

*Integrationsaspekte der Simulation:
Technik, Organisation und Personal*
Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.)
Karlsruhe, KIT Scientific Publishing 2010

Evaluierung einer 3D-Modell-basierten Ablaufsimulation von Erdbauprozessen in der Praxis

Evaluation of 3D Model-based Discrete Event Simulation for Earthwork Processes

Johannes Wimmer, Tim Horenburg, Willibald A. Günthner
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik,
Technische Universität München, München (Germany)
wimmer@fml.mw.tum.de, horenburg@fml.mw.tum.de, günthner@fml.mw.tum.de

Yang Ji, André Borrmann, Ernst Rank
Lehrstuhl für Computation in Engineering,
Technische Universität München, München (Germany)
y.ji@bv.tum.de, borrmann@bv.tum.de, rank@bv.tum.de

Abstract: To reduce the complexity of planning processes in earthmoving an integrated solution for the discrete event simulation has been developed and evaluated on a demonstration object. The concept is based on a realistic modelling of relevant earthmoving processes on construction sites during the planning phase and serves as decision support to optimally organise the essential resources. With the help of the simulation results, an economic use of machines as well as adapted transportation routes can be planned in advance depending on the total construction site, so that the earthmoving processes are completed on time and cost.

1 Einführung

Die Planung im Erdbau stellt eine komplexe Aufgabe dar. Einerseits stehen in der Maschinenauswahl viele Alternativen zur Verfügung, zum Anderen ist es sinnvoll unterschiedliche Szenarien im Baustellenlayout (z.B. bezüglich der Transportrouten oder Zwischenlager) zu überprüfen. In der Praxis beruht dieser Planungsprozess auf der Erfahrung der Verantwortlichen, Tools zur Unterstützung von Entscheidungen werden bislang nicht eingesetzt. Speziell die Einsatzplanung von Aushub- und Transportgeräten ist von zentraler Bedeutung. Eine falsche Entscheidung kann dazu führen, dass die Arbeiten nicht fristgerecht erledigt werden und somit Projektdauer und -kosten beeinträchtigt werden.

Vorhandene Methoden zur Leistungsermittlung im Erdbau sind auf einzelne Geräte ausgelegt, die gegenseitige Einflussnahme mehrerer Tätigkeiten wird lediglich über Erfahrungswerte bzw. geschätzte Faktoren berücksichtigt. (BAUER 2003, GIRMSCHEID 2006) Im Rahmen des Forschungsverbunds ForBAU – Virtuelle Baustelle wurde daher ein Lösungsweg erarbeitet, mit dem die Planung von Erdbaustellen durch Anwendung der Simulationstechnik verbessert werden kann. Doch der Einsatz dieser Technik bisher zu aufwändig, um sie für jede Baustelle einzusetzen, da sich das Baustellenlayout und die anfallenden Arbeiten mit jeder Baustelle ändern. Daher ist vor allem auch die automatisierte Bereitstellung von Eingangsdaten für die Simulation ein wichtiger Bestandteil des Konzeptes. Hierbei wird auf die Arbeit von Charour aufgebaut, welche eine Kopplung von CAD und Simulation für den Erdbau entwickelt hat (CHAROUR 2007). Dieser Ansatz wird aufgegriffen und um Schnittstellen für projekt- und maschinenspezifische Eingangsdaten erweitert. Des Weiteren ist der constraintbasierte Simulationsansatz (KÖNIG, BEIßBERT 2008), welcher im Hochbau verfolgt wird, auch im Erdbau anwendbar, wenngleich weit weniger räumliche Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Tätigkeiten vorherrschen.

2 Lösungsarchitektur für die Erdbausimulation

Wie in Abbildung 1 dargestellt, bilden die Modellierung der Trasse und des Geländes die ersten Schritte für den Lösungsansatz. Der ForBAU Integrator wurde entwickelt, um hochwertige Simulationsquelldaten aus den modellierten Plandaten zu generieren. Die Herausforderung liegt darin, dass verschiedene spezielle Datenmodelle, die in der Planungsphase konstruiert werden, in der Regel nicht miteinander verknüpft sind. Typische Datenmodelle in der Praxis sind die 2D-Trassenplanung, das digitale Geländemodell und das geotechnische Baugrundmodell. Die Schlüsselfunktion des ForBAU Integrators ist, diese voneinander unabhängigen Modelle in ein zentrales und durchgängiges 3D-Datenmodell, dem sogenannten Mastermodell, zu integrieren. Auf Basis des zentralen 3D-Modells werden genaue Simulationsquelldaten für das Simulationswerkzeug mithilfe eines sogenannten Voxelisierungsverfahrens generiert (JI, WIMMER 2009). Die Simulationsquelldaten bestehen aus einer Menge von Voxel-elementen, jedes Voxel-element hat eine bestimmte Volumengröße, vordefinierte Geometrie-eigenschaften (Länge, Breite und Höhe), dreidimensionale Koordinaten sowie geotechnische Materialeigenschaften. Letztere beeinflussen den Erdaushub, indem unterschiedliche Bodenarten/-klassen die benötigte Zeit für Aushub und Transporte variieren. Durch eine lineare Optimierung entlang der Trasse mit dem Ziel minimaler Transportwege werden den auszuhebenden Voxel-elementen zusätzlich Zielpositionen zugeordnet.

