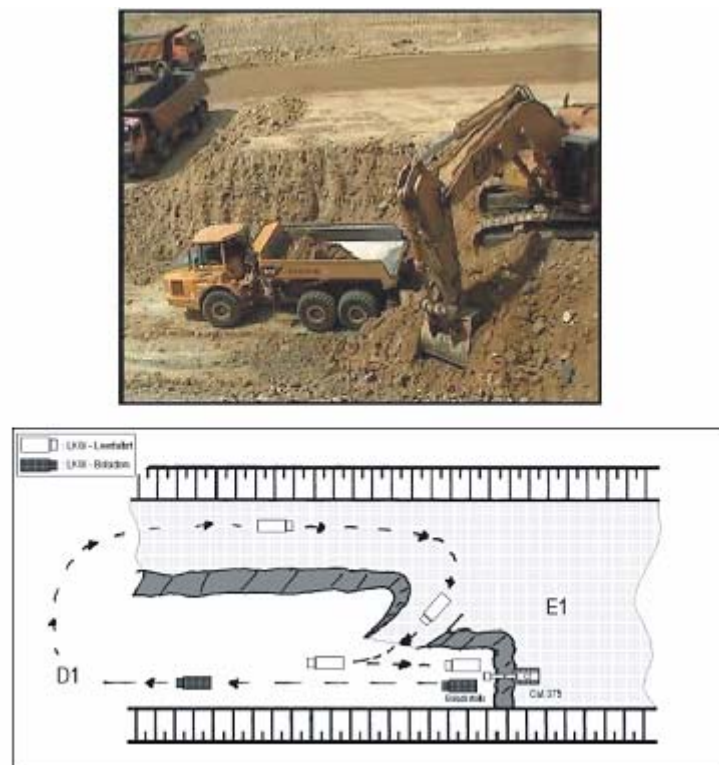


Abbildung 7.2: Beispiel zur Ansicht eines Einschnittes mit Übersichtsskizze

Bei dem untersuchten Projekt wurden keine genauen Massenermittlungen während des Ablaufs durchgeführt. Deshalb erwies sich die Datensammlung als schwierig. Insbesondere bei der Erfassung der tatsächlichen Mengen lagen nur wenige Informationen vor, u. a. weil auf ein Wiegen der Fahrzeuge verzichtet wurde. Auch standen wenige Daten über die eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge zur Verfügung und mussten erst bei den Herstellern (Bagger) oder bei den Subunternehmern (Fahrzeuge) erfragt werden. Aus den verfügbaren Unterlagen wurden im Wesentlichen die Tagesberichte des Transportunternehmens genutzt. Ferner wurden Videoaufnahmen von den arbeitenden Maschinen zur Abschätzung der Taktzeit durchgeführt und die Randbedingungen skizziert, siehe Abbildung 7.2.

Die Prozesse des Lösens und des Ladens wurden von Baggern des Herstellers Caterpillar verrichtet: zwei CAT 375 mit 319 KW und 4,8 m³ Löffelvolumen, zwei CAT 345 mit 239 KW und 3,5 m³ Löffelvolumen sowie ein CAT 325 mit 126 KW und 1,5 m³ Löffelvolumen, siehe Tabelle 7.1.

Tabelle 7.1: Vorhandene Bagger mit ihren Eigenschaften

Anzahl	Baggertyp	Löffelinhalt [m ³]	Leistung [KW]
2	CAT375	4.8	319
2	CAT345	3.5	239
1	CAT325	1.5	126

Bei den meisten aufgezeichneten Datenaufnahmen bestimmte die Größe des Baggers seine Stellung zu den Fahrzeugen. So waren im Allgemeinen zwei Stellungen zu beobachten, wobei der Bagger bei beiden Methoden eine erhöhte Stellung gegenüber den Fahrzeugen hatte:

1. Seitliche Beladung: Bei dieser Stellung musste der Bagger um ca. 90° schwenken und die Fahrzeuge seitlich beladen. Von Vorteil war dabei der einfache Fahrweg der Fahrzeuge, was eine geringe Manövrierzeit ergab; zudem konnten die Fahrzeuge ihre Position zur Beladung einnehmen, auch wenn der Bagger oder die Raupe loses Material geschoben hatte. Nachteilig dagegen war der Schwenkwinkel des Baggers, der zu einer verlängerten Spielzeit führte. Diese Methoden wurde ausschließlich bei den Baggern vom Typ CAT 345 und CAT 325 beobachtet, da beim seitlichen Beladen des Fahrzeugs die Ladefläche dem Bagger mit der kürzeren Seite zugewandt ist. Dadurch wäre bei einem größeren Bagger ein präziseres Entleeren erforderlich, siehe Abbildung 7.3 links.
2. Beladung vom Heck: Bei dieser Stellung schwenkte der Bagger in einen günstigen Schwenkbereich von nur 30-60°, was eine Zeitersparnis zur Folge hatte. Nachteilig ist hier das aufwendige Manövrieren der Fahrzeuge. Diese Stellung wurde zumeist bei dem großen Bagger CAT 375 beobachtet, siehe Abbildung 7.3 rechts.

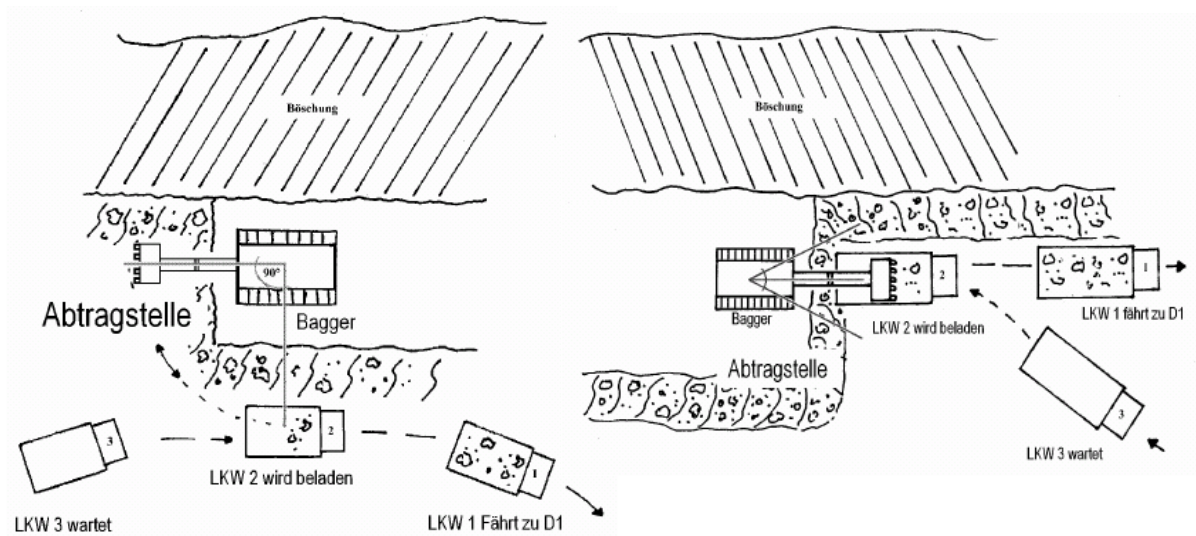


Abbildung 7.3: Übersichtsskizzen zur seitlichen Beladung und zur Beladung vom Heck

Die Transportleistung wurde an einen Subunternehmer pauschal vergeben. Dabei wurden Fahrzeuge unterschiedlicher Art und Größe zur Verfügung gestellt. Erfasst wurden die in der Tabelle 7.2 aufgelisteten Daten, wobei nicht die gesamte Anzahl der Fahrzeuge über die Bauzeit im Einsatz war. Da die Mulden eine Einzelanfertigung sind, wurden deren Dimensionen bei dem Subunternehmen erfragt, um den Inhalt nach SAE 2:1 berechnen zu können.

Tabelle 7.2: Vorhandene Transportfahrzeuge mit ihren Eigenschaften

Transport-fahrzeuge	Muldeninhalt nach SAE 2:1 [m³]	Motorleistung [Kw]	Leergewicht [t]	Anzahl
Mercedes 4146	21,5	313	17	Ca. 40
Mercedes 2043	31,0	332	19	3
Volvo A 40 D	24,7	314	31,3	4
Volvo A 35 D	22,0	289	28,3	5
Volvo A 30 D	19,5	253	23,1	12
Volvo A 25 D	16,8	225	21,6	14

7.3.2 Datenanalyse

Die erfassten Daten können in zwei Gruppen unterteilt werden: die erste Gruppe umfasst alle zeitlichen Daten und die zweite die sonstigen Daten, die keinen Zeitbezug haben. Die Daten der zweiten Gruppe wurden den vorliegenden Projektunterlagen entnommen bzw. ergaben sich durch die Befragung der Bauleitung. Die zeitlichen Daten hingegen wurden direkt auf der Baustelle aufgenommen. Und hierfür Videoaufnahmen aufgezeichnet, die in REFA als eine weitere Zeitaufnahmemöglichkeit benannt, und zu einem späteren Zeitpunkt bewertet werden (*REFA 1984 S. 52*).

Es wurden Erdarbeiten sowohl in den Einschnitten als auch auf den Dämmen betrachtet, um einen Gesamteindruck von dem ganzen Zyklus zu gewinnen. Dabei konnten Baggerspielzeiten, Manövrierzeiten, Transportzeiten und Entladezeiten erfasst werden. Da die Prozesse zyklisch sind und an einigen Orten, z.B. Baggerspielzeit, ziemlich schnell ablaufen, wurde das Programm ORTIM zur Datenaufnahme auf dem PDA (Personal Digital Assistant) verwendet. Das Programm unterstützt die zyklischen Prozesse, so dass der Anwender nicht immer den aufgenommenen Prozess notieren muss (*ORTIM 2002*). Außerdem können die erfassten Daten direkt in eine Exceldatei importiert werden, so dass eine doppelte Eingabe entfällt, siehe Abbildung 7.4.

Nach der Datenanalyse lagen insgesamt 80 Stichproben zur Auswertung bereit, die einen durchschnittlichen Umfang von jeweils ca. 130 Beobachtungen hatten. Diese große Datenbasis war aufgrund der mangelnden Dokumentation des Ist-Zustandes auch für die Ermittlung der tatsächlichen Mengen von großer Bedeutung, so dass die feste Masse eines Transportfahrzeugs durchschnittlich gerechnet werden konnte.

Der Schlüssel für erfolgreiche Simulationsexperimente ist u. a. die richtige Modellierung der Eingangswerte. Dafür können mehrere Methoden herangezogen werden. Zum Beispiel können diese Eingangsdaten direkt unverändert in die Simulation eingelesen oder aus denen empirische Verteilungen mit Hilfe der Summenhäufigkeitsfunktion gebildet werden. Eine dritte Methode ist die Auswahl einer geeigneten theoretischen Verteilungsfunktion, die die aufgenommenen Daten in bester Annäherung repräsentiert. Für den betrachteten Fall kommt die erste Methode nicht in Frage, weil nicht alle Daten über die Projektdauer gesammelt werden können. Von Nachteil bei der zweiten Methode ist, dass Werte außer-

halb der Bandbreite der beobachteten Daten in der Regel nicht generiert werden können. Außerdem kann eine empirische Verteilung nur schwer verändert werden (*Law und Kelton 2000 S. 296*). Die Stochastik der Bauprozesse ist deshalb vorzugsweise mit der Auswahl einer theoretischen Verteilung zu modellieren, die die Stichprobe am besten abbildet. Die Anpassung an eine theoretische Verteilung ist ein iterativer Prozess, der die im Abschnitt 5.2.1 aufgezählten Schritte umfasst. Die Wahl einer theoretischen Verteilung wird mit einem im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten Java-Programm durchgeführt (*Dai 2006*). Die Ergebnisse sollen den bisherigen, in dem Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Studien auf diesem Gebiet gegenübergestellt werden.