Neben den Erdmassen werden Umgebungs- und Geländedaten aus einem CAD-System über eine eigens entwickelte Schnittstelle in das Simulationssystem übertragen. Der Fokus liegt hierbei in der Übernahme der Baugruppenstruktur aus dem CAD, so dass in der Simulation auf jedes Element bis in die tiefste Baugruppen-ebene zugegriffen werden kann. Eine weitere wichtige Datenquelle stellt die Baumaschinen-datenbank EIS dar (GÜNTNER, FRENZ 2008). Aus dieser können alle maschinenspezifischen Simulationsparameter sowie 3D-Modelle der einzelnen Geräte übernommen werden. Zudem können über eine XML-Schnittstelle

funktionale Projektpläne, welche den zeitlichen und prozessualen Baustellenablauf beschreiben, aus einem konventionellen Projektmanagementtool in die Simulation importiert werden.

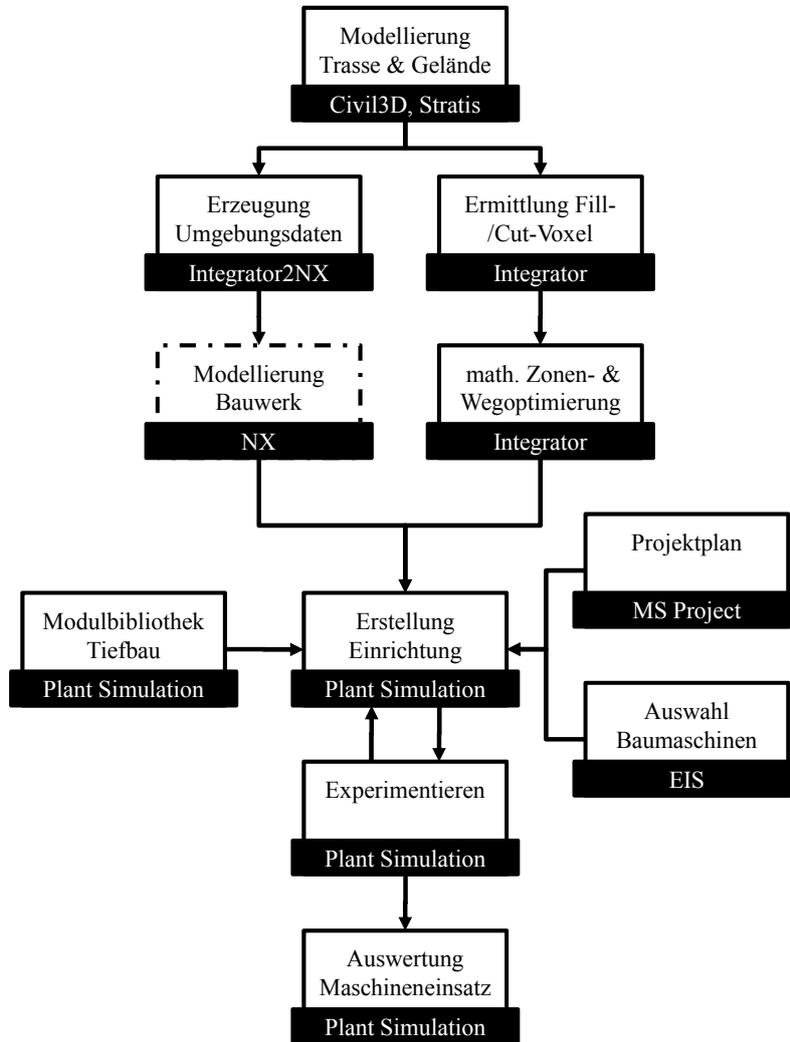


Abbildung 1: Lösungsarchitektur für die simulationsgestützte Ablaufplanung im Erdbau