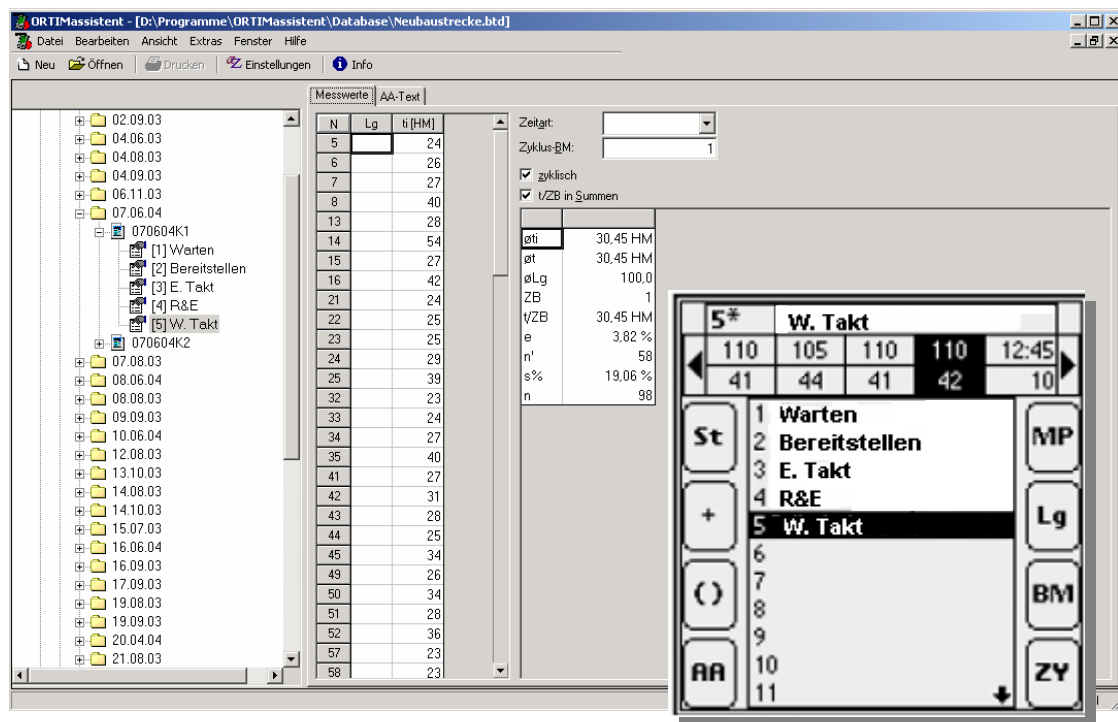


Abbildung 7.4: Zeitaufnahmeprogramm auf PDA und Datenübernahme im PC

Das Java-Programm importiert die Stichprobe als eine Excel-Tabelle und zeichnet ein entsprechendes Histogramm und einen $(\Theta_1 - \Theta_2)$ Plan (*Schmeiser und Deutsch 1977*), siehe Abschnitt 5.2.2. Nachdem der Anwender einen Verteilungstyp gewählt hat, werden die erforderlichen Parameter mit Hilfe des Maximum-Likelihood-Schätzers ermittelt, siehe Abbildung 7.5. Anhand des Kolmogorov-Smirnov-Tests (KS-Tests) können die Abweichungen der Stichprobe von der gewählten Verteilungsfunktion berechnet und gezeichnet werden (*Dai 2006*). Anschließend kann ein anderer Verteilungstyp getestet werden, um am

Ende die Verteilung mit den kleinsten Abweichungen in die Simulation zu integrieren. Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung aufgeführt.



Abbildung 7.5: Das Dialog zur Wahl einer passenden theoretischen Verteilungsfunktion (Dai 2006)

7.3.3 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung umfasst die Überführung der aufgenommenen stochastischen Daten, anhand des im vorigen Abschnitt beschriebenen Java-Programmes in theoretische Verteilungen. Auf diese Weise sind diese für die Simulation aufbereitet und können über Dialogmasken in AutoCAD entsprechend eingegeben werden. Für die erfassten Baggerspielzeiten, Manövrierzeiten, Transportzeiten, Entladezeiten wird im Folgenden ein $(\Theta_1 - \Theta_2)$ Plan aus den Stichproben gezeichnet, die entsprechenden Parameter geschätzt und die Güte der gewählten Verteilung getestet. Dabei wird bei den Baggerspielzeiten und Baggertypen so unterschieden, dass für jeden Baggertyp eine andere Verteilung ermittelt wird.

Aus der Schiefe und der Wölbung der aufgenommenen Stichproben, siehe Gleichungen 5.1 und 5.2, werden Θ_1 und Θ_2 nach den Gleichungen 5.3 und 5.4 ermittelt und in den $(\Theta_1 - \Theta_2)$ Plan eingetragen (Schmeiser und Deutsch 1977), siehe Abbildung 7.6.

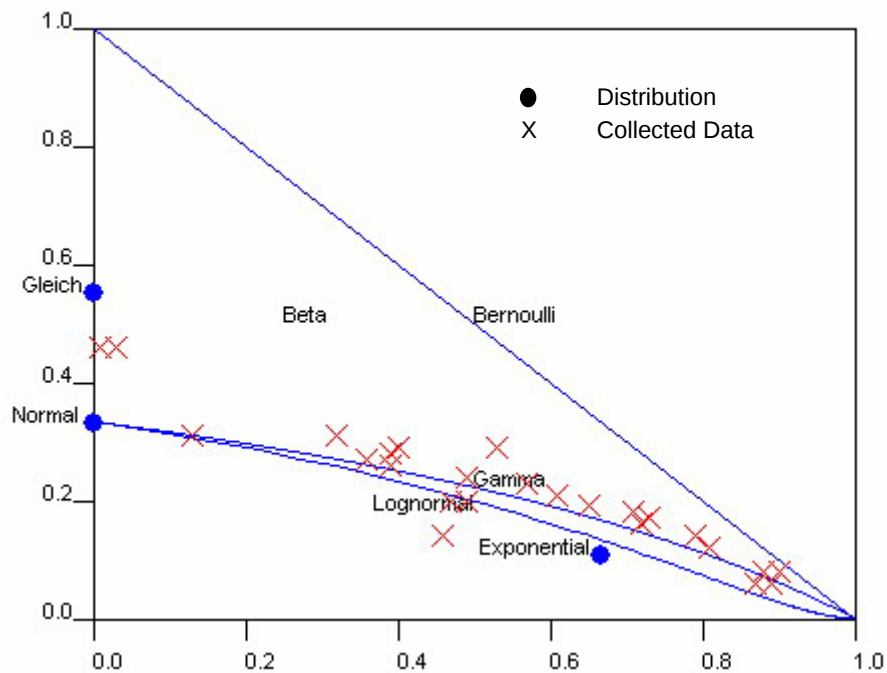


Abbildung 7.6: (Θ_1 - Θ_2) Plan für Spielzeiten des Baggers CAT 345

Der Plan zeigt, dass die meisten Punkte in der Beta-Region liegen. Dies bestätigt die Aussage von *AbouRizk und Halpin (1992)*, dass eine flexible Verteilung, wie die Beta-Verteilung, die Bauprozessdauern in bester Annäherung repräsentiert, siehe Abschnitt 5.2.2.

Da die Werte der Zufallsvariable X zwischen 0 und 1 liegen sollen, werden die aufgenommenen Daten, die normalerweise in einem Intervall $[Min \ Max]$ liegen, transformiert. Bei der Simulation sollen die Werte der Zufallsvariable X schließlich wieder zu ihrem ursprünglichen Wert, also in dem Bereich $[Min \ Max]$ anhand der Formel $Min + (Max - Min) X$, umgerechnet werden.

Die geschätzten Parameter der Beta-Verteilung für die Spielzeiten des jeweiligen Baggers sind in der Tabelle 7.3 aufgelistet, wobei der jeweilige Kolmogorov-Smirnov-Test eine akzeptable Abweichung aufweist, siehe Abbildung 7.7.

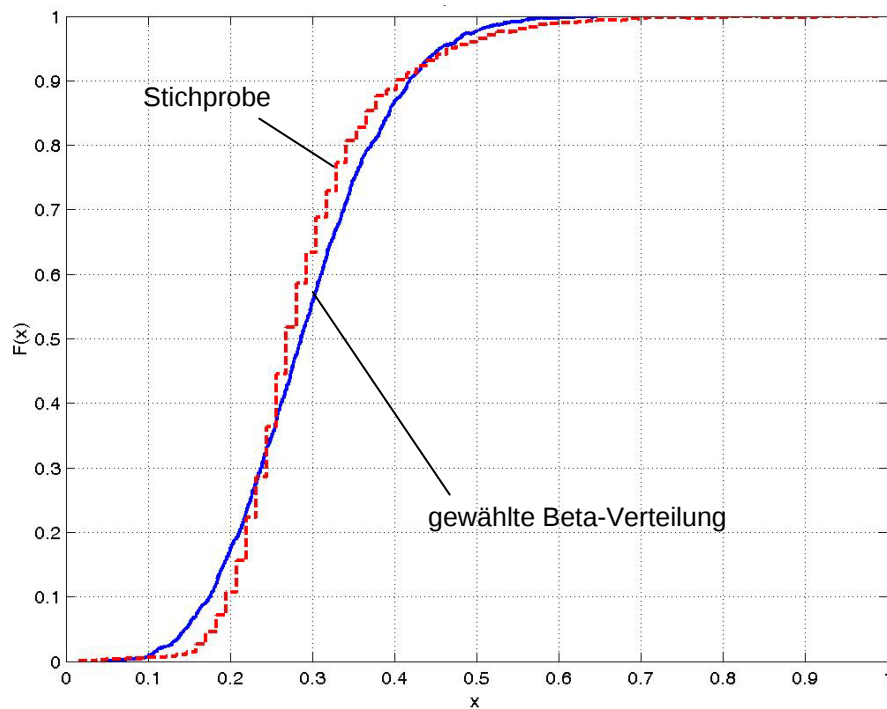


Abbildung 7.7: Dichtefunktionen der Beta-Verteilung im Vergleich zu den beobachteten Spielzeiten des Baggers CAT 345

Tabelle 7.3: Taktzeitverteilungen der eingesetzten Bagger

Baggeranzahl	Baggertyp	Löffelinhalt [m³]	Taktzeitverteilung in [min]
2	CAT375	4.8	$0.25 + \text{beta}(4.69, 17.55) \cdot 2.23$
2	CAT345	3.5	$0.25 + \text{beta}(6.772, 14.41) \cdot 1.35$
1	CAT325	1.5	$0.25 + \text{beta}(3.62, 17.01) \cdot 1.9$

Für die Auswertung der anderen Zeitdaten, d. h. Manövrierzeiten, Transportzeiten und Entladezeiten, standen weniger Stichproben zur Verfügung. Für die ermittelten Daten wies der $(\Theta_1 - \Theta_2)$ Plan auch hier auf eine Beta-Verteilung hin, siehe Abbildung 7.8.

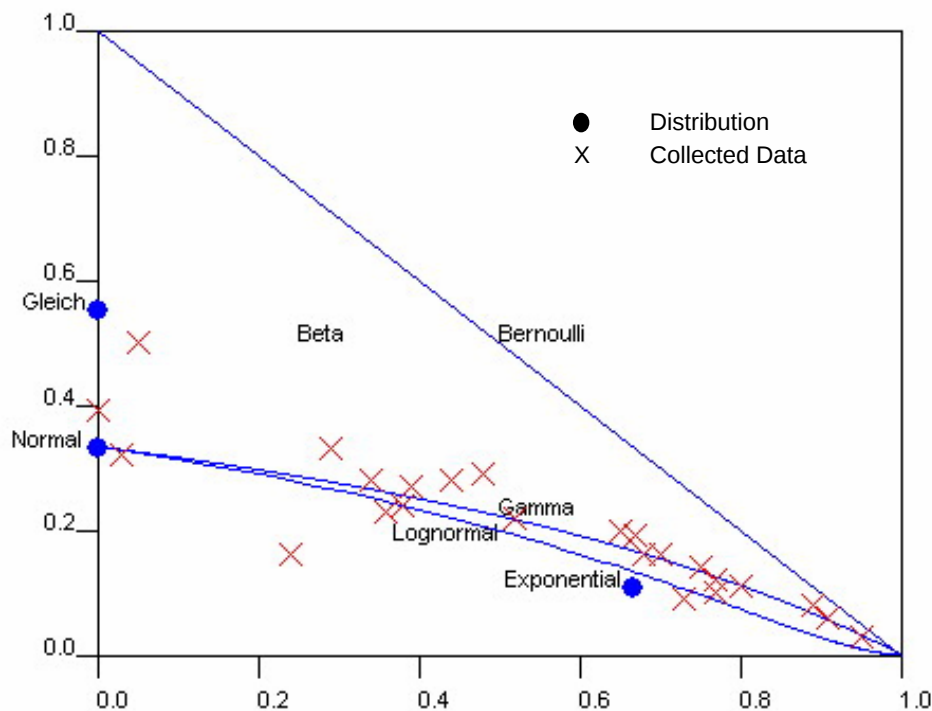


Abbildung 7.8: (Θ_1 - Θ_2) Plan für Transportzeiten der Lkw

Dabei ergibt sich die Verteilung $2 + \beta (2.58, 6.60) * 9.7$ [km/h] für die Geschwindigkeiten der Lkw und die Verteilung $0.44 + \beta (1.16, 2.52) * 1.8$ [Min] für Entladezeiten. Die Verteilung der Manövrierzeiten wird als eine Normalverteilung mit einem Mittelwert von 0,49 [Min] und Standardabweichung von 0,23 angenommen.

7.4 Einsatzanalyse auf Prozessebene

Auf Prozessebene kann die Analyse Entscheidungen während der Ausführungsphase unterstützen. Außerdem wird so der Ablauf dokumentiert und kann jeder Zeit mit der Simulation dynamisch am Bildschirm beobachtet werden.

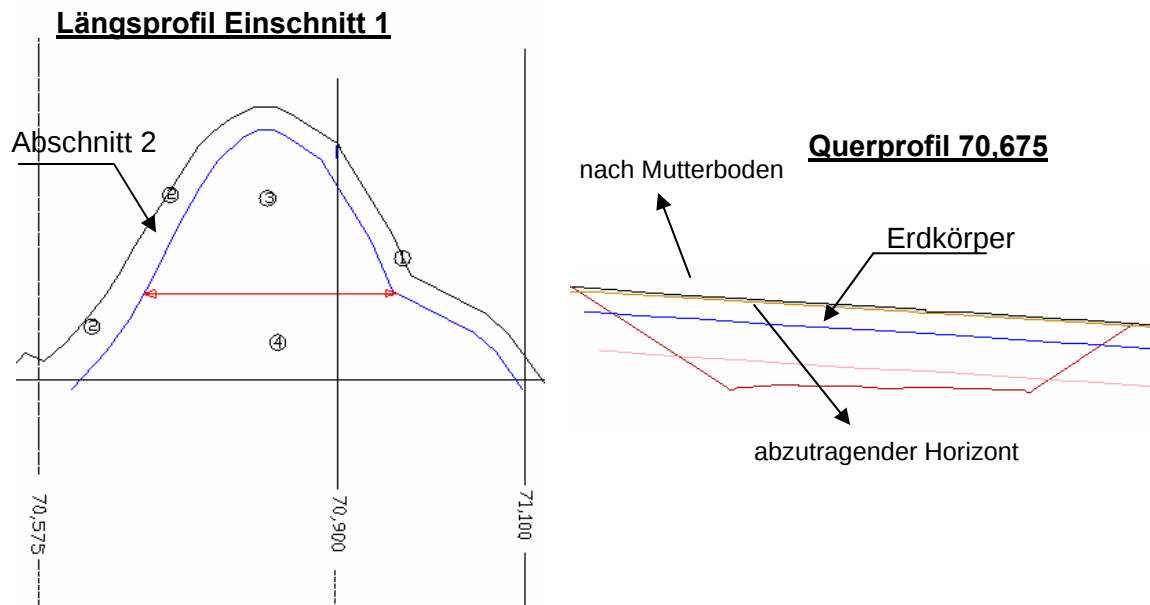


Abbildung 7.9: Der betrachtete Erdkörper aus Abschnitt 2 des Einschnitts 1

Nach Eingabe der Struktur der Baustelle, der eingesetzten Maschinen und Eigenschaften der vorliegenden Böden kann mit der Planung der Ausführung begonnen werden. Die Baustelle unterteilt sich in sechs Einschnitte und neun Dämme. Der erste Einschnitt kann in Abschnitte und Erdkörper zerlegt werden. Hier wird exemplarisch der zweite Abschnitt als einziger Erdkörper betrachtet, der vom Bagger CAT 345 zu bearbeiten ist, siehe Abbildung 7.9. Der Abschnitt 2 erstreckt sich über die Stationen 70,575 und 70,900. Das Musterquerprofil an der Station 70,675 enthält den untersuchten Erdkörper, siehe Abbildung 7.9 rechts. Dieser Erdkörper ist oben von der Ebene ‚nach dem Mutterbodenabtrag‘ und unten von der Ebene des ‚abzutragenden Horizontes‘ begrenzt. Die Mengenberechnung dieser Erdkörper ergibt eine Gesamtmenge von 42.453,32 m³.

Die Ist-Analyse zeigt, dass ca. 72 % der Mengen im Einschnitt 1 nach D1 und der Rest nach Deponie Wütemberg transportiert wurden. Angenommen wird, dass die Mengen des Erdkörpers wahlweise nach D1 über den Förderweg 1 oder nach Deponie Wütemberg über den Förderweg 2 befördert werden können, siehe Abbildung 7.10.

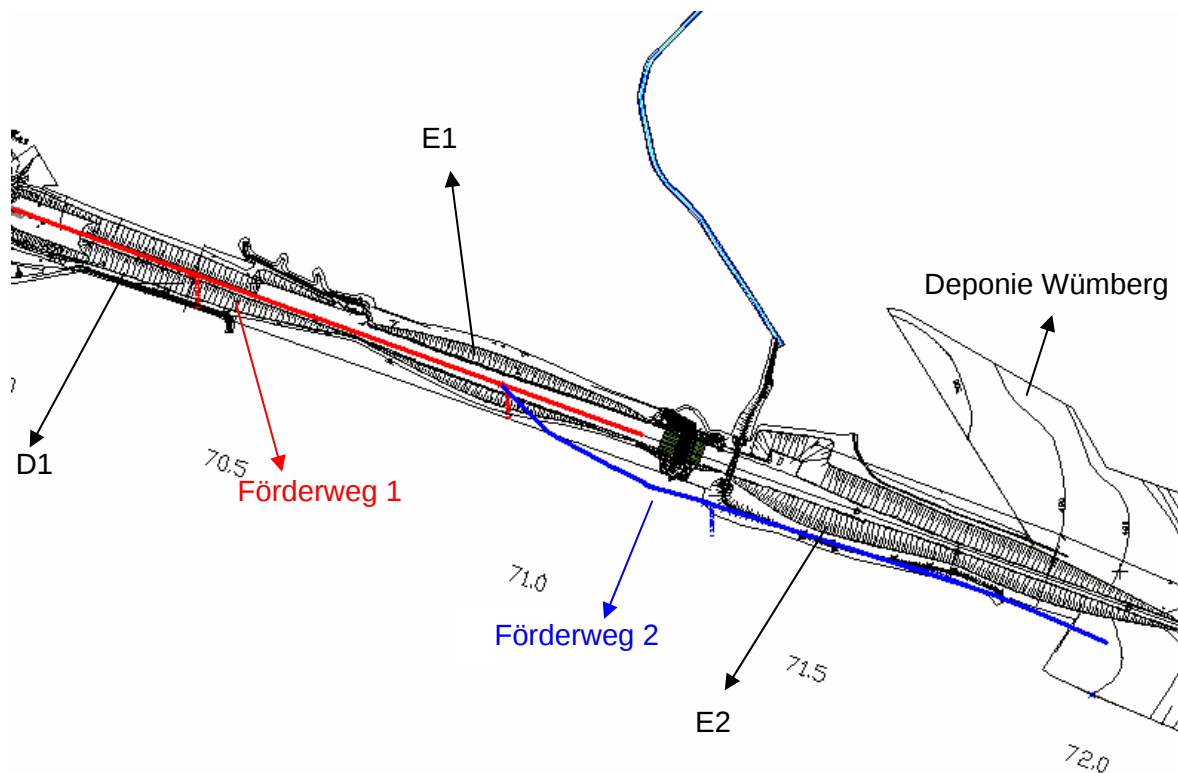


Abbildung 7.10: Mögliche Förderwege zum Bodentransport von E1

Bei den Förderwegen handelt es sich um temporäre Wege, die in der Regel nicht aufgemessen werden. Mit dem Programm ist es sehr einfach, diese in den Lageplan einzuzeichnen und in die Berechnungen einzubeziehen. In diesem Beispiel sollen Entscheidungen gefällt werden bezüglich der Zusammenstellung der Geräte, also wie viele Lkw den Bagger CAT 345 bedienen sollen, und des wirtschaftlichsten Förderweges, wobei sich die Eigenschaften der Wege unterscheiden. Die Tabelle 7.4 zeigt die Unterteilung der Wege in Wegabschnitte, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Wegabschnitte können auch definiert werden, um den Anschlusspunkt (Massenschwerpunkt) zur Berechnung der Abstände zu bestimmen. Die Länge des jeweiligen Abschnitts wird automatisch von dem Programm berechnet. Zudem wird für jeden Erdkörper die Anzahl der zu fahrenden Abschnitte ermittelt. Wie im Abschnitt 6.4.1 erwähnt ist, kann die Geschwindigkeit entweder direkt eingegeben oder berechnet werden. Die hier eingegebenen Geschwindigkeiten sind als eine Beta-Funktion eingegeben, wobei sich der Wert der Beta-Funktion aus der Gleichung: $Min + Beta(\alpha_1, \alpha_2) \times (Max - Min)$ ergibt. $Beta(\alpha_1, \alpha_2)$ ist die Zufallszahl nach der Beta-Verteilungsfunktion mit den Parametern α_1 und α_2 . Min und Max sind der minimale und der maximale aufgenommene Wert in der Stichprobe, siehe Abschnitt 7.3.3. Wenn die Ge-

schwindigkeit vom Programm zur Laufzeit berechnet werden soll, sind Angaben über Fahrbahn und Steigung notwendig, siehe Abschnitt 5.6.4.3.

Tabelle 7.4: Eigenschaften der eingegebenen Förderwegabschnitte

Förderweg	Abschnitt	Länge [m]	Geschwindigkeitsangaben
1	1	324,67	2+beta (2.58, 6.60)*9.7 [km/h]
	2	570,55	2+beta (2.58, 6.60)*9.7 [km/h]
	3	264,47	2+beta (2.58, 6.60)*9.7 [km/h]
2	1	416,47	Fahrbahn: feuchte, schlammige Oberfläche auf festem Grund. Steigung: -3,2 %.
	2	737,65	Fahrbahn: unverdichtete Kippe. Steigung: +8 %.

Nur der zweite Wegabschnitt des ersten Förderwegs wird angefahren. Dies ergibt im Vergleich zum zweiten Förderweg eine kürzere Entfernung. Da die Eigenschaften der Förderwege unterschiedlich sind, kann jedoch eine mögliche Erhöhung der Geschwindigkeit die Fahrzeit beeinflussen, dennoch ist eventuell der längere Weg wirtschaftlicher. Die Leistung der Bagger kann dann in Relation zu den verursachten Treibstoffkosten der Lkw gesetzt und die wirtschaftlichste Alternative angewendet werden.

Die Abbildung 7.11 zeigt die Entwicklung der Leistung des Baggers CAT 345 mit der Anzahl der eingesetzten Lkw nach den zwei alternativen Förderwegen (FW1 und FW2), wobei der Lkw-Typ Mercedes 4146 gewählt wurde. Die Anzahl der Touren bleibt für beide Varianten konstant und beträgt 2174 Touren.

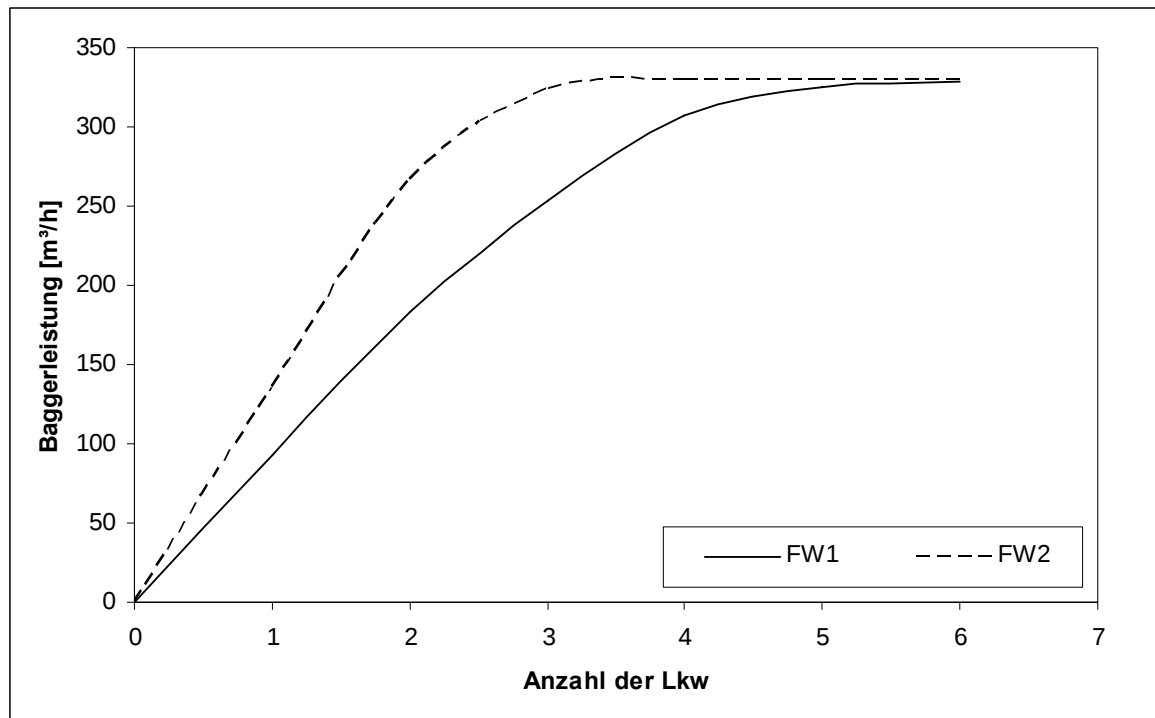


Abbildung 7.11: Leistung des Baggers CAT 345, in Abhängigkeit von der Anzahl der Lkw bei zwei alternativen Förderwegen

Die Wartezeiten des Baggers und der Lkw sind sowohl für die Variante mit dem ersten Förderweg (1) als auch für die Variante mit dem zweiten Förderweg (2) der Abbildung 7.12 zu entnehmen. Die wirtschaftlichste Zusammenstellung ergibt sich aus maximaler Baggerleistung und minimalen Baggerwartezeiten. Bei der ersten Variante muss der Leistungsanstieg des Baggers in Relation zu den verursachten Kosten beim Einsatz eines Lkw gestellt und daraufhin 4 oder 5 Lkw eingesetzt werden. Das Gleiche gilt für die zweite Variante, wobei nur 2 oder 3 Lkw bei einem wirtschaftlichen Einsatz den Bagger bedienen sollen.

Alle Eingangsgrößen können auf ähnliche Weise variiert werden, bis die beste Entscheidung unter Einbeziehung der vorhandenen Randbedingungen, gefunden wird. Das Verhältnis zwischen Volumen des Transportgerätes und Volumen des Grabgefäßes spielt z. B. auch eine Rolle bei der Gestaltung eines wirtschaftlichen Transportbetriebs, wobei dieses Verhältnis zwischen 1:5 und 1:7 liegen muss (*Bauer 1994 S. 116*). Je nach Füllfaktor sind die Lkw Volvo A 25 und Mercedes 2343 nicht am besten geeignet für den Bagger CAT 345. Ein Experiment mit den vier Volvo A 25 zeigt eine Erhöhung der Anzahl der erforderlichen Touren um ca. 12 % auf 2451 auf.

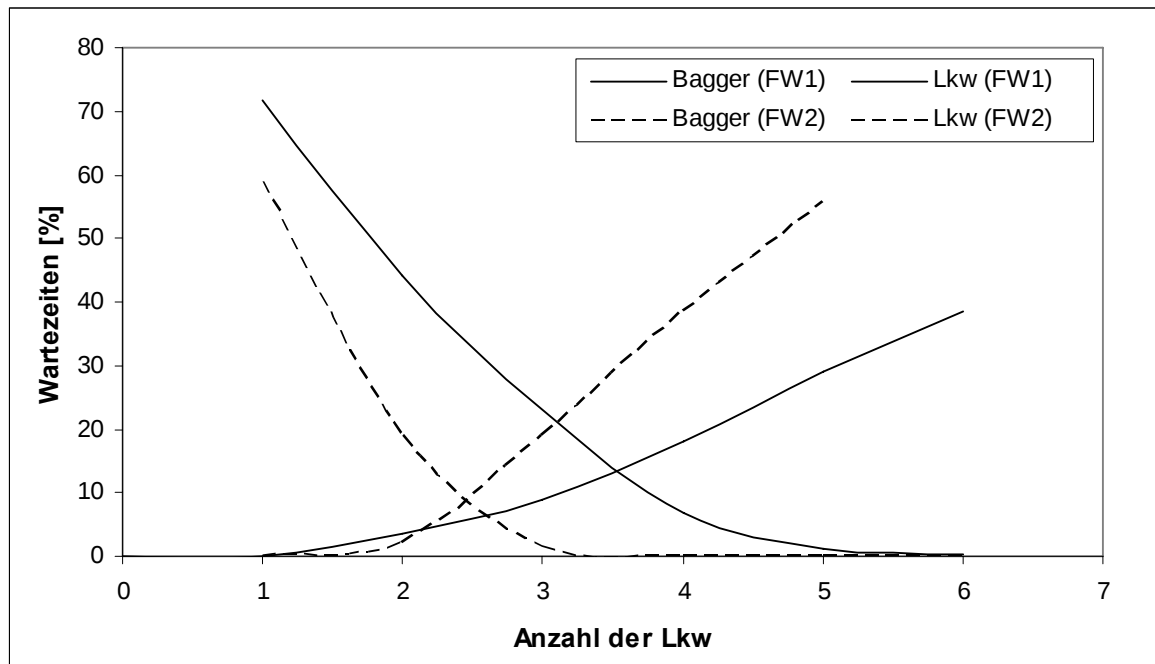


Abbildung 7.12: Wartezeiten des Baggers CAT 345 und der Lkw, in Abhängigkeit von der Anzahl der Lkw bei zwei alternativen Förderwegen

Bei diesen relativ kurzen Fahrzeiten spielt der Ladeprozess bei der Bestimmung der Leistung der Betriebsmittelkette eine größere Rolle. Deshalb könnten Ausführungsvarianten mit kürzeren Manövrier- oder Taktzeiten, die im Rahmen einer Prozessanalyse simuliert werden, zu wirtschaftlicheren Ergebnissen führen.

7.5 Simulation des Ist-Zustandes

Die im Abschnitt 7.3.1 beschriebenen Schwierigkeiten bei der Datensammlung gelten auch bei der Erfassung des Ist-Zustandes. Von den zur Verfügung stehenden Unterlagen können am zweckmäßigsten die Tagesberichte des Transportunternehmers und die aufgezeichneten Videos für die Ist-Analyse genutzt werden. Den Bautagebüchern jedoch sind keine weitergehenden Informationen zu entnehmen. In den Tagesberichten werden Informationen, wie Tourenanzahl, Baggertyp, Einsatzzeit, Abtrag- und Eintragstelle, Transportentfernung etc., festgehalten. Die Auswertung dieser Tagesberichte hinterlässt offene Fragen. So werden beispielsweise einige Fahrzeuge mit drei unterschiedlichen Volumen abgerechnet, obwohl aus den Videoaufnahmen die gleichen Randbedingungen erkennbar sind. Die Daten der Tagesberichte können somit nicht bedingungslos übernommen werden (Szopa 2006).

Trotzdem kann der Ablauf annähernd rekonstruiert werden. Die Ist-Mengen werden errechnet unter der Annahme eines für alle Bodenklassen gleichen Auflockerungsfaktors von 0,75 und eines Löffelfüllfaktors von 0,9. Die Zerlegung der Einschnitte in Abschnitte und Erdkörper wird, unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen, der eingesetzten Betriebsmittel und des zeitlichen Ablaufs, durchgeführt. Dabei ergeben sich 142 verschiedene Erdkörper in den sechs Einschnitten, für die zum Teil andere Bedingungen, wie Anzahl und Typ der Lkw, Ziel, Transportweg, Baggertyp etc., erkennbar sind. Die Eingabe in das implementierte System erfolgt ohne Mengenberechnung, weil die tatsächlichen Ist-Mengen simuliert werden sollen. Das System stellt automatisch einen Basisterminplan, in dem die Vorgänger-Beziehung zu definieren sind, siehe Abschnitt 6.4.3. Für diesen Schritt wird auch der Zeitrahmen für die Ausführung des einzelnen Erdkörper in Betracht gezogen und zu den anderen Erdkörpern in Beziehung gesetzt.

Den Ergebnissen der Erfassung des Ist-Zustandes nach haben die fünf Bagger ca. 4191 h, einschließlich Pausen, gearbeitet. Dabei konnte eine Gesamtleistung von ca. 252 m³/h errechnet werden. Die Berechnung der Leistung bzw. der Auslastung des einzelnen Baggers ist aus den vorhandenen Unterlagen nicht möglich. Für den Transport der angefallenen Bodenmengen zu den unterschiedlichen Zielen, siehe Abb. 7.14, sind insgesamt 110250 Lkw-Touren erforderlich (*Szopa 2006 S. 71 f.*). Die Entfernungsmatrix kann der Tabelle 7.5 entnommen werden.

Die Simulation des beschriebenen Ist-Zustandes ergibt eine Gesamtdauer von ca. 3096 h. Die berücksichtigten Zeiten beinhalten jedoch keine Pausen. Deshalb sollen bei einem adäquaten Vergleich zwischen diesem Simulationsergebnis und der aufgenommenen Daten die Pausenstunden zu den Simulationsstunden addiert werden. Unter der Annahme einer einstündigen Pause bei einem 9-stündigen Arbeitstag ergeben sich 3440 h. Die Differenz von ca. 18 % bei der Dauer ergibt sich durch das Auswerten der Taktzeiten der Haupttätigkeiten des jeweiligen Betriebsmittels, d. h. ohne mögliche Nebennutzungszeit, Brachzeiten oder Verteilzeiten in Betracht zu ziehen (*REFA 1984 S.33*). Bei der Leistungsberechnung wird, je nach Einsatzbedingungen in der Regel eine Verteilzeit der Grundleistung zugeschlagen. Dabei wird die Bandbreite der zeitlichen Nutzung des Baggers zwischen maximal 83 % und minimal 45 % definiert (*Bauer 1994 S. 92*). Die zuvor angegebene Differenz

von 18 % zeigt eine zeitliche Nutzung der eingesetzten Betriebsmittel von 82 % auf (ca. 50 Minute pro Stunde) und liegt damit in der üblichen Bandbreite.

Tabelle 7.5: Entfernungsmatrix in [m] (Szopa 2006 S. 89)

	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6
D 1	750	1500	3250	4250	5250	5500
D 2	500	250	2000	3000	4000	4250
D 3	1250	500	1250	2250	3250	3500
D 4	2250	1500	250	1250	2250	2500
D 5	3250	2500	750	250	1250	1500
D 6	4000	3250	1500	500	500	750
D 7	4250	3500	1750	750	250	500
D 8	4625	3875	2125	1125	125	125
D 9	5250	4500	2750	1750	750	500
Wümbach	1500	750	1000	2000	3000	3250
Wümbachtal	2750	2000	250	750	1750	2000

Die Tourenanzahl der Simulation des Ist-Zustandes beträgt 111364 Lkw-Touren, bei denen 255,402 km zurückgelegt werden, und weist damit eine Differenz von 1 % gegenüber der erfassten Tourenanzahl auf. Dieses Ergebnis ist durchaus zufrieden stellend, insbesondere deshalb, weil bei der Simulation ein einheitlicher, deterministischer Füllfaktor und ein einheitlicher Auflockerungsfaktor für alle Bodenarten angenommen wurden.

Die Simulation ermöglicht außerdem eine dynamische Darstellung des Ablaufs. So können mit dem Fortschritt der Simulationszeit die transportierten m³ und die zurückgelegten Kilometer angezeigt werden, siehe Abbildungen 7.13 und 7.14. Dabei werden in der Abbildung 7.14 die einfachen Entfernungen notiert.

Des Weiteren besteht mit der Simulation die Möglichkeit, die Grundleistung und die Auslastung des einzelnen Baggers, unter Einbezug der definierten Randbedingungen, ebenfalls mit dem Fortschritt der Simulationszeit zu berechnen, siehe Abbildung 7.15. Die Abbildung 7.15 zeigt, dass der Bagger CAT 325 fast vollständig ausgelastet ist, insbesondere im Vergleich zum ersten CAT 375- Bagger, der eher als Leistungsträger geplant war. Außerdem wurden, wie die Abbildungen 7.13 und 7.14 zeigen, die Mengen des Einschnittes 2 weiter gefahren als es mit einer anderen Massenverteilung möglich gewesen wäre. Diese zwei Anmerkungen stellen Verbesserungspotentiale dar, die als weitere Simulationsvarianten analysiert werden können.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
D1	276444.0	280382.0				
D2		37782.1				
D3		110482.0				
D4		12530.8	24266.7			
D5			7426.7	289.798		
D6		21644.0	6422.52	2363.68		
D7		5886.34	8934.22			
D8		785.801				
D9		9961.71	59387.0	21634.3	2803.27	2597.53
Wuernberg	107037.0	417594.0				
Wuembachtal		186793.0	24143.9	14379.8	5903.2	5652.38

Abbildung 7.13: Matrix der transportierten m³ als Ergebnis der Simulation des Ist-Zustandes

Matrix_der_gefahrenen_Km						
	E1	E2	E3	E4	E5	E6
D1	12882.3	25948.5				
D2		646.25				
D3		16517.5				
D4		1260.0	437.5			
D5			114.0	4.5		
D6		4748.25	246.5	42.0		
D7		1389.5	132.5			
D8		209.52				
D9		2754.0	3100.28	391.25	47.0	38.0
Wuemberg	9942.0	20315.5				
Wuembachtal		25420.0	441.0	256.0	105.25	94.25

Abbildung 7.14: Matrix der gefahrenen einfachen Kilometer als Ergebnis der Simulation des Ist-Zustandes

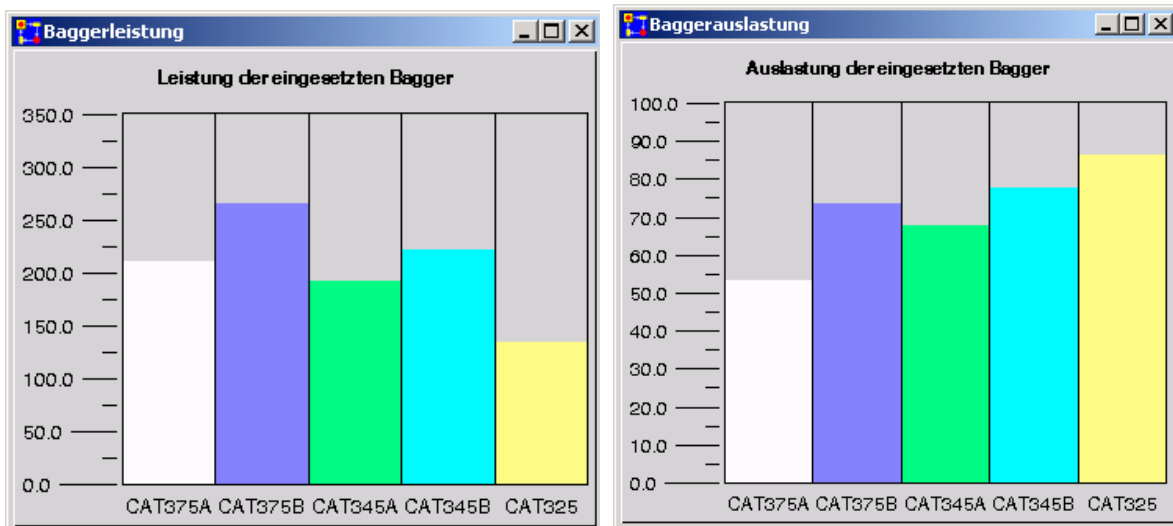


Abbildung 7.15: Leistung [m³] und Auslastung [%] der eingesetzten Bagger im Ist-Zustand

7.6 Simulation einer weiteren Ausführungsvariante

Ausgehend von den im vorigen Abschnitt beschriebenen Verbesserungspotentialen können mehrere Varianten simuliert werden. Je nach Projektphase kann dann mit unterschiedlicher Detaillierung und Datenqualität gearbeitet werden. Wenn für jeden Erdkörper der Einsatz mit Hilfe der Simulation während der Ausführung gesteuert wird, können Veränderungen des Ablaufs als eine weitere, ausgeführte Variante festgehalten werden.

Die in diesem Abschnitt ausgearbeitete Variante stützt sich zwar auf die aufgenommenen Ist-Taktzeiten und Ist-Mengen, nimmt jedoch einen anderen Betriebsmitteleinsatz und eine andere Mengenverteilung an. Dabei berücksichtigen diese Annahmen mögliche Baustellengegebenheiten, die den im Abschnitt 7.5 beschriebenen und simulierten Ablauf möglicherweise bedingt haben, nicht in genauem Maße. Die hier simulierte Ausführungsvariante stellt somit ein alternatives Szenario des Ablaufes dar.

Nach dieser Variante kommen nur die zwei großen Bagger, also CAT 375, mit jeweils sieben Lkw und Mercedes 4146, zum Einsatz, wobei die Anzahl der Lkw, je nach Förderweg, zu optimieren wäre. Der Ablauf wird so konstruiert, dass die tatsächliche Einsatzzeit der Bagger im Ist-Zustand möglichst Berücksichtigung findet.

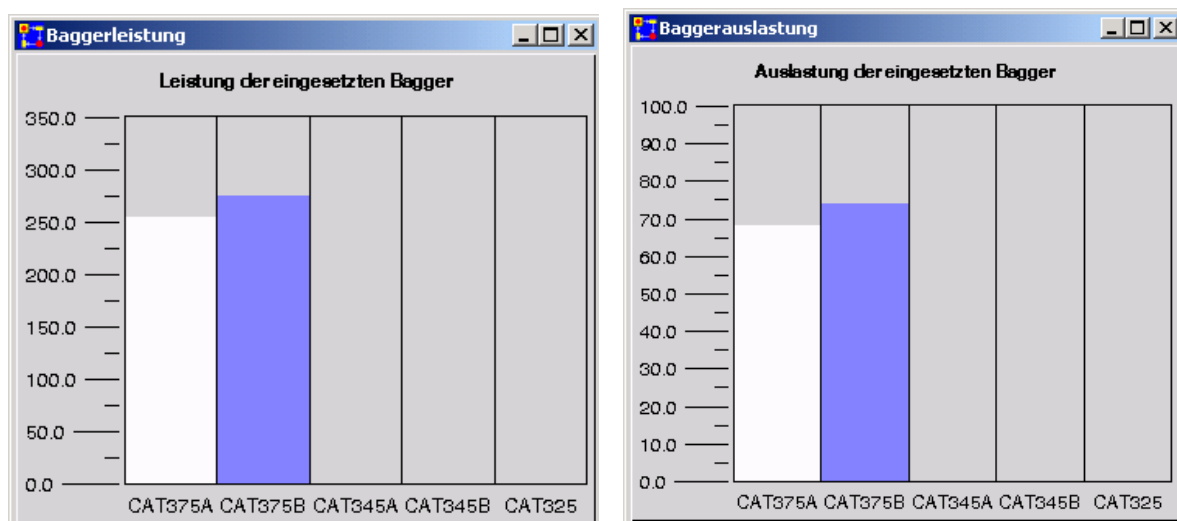


Abbildung 7.16: Leistung [m³] und Auslastung [%] der eingesetzten Bagger in der weiteren Variante

Die Simulation dieser fiktiven Variante zeigt eine Gesamtdauer von ca. 3457 h auf. Dies bedeutet eine Erhöhung der Ausführungszeit gegenüber der Variante des Ist-Zustandes um ca. 10 %. Diese Verschiebung im Terminplan ist der Kosteneinsparung, die sich durch die Reduzierung der Anzahl der eingesetzten Bagger von fünf auf zwei ergibt, gegenüberzustellen. Die Leistung und die Auslastung der eingesetzten Bagger kann der Abbildung 7.16 entnommen werden.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
D1	383493	206129				
D2		37419				
D3		110243				
D4		41763				
D5		13926.5				
D6				298333		
D7		6246.8		8710.1		
D8					2527.7	
D9		81015.2			6182.4	8452.5
Wuernberg		522864.8				
Wuernbachtal		62290.9	130715.9			

Abbildung 7.17: Matrix der transportierten m³ als Ergebnis der Simulation

Die Tourenanzahl der Simulation dieser Variante der Massenverteilung, siehe Abbildung 7.17, beträgt 82218 Lkw-Touren, bei denen 163,657 km zurückgelegt werden. Im Vergleich zu den Ergebnissen des Ist-Zustandes kann mit dieser Variante die Anzahl der gefahrenen km um ca. 35 % reduziert werden.

Auf diese Weise können unterschiedliche Varianten und Vorschläge von Projektbeteiligten verglichen werden, um die wirtschaftlichste Variante zu finden, die auch die örtlichen Randbedingungen und die verfügbaren Betriebsmittel für jeden Erdkörper in Betracht zieht.

7.7 Zusammenfassung

Ziel dieses Kapitels ist die Erörterung verschiedener Einsatzgebiete des entwickelten Ansatzes und die Evaluierung des implementierten Systems. Hierfür erfolgen Felduntersuchungen an einem Realprojekt, deren Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Diese Untersuchungen umfassen Video- und Zeitaufnahmen der arbeitenden Betriebsmittel. Außerdem werden die Randbedingungen des gesamten Ablaufs der Erdbauarbeiten festgehalten. Mittels der gesammelten Daten und der zur Verfügung stehenden Unterlagen kann dann der Ablauf annähernd rekonstruiert, abgebildet und simuliert werden. Mit Hilfe dieses Projektes kann das System evaluiert und somit auf seine Anwendbarkeit, Allgemeingültigkeit und seinen Nutzen geprüft werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Fazit

Diese Forschungsarbeit befasst sich mit der Anwendung der Simulationstechnik in der baubetrieblichen Praxis. Das Ziel ist dabei, Wege aufzuzeigen, mit denen die Modellierung der komplexen Bauprozesse vereinfacht wird. Dafür ist ein produktmodellbasierter Ansatz zur Integration von CAD und Simulation, speziell für Erdbauprozesse in Straßenbauprojekten, entstanden.

Diese Prozesse unterliegen vielen veränderten Randbedingungen, die den Planungsprozess erschweren. Die Folge ist, dass Entscheidungen in die Ausführungsphase verlagert und meist unter Zeitdruck getroffen werden. Deshalb kommt der Erfahrung eine große Bedeutung zu, wobei die Folgen von Entscheidungen oftmals nicht hinreichend genau abgeschätzt werden können. Diese Folgen von Entscheidungen können mit der Simulation nicht nur prognostiziert, sondern auch unter Berücksichtigung dynamisch veränderter Randbedingungen quantifiziert werden.

Die zunehmende Digitalisierung der Baustelle, die von mehreren Applikationen für unterschiedliche Zwecke genutzt wird, treibt die heutigen technischen Anforderungen immer höher, so dass ein reines Geometriemodell nicht mehr genügt. Deshalb gehen die Entwicklungen in Richtung Produktmodelle, die ein Bauprojekt umfassend in all seinen Phasen und für relevante Applikationen bis in das kleinste Detail beschreiben. Diese Beschreibung geht also über die Geometrie hinaus und beinhaltet Daten über Eigenschaften, Beziehungen, Toleranzen etc., die für Planung, Analyse, Herstellung, Betrieb usw. von Bedeutung sind. Auch im Straßenbau sind solche Produktmodelle anzutreffen. Die Arbeit untersucht diese Produktmodelle auf ihre Eignung für die Simulation, die dadurch profitieren kann, dass Produktmodelle um simulationsrelevante Parameter erweitert und als Schnittstelle zur Parametrisierung genutzt werden. Dies hat den Vorteil, dass alle Projektdaten – auch ablaufrelevante Daten, die normalerweise nur unzureichend archiviert werden – in einer einzigen Datei, entsprechend einem definierten Schema, dokumentiert werden. Ein Ergebnis dieser Arbeit ist die Entwicklung eines simulationsrelevanten Produktmodells, namens SRM, das die für die Simulation erforderlichen Parameter beinhaltet.

Ein Petri-Netz-basiertes Simulationssystem wurde speziell für Erdbauprozesse in Straßenbauprojekten entwickelt. Das System geht von folgendem Prinzip aus: auf allen Baustellen wiederholen sich bestimmte Prozesse und können daher als einen festen Bestandteil eines Simulationssystems modelliert werden. Veränderte Randbedingungen, Geometrie und Betriebsmitteleigenschaften unterscheiden sich dagegen von einer Baustelle zur anderen und sollen deshalb mit der Parametrisierung in dem System entsprechend generiert werden. Das bedeutet, dass das Modell einer bestimmten Baustelle erst nach der Parametrisierung entsteht.

Die Parametrisierung vom SRM kann durch gängige Planungssysteme, wie CAD und Terminplanung, erfolgen und hierdurch den Modellierungsaufwand reduzieren sowie den Weg zur Einführung der Simulation in die Praxis ebenen. Hierfür wird im Rahmen dieser Arbeit eine neue Zerlegungsmethodik vorgeschlagen, mit der die Projekte nicht mehr nur in Vorgänge (konventionell mit CPM-Modellierung), sondern auch in Raumeinheiten manuell aufgeteilt werden. Die Raumeinheiten bzw. Erdkörper sind in einer hierarchischen Struktur integriert, die den Aufbau der gesamten Baustelle umfasst und stellen die Prozessträger dar, die von den Betriebsmitteln in der Simulation bearbeitet werden. Diesen Raumeinheiten können unterschiedliche Eigenschaften zugewiesen werden, unter anderem auch solche Eigenschaften zur Klassifizierung des Bodens, zur Beschreibung des Ablaufs bzw. der Bearbeitungsreihenfolge, die für die Simulation erforderlich sind.

Der in dieser Forschungsarbeit entwickelte Ansatz zur Anwendung von Produktmodellen als Schnittstelle zur Parametrisierung eines erdbauppezifischen Petri-Netz-basierten Simulationssystems wurde prototypisch implementiert. An einer realen Baustelle konnte außerdem gezeigt werden, dass der entwickelte Ansatz den Entscheidungsfindungsprozess in mehreren Projektphasen unterstützen kann. Ferner bestätigen die Ergebnisse die Empfehlungen anderer Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der statistischen Analyse der Bauprozesse zur Bildung von Beta-Verteilungen bei der Eingabe dieser Daten in die Simulation.

8.2 Beiträge zur Forschung

Im diesem Abschnitt werden die Beiträge dieser Arbeit zu den im Abschnitt 3.2 konzipierten Forschungsrichtungen erörtert. Diese Forschungsrichtungen werden in dem vierten und

fünften Kapitel ausführlich beschrieben und deren Ergebnisse im sechsten Kapitel prototypisch implementiert.

8.2.1 Beiträge zur Anwendung von Petri-Netzen im Baubetrieb

Diese erste Kategorie thematisiert die erste Forschungsrichtung der Arbeit und bezieht sich auf die Anwendung der Simulation im Allgemeinen und der Petri-Netze insbesondere für die Lösung baubetrieblicher Fragestellungen. Die Aufgaben des Baubetriebs werden in der Regel mit Hilfe von analytischen Methoden, die nur unter extremer Vereinfachung in der Realität einsetzbar sind oder intuitiv durch Erfahrung zu bewältigen sind. Dabei können jedoch zur Unterstützung numerische Methoden, wie die Simulation, angewendet werden. Die Simulation kann die Realität näher und in dynamischer Form abbilden. Dabei werden die bisherigen Erfahrungen einbezogen, indem die Definition von Simulationsvarianten und die Entscheidung für eine dieser Varianten dem Simulationsanwender überlassen werden.

Aus den im Abschnitt 1.2.2 beschriebenen Modellierungsmethoden wird ein kombinierter Ansatz vorgeschlagen. Das heißt, einige Modellierungsschritte werden für einen spezifischen Anwendungsbereich in ein Simulationssystem integriert. Die übrigen Modellierungsschritte können durch die Parametrisierung über das Layout vervollständigt werden. Dafür werden die in Petri-Netzen definierten Prädikat-Transitions-Netze (PrT) in dieser Arbeit erstmalig zur Simulation eines ganzen Bauprojektes verwendet, wobei die Analyse einzelner Prozesse auch möglich ist. Diese Vorgehensweise macht das Simulationssystem flexibel und gültig für alle Erdbaustellen. In diesem Zusammenhang wird eine übersichtliche Form der Markenstruktur vorgeschlagen, die auch für andere Anwendungsbereiche hilfreich sein kann.

Mit dieser Methodik ist die Anwendung der Simulation für den Baubetrieb und somit eine realitätsnahe, dynamische Betrachtung der Bauprozesse, unter Einbezug von stochastischen Einflüssen, auf einfache und effiziente Weise möglich. Die Vorteile der Simulation sind in diesem Zusammenhang:

- Die Ermittlung von Vorgangsdauern für die Terminplanung, wobei diese nicht auf Aufwandswerten, sondern auf realitätsnahen Gegebenheiten der Baustelle beruhen.

- Eine detaillierte, dynamische und stochastische Analyse des Einsatzes von Betriebsmitteln, die mit anderen angewandten Methoden nicht möglich ist.
- Eine quantitative Prognose von Entscheidungseinflüssen in allen Projektphasen.
- Erfassung von veränderten Ausführungsbedingungen und deren Auswirkungen sowie die Möglichkeit zur Kommunikation mit anderen Projektbeteiligten, was u. a. eine große Hilfe im Nachtragsmanagementbereich sein kann.

8.2.2 Beiträge zur Integration von CAD und Simulation

Die zweite Kategorie beruht auf der zweiten Forschungsrichtung, die sich mit den Integrationsmethoden von CAD und Simulation befasst. In dieser Hinsicht wurde auch ein produktmodellbasiertes Verfahren zur Datenextraktion aus CAD und Datenweitergabe an die Simulation entwickelt. Das Verfahren baut auf einer Untersuchung der im Straßenbau verwendeten Schnittstellen auf, einschließlich der Produktmodelle mit dem Ziel, die Simulationsrelevanz zu beurteilen. Das Ergebnis ist, dass vorhandene Produktmodelle um viele simulationsrelevante Daten erweitert werden müssen, wobei auch zusätzliche geometrische und betriebsmittelabhängige Daten und eine andere Strukturierung der Projekte, aus Sicht der Simulation, erforderlich sind.

Zur Integration von CAD und Simulation wird die Anwendung eines simulationsrelevanten Produktmodells empfohlen. Ein Produktmodell hat somit die Aufgabe der Schnittstelle und der Datenhaltung, wobei die Aufbau- und die Ablaufstruktur des Produktes bzw. Projektes in einem Dokument enthalten sind. Die wesentlichen Daten dafür wurden objektorientiert definiert und in XML, die moderne Form der Datenhaltung, umgesetzt. Das entwickelte Produktmodell kann auch an bestehende Straßendatenmodelle angebunden werden, wie am Beispiel von OKSTRA im Abschnitt 4.5 gezeigt wird.

Diese neue Form der Integration von CAD und Simulation bietet eine transparente Parallelität der Daten über alle Systeme und integriert praxisnahe Strukturen in eine flexible und erweiterbare Schnittstelle. Dazu werden die Daten des Aufbaus und des Ablaufs an einer zentralen Stelle gesammelt und gespeichert.

8.3 Ausblick und künftige Forschungsaktivitäten

Transparenz, Erweiterbarkeit und Flexibilität sind die wesentlichen Eigenschaften des entwickelten Ansatzes. Diese Tatsache eröffnet viele Forschungsperspektiven in den beschriebenen Forschungsrichtungen. So können im Simulationssystem weitere Betriebsmittel integriert werden. Auch Störungen können, wenn sie erfassbar oder prognostizierbar sind, modelliert werden.

Zur Erfassung simulationsrelevanter Daten empfiehlt sich die Nutzung von über GPS aufnehmbaren Daten zur automatisierten Sammlung der statistischen Daten, zumal viele Baumaschinen mit GPS-Sensoren ausgestattet sind. Diese Sensoren können beispielsweise nicht nur Tiefe und Neigung des Baggerlöffels kontrollieren (*TopCon 2002*), sondern auch Taktzeiten messen und in die Simulation einfließen lassen. Diese Entwicklung ist, laut Anbietern von GPS-Systemen (TopCon, Trimble, Leica, Lange&Siller), die im Rahmen dieser Arbeit befragt wurden, einfach zu realisieren. Für die Simulation ist dies durchaus eine interessante Möglichkeit, um den Aufwand der Datenerhebung zu reduzieren.

Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz eignet sich für andere Simulationskonzepte, wie bausteinorientierte Simulation oder Multi-Agentensimulation. Ein wichtiger Aspekt ist dabei zu beachten, und zwar können moderne Simulatoren die Daten einer XML-Datei als eine Tabelle in ein Modell integrieren und dadurch eine weitere Nutzung der Daten ermöglichen, wie der bausteinorientierte Simulator eM-Plant (heute Plant simulation) der Firma Tecnomatix (heute UGS), siehe Abschnitt 2.2.3.2. Andere Simulatoren können ein erstelltes Modell komplett in ein XML-Dokument überführen, wie der Multi-Agenten-Simulator der Universität Würzburg SeSAm (ShEll for Simulated Agent systeMs). Dieser Aspekt ist für den entwickelten Ansatz von großer Bedeutung, da gegebenenfalls eine Applikationsintegration von CAD und Simulation möglich ist, siehe Abschnitt 2.3.2.

Außerdem kann der Ansatz in anderen Aufgabenbereichen des Spezialtiefbaus oder Hochbaus angewandt werden. Insbesondere im Spezialtiefbau kommen teure Leistungsmaschinen zum Einsatz, so dass eine Analyse durch die Simulation als sehr sinnvoll erachtet werden kann. Im Bereich des Hochbaus können Montagearbeiten, Ausbauarbeiten, Schalungsarbeiten, Logistikaufgaben (*Chahrour et al. 2006 a*) auch mit Hilfe der Simulation verbes-

sert werden. Bei all diesen Aufgabenbereichen werden Planungsarbeiten anhand von CAD-Systemen bewältigt, die auch in der Ausführungsphase genutzt werden können. Die Tatsache, dass XML eine Internetsprache ist, kann dazu führen, dass die Simulation dann Web-basiert erfolgen kann, oder dass veränderte Leistungen oder Fertigstellungsgrade bestimmter Aktivitäten über mobile Systeme, wie PDA oder Pocket PC, aufgenommen und automatisch in die Simulation einbezogen werden. In dieser Hinsicht gibt es im Baubetrieb bereits andere Entwicklungen, die auch von diesen Fähigkeiten der XML-Sprache Gebrauch machen (*Chan und Leung 2004, Sunkpho et al. 2005*).

Die im Kapitel 6 beschriebene prototypische Implementierung hat durch die Anwendung eines allgemeinen CAD-Systems (AutoCAD) einige Einschränkungen und erfordert auch deshalb die Eingabe von vielen Daten. Diese Nachteile könnten bei der Anwendung eines CAD-basierten Straßenplanungssystems entfallen. Insbesondere bei Systemen, die ihr Objektmodell innerhalb des CAD-Systems integriert haben und Produktmodelldateien importieren können, wie Civil 3D, ist die Implementierung des Ansatzes dieser Arbeit vorteilhaft.

Des Weiteren kann in diesem Fall die Visualisierungskomponente der Straßenplanungssysteme, in Verbindung mit einem Animationsprogramm, zur Entwicklung einer 3D Ablaufvisualisierung herangezogen werden. Eine Ereignisliste, die aus dem Petri-Netz-System extrahiert werden kann, dient dann als Eingabedaten für das Animationssystem.

LITERATURVERZEICHNIS

- AbouRizk S., Halpin D. (1990). "Probabilistic studies for repetitive construction processes." Journal of construction Engineering and management, 116 (4), 575-94.*
- AbouRizk S.; Halpin D. (1992). "Statistical properties of construction duration data." Journal of construction Engineering and management, Vol. 118 (3), September, 525-44.*
- AbouRizk S., Halpin D., Lutz J. (1992). "State of the art in construction simulation." Proceedings of the 1992 winter simulation conference, Arlington, VA, USA, 1271-77.*
- AbouRizk S., Halpin D., Wilson J. (1992). "Visual Interactive fitting of beta distributions." Journal of construction Engineering and management, 117 (4), 589-05.*
- Akbas R. (2004). Geometry-based modelling and simulation of construction processes, Dissertation, CIEF, Stanford University, Feb. 2004.*
- Appleton B., Mohamed Y. (2002). „Special purpose simulation of tower cranes.“ Proceedings of the 2002 winter simulation conference, 1709-1715.*
- AutoCAD (2006). Entwickler Dokumentation, Online Hilfe von AutoCAD 2006.*
- Bauer, H. (1994). Baubetrieb I, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.*
- Bargstädt H. J., Blickling A. (2005). "Determination of process duration of virtual construction sites." Proceedings of the 2005 winter simulation conference, 1549-1558.*
- Björk B. (1989). „Product Models of Buildings and Their Relevance to Building Simulation." Proceedings of Building Simulation 1989, 193-198.*
- Böttcher P. (1994). Rechnergestützte Arbeitsvorbereitung in Baubetrieben, Dissertation, Kassel.*

- Castro S., Dawood N. (2004). "RoadSim: Simulation modeling and visualization in road construction." *Conference on construction application of virtual reality*, Lisbon, 33-42.
- Castro S., Dawood N. (2006). "Development and implementation of simulation modeling in road construction planning: the case of ROADSIM.", *Proceedings of the Joint international conference on computing and decision making in civil and building engineering- Building on IT*, Montreal Canada, June 2006, 1070-1081.
- Chahrour R., Utsch J. H., Franz V. (2005). „Computersimulation im Baubetrieb, Wege zur Innovation.“ *Tagungsband 18. ASIM Symposium Fortschritte in der Simulationstechnik*, SCS Publishing House e. V. Erlangen, 548-553.
- Chahrour R., Utsch J. H., Franz V. (2006 a). „A comprehensive approach to implement simulation in construction sites.“ *Proceedings of the 2nd specialty conference Leadership and Management in construction*, ASCE, Grand Bahamas Island, Bahamas. 58-66.
- Chahrour R., Franz V. (2006 b). "Seamless data model for a CAD-based simulation system." *Proceedings of the Joint international conference on computing and decision making in civil and building engineering- Building on IT*, Montreal Canada, June 2006, 3958-3967.
- Chahrour R., Franz V. (2006 c). "Integration von CAD und Simulation zur Analyse von Erdbauprozessen." *Tagungsband der 12. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik*, Universität Kassel, September 2006, 581-590.
- Chan S. L., Leung N. N. (2004). "Prototype web-based construction project management system." *Journal of construction engineering and management*, November/December, ASCE, 935-943.

-
- Chang D.Y., Carr R.I. (1986). "A resource oriented simulation system for multiple resource constrained processes." Proceeding of the PMI Seminar/symposium, Milwaukee, Wisconsin, 4-19. In Senior und Halpin (1992).*
- Dai j. (2006). Entwicklung eines JAVA-Tools zur Anpassung von Eingangsdaten der Simulation an theoretische Verteilungsfunktionen, Diplomarbeit Stufe II, Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel.*
- Davis H. (1999). Visual Basic secrets, Franzis-Verlag GmbH, Poing.*
- DIN ISO 9245 (1995). Erdbaumaschinen, Leistung der Maschinen, Begriffe, Formelzeichen und Einheiten, Beuth Verlag GmbH, Berlin.*
- DIN 66001 (1983). Sinnbilder und ihre Anwendung, Beuth Verlag GmbH, Berlin.*
- DIN 18300 Beuth Verlag GmbH, Berlin.*
- Eichenauer B. (2002 a). Benutzer Handbuch PACE Version 5.0, IBE Simulation Engineering GmbH.*
- Eichenauer B. (2002 b). Smaltalk Fibel PACE Version 5.0, IBE Simulation Engineering GmbH.*
- eM-Plant (2000). eM-Plant Reference manual, Version 4.6. Tecnomatix Technology.*
- Fente J., Knutson K., Schexnayder C. (1999). "Defining a beta distribution function for construction simulation." Proceedings of the 1999 winter simulation conference, 1010-15.*
- FGSV (1997). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. Merkblatt für DV-Schnittstellen im Straßenentwurf, Arbeitsgruppe Straßenentwurf. Köln. Ausgabe 1997.*

- FGSV (2003). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. OKSTRA-Merkblatt,. Arbeitsgruppe Sonderaufgaben, Arbeitsausschuss: Grundsatzfragen der Datenverarbeitung. Ausgabe 2003.*
- Franke M. (1998). Visual Basic 6 Data Becker GmbH & Co.Kg, Düsseldorf. 1. Auflage*
- Franz V. (1989). Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse durch Simulation mit modifizierten höheren Petri-Netzen,. Dissertation, Gh Kassel.*
- Franz V. (1997). „Steuerung und Kontrolle des Ablaufes der Ausführungsplanung durch Petri-Netze.“ Projekt Management 1, 16-27.*
- Franz V. (1999). „Simulation von Bauprozessen mit Hilfe von Petri-Netzen.“ 13. Symposium in Weimar. ASIM Fortschritte in der Simulationstechnik, Sep.*
- Franz V., Chahrour R. (2002). „Computersimulation - Warum nicht auch im Bauwesen?“ tis Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau, BertelsmannSpringer Bauverlag, Heft 10/2002, 21-26.*
- Franz V., Enkelmann M. (1998). „Simulation optimiert Pflastersteinproduktion.“. BFT Betonwerk und Fertigteil- Technik 9/98, Bauverlag, Walluf, 62-78.*
- Franz V., Schopbach H. (1998). „Optimierung von Montageabläufen im Zuge der Baustelleneinrichtungsplanung.“ BW-Bauwirtschaft, Heft 1.*
- Gehbauer F. (1974). Stochastische Einflussgrößen für Transportsimulation im Erdbau, IMB Reihe F. Heft 10. Karlsruhe.*
- Genrich H.J., Lautenbach K. (1981). „System modelling with high-level Petri nets.“ Theoretical computer science, 13. North-Holland publishing company, 109-36.*
- Girmscheid G. (2002). Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.*

- Haas W. (1993). *CAD-Datenaustausch-Knigge, STEP-2DBS für Architekten und Bauingenieure*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1993.
- Haas W., Frank A. (1997). "Räumliches Gebäudemodell und 3D-CAD Datenaustausch auf der Grundlage der ISO 10303-225." http://www.haspar.de/Ap225/StepByStep_deu.htm.
- Hajjar D., AbouRizk S.M. (1998). "A framework for applying simulation in construction." *Canadian journal of civil engineering*, Ottawa, 25 (3): 604-17.
- Hajjar D., AbouRizk S.M. (1999). "SIMPHONY: An environment for building special purpose construction simulation tools." *Proceedings of the 1999 winter simulation conference*, 998-1006.
- Hajjar D., AbouRizk S.M. (2002). "Unified modelling methodology for construction simulation". *Journal of construction engineering and management*, March/April, ASCE, 174-185.
- Halpin D. W. (1977). "CYCLONE- method for modeling job site processes." *Journal of the construction division*, September, 489-99.
- Halpin D. W. und Martinez L. H. (1999). „Real world application of construction process simulation.“ *Proceedings of the 1999 winter simulation conference*, 956-962.
- Halpin D. W., Woodhead R. W. (1998). *Construction Management*, John Wiley Sons, Inc. 2. Edition 1998.
- Hannus M., Karstila K., Tarandi V. (1994). „Requirements on standardised building product data models.“ *Proceedings of ECPPM 94, Product and process modelling in the building industry*, Dresden Germany. Oktober 1994.

- Hinzer K., Feser B. (2005). „OKSTRA-Bauabrechnung.“ 3.OKSTRA-Symposium in Münster, Mai 2005, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen. Arbeitsausschuss 9.7 „Grundsatzfragen der Datenverarbeitung“.
- Huang R. und Halpin D. W. (1995). „Graphical-based method for transient evaluation of construction operations.” *Journal of construction engineering and management*, June 1995. ASCE, 222-229.
- Hüster F.(1992). *Leistungsberechnung der Baumaschinen*, Werner-Verlag. Düsseldorf 1992.
- IAI (2006). <http://www.iai-na.org>, letzter Zugriff April 2006.
- Kaaz M. A. (1972). “Zur Formalisierung der Begriffe: System, Modell, Prozess und Struktur.” *Angewandte Informatik*, Heft 12, 537-544 1972., in Sauerbier (1999).
- Ka K., Fische M. (2002). *PM4D Final Report*, CIFE Technical Report TR143, Stanford University 2002, <http://www.stanford.edu/group/4d/download/cl.html>.
- Kamat V. R. (2003). *Extensible and scalable 3D visualization of simulated construction operations*, Dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and state university.
- Kamat V., Martinez J. (2000). “3D Visualization of Simulated Construction Operations.” *Proceedings of the 2000 Winter simulation Conference*, 1933-37.
- Kamat V., Martinez J. (2001). “Visualizing Simulated Construction Operations in 3D.” *Journal of computing in civil engineering*, Oktober 2001, ASCE, 329-37.
- Kamat V., Martinez J. (2004). “Dynamic Three-Dimensional Visualization of Fluid Construction Materials.” *Journal of computing in civil engineering*, July 2004, ASCE, 237-47.

- Kamat V., Martinez J. (2005). "Dynamic 3D Visualization of Articulated Construction Equipment." *Journal of computing in civil engineering*, Oktober 2005, ASCE, 356-68.
- Kantelberg A. (1998). „Stochastische Petri-Netze Anwendung aus dem Bereich der Baustellenlogistik am Beispiel des Vorhabens Potsdamer Platz Berlin.“ 9. *Treffen der Arbeitsgruppe: Petrinetze und Informationssysteme in der Praxis*, Kassel.
- Kiviniemi A. (2005). *Requirements management interface to building product models*, Dissertation, Stanford university.
- Kiviniemi A., Fischer M., Bazjanac V. (2005). „Multi-model Environment: Links between objects in different building models.“ *Proceedings of the 22. conference on information technology in construction*, Dresden, Germany 2005, 277-284.
- Knaupe W. (1975). *Erdbau*, Bertelsmann Fachverlag. Düsseldorf 1975.
- Komarnicki J. (1980). *Simulationstechnik*, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Koo B., Fischer M. (2000). „Feasibility of 4D CAD in commercial construction.“ *Journal of construction engineering and management*, July/August 2000, 251-60.
- Kühn G. (1984). *Der maschinelle Erdbau*, B. G. Teubner- Verlag, Stuttgart 1984.
- LandXML (2006). <http://www.landxml.org>, letzter Zugriff April 2006.
- Law A. M., Kelton D. W. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*, Industrial Engineering and Management Science, 3. ed., McGraw-Hill Inc.
- Lennerts K. (1999). „Entwicklung eines hybriden, objektorientierten Systems zur optimierten Baustelleneinrichtungsplanung (ESBE).“ *Bautechnik* 76, Heft 3, 204-215 & Heft 4, 301-10.

- Liebl F. (1995). *Simulation – Problemorientierte Einführung*. 2. Auflage, Oldenburg, München /Wien, 1995.
- Liston K. M., Fischer M., Kunz J. (1998). „4D Annotator: A Visual Decision Support Tool for Construction Planners.” *Computing in Civil Engineering, Proceedings of International Computing Congress*, Boston, October 18-21, Kelvin C.P. Wang (Ed.), ASCE, 330-41.
- Liu L.Y., Ioannou P.G (1992). “ Graphical object- oriented simulation system for construction process modeling.”, *Proceedings of the eighth conference on computing in civil engineering*, ASCE, Dallas, Texas, 1139-46.
- Märki F., Vogel M., Breit M., Fischer M. (2006). „ interactive toolbox for 4D-modeling.“ *Proceedings of the Joint international conference on computing and decision making in civil and building engineering- Building on IT*, Montreal Canada, June 2006, 1947-1956.
- Mallasi Z., Dawood N. (2002). “Registering space requirements of construction operation using site-PECASO mode”. *Proceedings of the international council for research and innovation in building and construction CIB w78 conference*, June 2002, 1-8.
- Martinez J.C. (1996). *STROBOSCOPE- State- and resource- based simulation of construction processes*, Ph.D. thesis, Civil and Environmental Engineering Dept., Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- Martinez J., Ioannoa P. (1996). “Simulation of complex construction processes.” *Proceedings of the 1996 winter simulation conference*, 1321-1328.
- Mather K., AbouRizk S. M. (2000). “Simplifying Simulation Modeling Through Integration with 3D CAD.” *Journal of Construction Engineering and Management*, Nov./Dec., 475-483.

- McCahill D.F., Bernold L.E. (1993). "Resource-oriented modeling and simulation in construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 119 (3), 590-606.
- Mohamed Y., AbouRizk S.M. (2000). "SIMPHONY: "An integrated environment for construction simulation." *Proceedings of the 2000 winter simulation conference*, 1907-14.
- Mohamed Y., AbouRizk S. M. (2005). "Framework for building intelligent simulation models of construction operations." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, July 2005, 277-291.
- Moorthy Sh. (1999). "Integrating the CAD Model with Dynamic Simulation: Simulation Date Exchange." *Proceedings of the 1999 Winter simulation Conference*, 276-80.
- Noche B., Bernhard W., Krauth J., Meyer R., Wenzel S. (1993). *Fortschritte in der Simulationstechnik*, Band 7, Herausgeber Kuhn A., Reinhardt A. und Wiendahl H. P., Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden.
- Odeh A.M., Tommelein I.D., Carr R.I. (1992). "Knowledge based simulation of construction plans." 8. *Conference on Computing in Civil Engineering*, ASCE, 1042-49.
- OKSTRA (2006). <http://www.okstra.de>, letzter Zugriff April 2006.
- ORTIM (2002). *ORTIMassistent, Verwalten von Zeitstudien unter Microsoft Windows*, Version 1.21, ORTIM Industrial Engineering Deutschland GmbH.
- Paulson Boyd C.Jr.(1987). " Interactive graphic for simulating construction operations." *Journal of the construction division*, ASCE, 104(1), 69-76. In Senior und Halpin (1992).
- Petri C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*, Schriften des Rheinisch-Westfälischen Instituts für instrumentelle Mathematik, Nr. 2. Bonn.

- Pietzsch W., Wolf G. (2000). Straßenbauplanung, Werner Verlag. Düsseldorf. 6. Auflage.*
- Prasuhn K. (2000). Vermessungstechnik und Mengenermittlung, Parey Buchverlag Berlin, 7. Auflage.*
- ProSTEP (2006). <http://www.prostep.org/de/standards/was>, letzter Zugriff April 2006.*
- Randell L. (2002). On Discrete-Event Simulation and Integration in the Manufacturing System Developement Process, PhD Thesis. Devision of Robotics. Department of Mechanical Engineering, Lud University.*
- REB (1979). Forschungsgesellschaft für das Bauwesen: Sammlung der Regelungen für die elektronische Bauabrechnung (Sammlung REB), Köln 1979.*
- Rebolj D., Tibaut A. (2002). "Evolution of road product model." International Council for Research and Innovation in Building and Construction, 1-8.*
- REFA (1984). REFA in der Praxis, Teil 2 Datenermittlung, Ztv-Verlag, Frankfurt 1984.*
- Rohr S. (2006). Optimierung der Bauproduktion durch Simulation von Prozessen, Dissertation, Institut für Geologie, Geotechnik und Baubetrieb, technische Universität München, Shaker Verlag, Aachen.*
- Rudolph D., Stürznickel T., Weissenberger L. (1993). Der DXF-Standard, Rossipaul Verlag, München. 1. Auflage.*
- Sauerbier Th. (1999). Theorie und Praxis von Simulationssystemen, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, Wiesbaden, 1999.*
- Sawhney A., AbouRizk S.M. (1996). "Computerized tool for hierarchical simulation modeling." Journal of computing in civil engineering, ASCE. April, 115-24.*

- Sawhney A., Abudayyeh O., Chaitavatputtiporn T. (1999). "Modeling and analysis of concrete production plant using Petri nets." *J. of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 178-86.
- Sawhney A., Mund A., Chaitavatputtiporn T. (2003). "Petri net-based scheduling of construction projects." *Civil engineering and environmental systems*, Volume 20, Number 4, 255-271.
- Schexnayder C., Knutson K., Fente J. (2005). "Describing a beta probability function for construction simulation". *Journal of construction engineering and management*, Feb. 2005, 221-229.
- Schmeiser B. W., Deutsch S. J. (1977). „A versatile four parameter family of probability distributions suitable for simulation." *AIIE Transactions, American Institute of industrial engineers transactions*, Vol. 9, No. 2, 176-181.
- Senior B. A., Halpin D. W. (1998). „Simplified simulation system for construction projects". *Journal of construction engineering and management*, ASCE. January/February, 72-81.
- Sharifi R., Baciu S., Zayed T. (2006). "Simulation of QA/QC impact on onshore jackets fabrication productivity". *Proceedings of the Joint international conference on computing and decision making in civil and building engineering- Building on IT*, Montreal Canada, June 2006, 2980-2990.
- Shi J. (1997). "A conceptual activity cycle-based simulation modelling method." *Proceedings of the 1997 winter simulation conference*, 1127-1133.
- Shi J., AbouRizk S.M. (1997). "Resource-based modeling for construction simulation." *Journal of construction engineering and management*, ASCE, March, 26-33.
- Sly D., Moorthy Sh. (2001). "Simulation Data Exchange (SDX) Implementation and Use" *Proceedings of the 2001 Winter simulation Conference*, 1473-77.

- Sunpko J., Garrett Jr., McNeil S. (2005). "XML-based inspection modeling for developing field inspection support systems." *Journal of construction engineering and management*, ASCE, September, 190-200.*
- Szopa A. (2006). Nachkalkulation und Ablaufoptimierung von Erdbauprozessen am Beispiel der ICE-Neubaustrecke Ebensfeld-Erfurt, Diplomarbeit Stufe I, Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel.*
- Tommelein I.D., Carr R.I., Odeh A.M., (1994). "Knowledge based simulation of construction plans." *Proceedings of the winter simulation conference*, 1145-49.*
- TopCon (2002). "GPS Baggersteuerung Tiefen- und Neigungskontrolle des Baggerlöffels mit GPS-Sensoren", facts, infos, news TopCON Deutschland GmbH, Version 001, www.hinkel-baulaser.de/downloads/gps_bagger_vol.pdf, letzter Zugriff April 2006.*
- Treeck C. van, Romberg R., Rank E. (2003). "simulation based on the product model standard IFC." *Proceedings of the eighth international IBSA conference*, Eindhoven, Netherlands, August 2003, 1293-1300.*
- VDI 3633 Blatt 1 (1992). Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, Grundlagen, VDI 3633, VDI Düsseldorf.*
- VDI 3633 Blatt 11 (2003). Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, Simulation und Visualisierung, VDI 3633, VDI Düsseldorf.*
- Wakefield R., Sears G. (1997). "Petri nets for simulation and modelling of construction systems." *J. of Constr. Engrg. and Mgmt.*, ASCE, 105-12.*
- Wassouf Z., Egger M., Treeck C. Van, Rank E. (2006). "Produktmodellbasierte Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken." *Bauingenieur*, Juni 2006, Springer-VDI Verlag.*

- Weber J.(2006). „Simulation von Logistikkonzepten auf Baustellen“. *Tagungsband der 12. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik*, Universität Kassel, September 2006, 571-580.
- Wenzel S. (1999). „Die Visualisierung als ergänzende Methode zur Simulation in Produktion und Logistik.“ *Fortschritte in der Simulationstechnik 13. Symposium in Weimar*, SCS, ASIM, 463-468.
- Wilson J.R., Vaughan D.K., Naylor E., Voss, R. G. (1982). „Analysis of space shuttle ground operation.“ *Simulation*, 38(6), 187-203.
- Xu J., AbouRizk S. M. (1999). “Product – Based Model Representation for Integrating 3D CAD with Computer Simulation.” *Proceedings of the 1999 Winter simulation Conference*, 971-77.
- Xu J. (2001). *CAD-based integrated simulation environment (CAD-ISE)*, thesis in construction engineering and management, department of civil and environmental engineering, Edmonton, Alberta Canada.
- Xu J., AbouRizk S. M., Fraser C. (2003). “Integrated three-dimentional computer-aided design and discrete-event simulation models.” *Canadian journal of civil engineering*, 30, 2/2003, 449-459.
- Zayed T. M., Halpin D. W. (2001). “Simulation of concrete batch plant production.” *Journal of construction engineering and management*, ASCE, March/April 2001, 132-141.
- Zayed T. M., Halpin D. W. (2004). “Simulation as a tool for pile productivity assessment.” *Journal of construction engineering and management*, ASCE, May/June 2004, 394-404.

Zhang H., Tam C. M., Heng L. (2005). "Activity object-oriented simulation strategy for modelling construction operations." *Journal of construction engineering and management*, ASCE, July 2005, 313-322.

Zülch G., Fischer J. (2002). "An integrated object model as a world of model components for an activity network based simulation approach." *Proceedings of the 14th European simulation symposium ESS*, October 2002, Dresden, Germany.

Zülch G., Börkircher M. (2006). "Modellierung und Simulation von Bauprozessen: Planungsunterstützung im Baubetrieb unter Berücksichtigung von Bauablaufstörungen." *Tagungsband der 12. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik*, Universität Kassel, September 2006, 561-570.

Kontakt:

Institut für Bauwirtschaft
Universität Kassel
Mönchebergstr. 7
34125 Kassel

Fachgebiete:

Bauorganisation und Bauverfahren
Baubetriebswirtschaft
Bauinformatik
Bauwirtschaft/Projektentwicklung

Prof. Franz
Prof. Racky
Prof. Stolzenberg
Prof. Busch

Sekretariate:

0561 / 804 2615
0561 / 804 2619
0561 / 804 2619
0561 / 804 3632

www.ibw-kassel.de

I - Forschung

Band 1: Schopbach, Holger (2001)

Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb
durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden

Band 2: Grau, Heidrun (2002)

Zielorientiertes Geschäftsprozessmanagement zur Förderung der Wirtschaftlichkeit von Abbundzentren

Band 3: Arnold, Daniel (2005)

Entwicklung einer Methodik für Innovationsprozesse im Wohnungsbau

Band 4: Schmitt, Roland (2005)

Die Beschaffung von Schalungsgeräten und den zugehörigen
Ingenieurleistungen nach deren Outsourcing

Band 5: Heinrich, Nils (2006)

Entwicklung von Parametern zur Risikobewertung für Projektentwicklungen auf brachgefallenen Flächen - am Beispiel freizeitlich orientierter Projekte

Band 6: Mittelstädt, Norbert (2006)

Leitlinie zur projektbezogenen Spezifikation und erfolgsabhängigen Honorarbemessung von extern beauftragten Projektmanagement-Leistungen

Band 7: Chahrour, Racha (2007)

Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau

II - Lehre

Band 1: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)

Seminar Sommersemester 2003, Hochhäuser

III - Tagungen und Berichte

Band 1: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)

Tagungsband zum Symposium 2002

Projektentwicklung brachgefallener Flächen am 13. September 2002

Band 2: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)

3. IBW-Symposium, 17. September 2004 an der Universität Kassel.

Partnerschaftliche Vertragsmodelle für Bauprojekte

Band 3: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)

4. IBW-Symposium, 15. September 2006 an der Universität Kassel.

Innovative Abwicklungsformen für Bauprojekte: Partnering und PPP