Die Einrichtung der Baustellensimulation erfolgt zu definierten Zeitpunkten, sogenannten Events, die aus dem importierten Projektplan generiert werden. Die Simulation wird hierzu in zwei Phasen geteilt, die Modellierungs-/ Einrichtungsphase und die Simulationsphase. Während ersterer wird das Simulationsmodell erstellt und ein Simulationslauf entlang des importierten Projektplans durchgeführt. Zu jedem Vorgangsbeginn und -ende (Event) aus dem Balkenplan wird die Simulation angehalten, so dass Bausteine aus der Modulbibliothek (z.B. Transportwege und

Deponien) im Gesamtlayout platziert, angepasst oder gelöscht werden können. So kann die Baustelle planbasiert und für jede Erdbauphase in Abhängigkeit äußerer Randbedingungen eingerichtet werden. Parallel wird ein 3D-Modell der Baustelle herangezogen, um räumliche Kollisionen der Einrichtungsgegenstände im Layout aufzuzeigen.

Anschließend müssen die für einen oder mehrere Simulationsläufe vorhandenen Ressourcen (Personal, Geräte, Material) definiert werden. In der Auftragsverwaltung werden für jeden Vorgang im Projektplan, der detailliert betrachtet werden soll, Aufträge generiert, welche den zu verwendenden Prozessbaustein, die jeweiligen Ressourcen(typen) sowie spezifische Prozessparameter beinhalten. Wie bereits oben beschrieben werden die groben, ressourcenunabhängigen Aufträge für den Erdmassentransport vom Integrator übergeben. Diese werden innerhalb der Simulation in Arbeitsaufträge mit Ressourcenzuweisung umgewandelt und ebenfalls mit dem Projektplan in einen gemeinsamen Kontext gebracht. Des Weiteren besteht die Möglichkeit in globalen Verwaltungsbausteinen allen Ressourcentypen verschiedene Strategien zuzuweisen, um Einfluss auf die Reihenfolge der Tätigkeiten zu nehmen, indem diese auf Basis von Bewertungsfunktionen mit Prioritäten versehen werden.

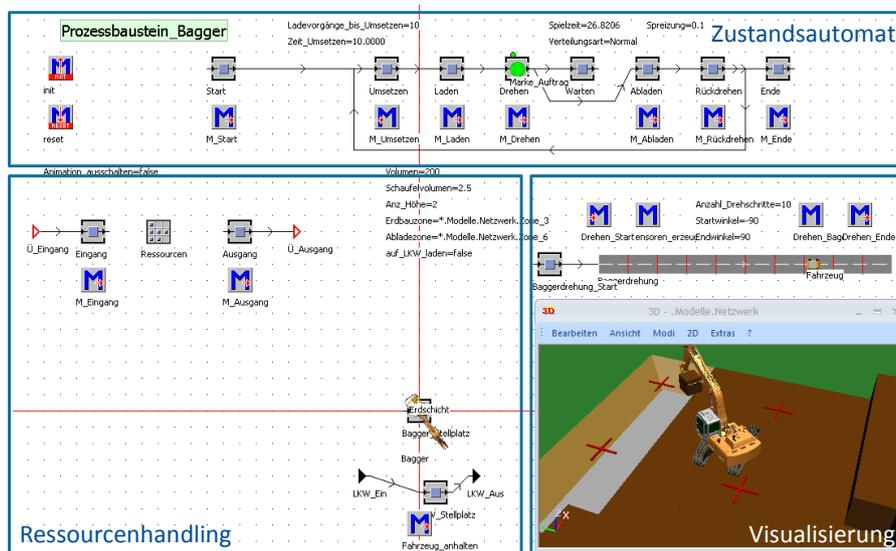


Abbildung 2: Beispiel Prozessbaustein mit 3D-Visualisierung

Die kombinierbaren Bausteine der tiefbauspezifischen Bibliothek sind nach dem Prinzip deterministischer Automaten entwickelt worden, wobei einzelnen Prozessschritten stochastische Verteilungen zugewiesen werden können, um eine realistische Abbildung der Realität zu gewährleisten. So sind beispielsweise Häufigkeitsverteilungen für Spielzeiten oder Ausfallzeiten und der entsprechenden mittleren Reparaturzeit hinterlegt. Diese schwanken auch in Abhängigkeit der übergebenen Bodenparameter aus dem Integrator. In Abbildung 2 ist beispielhaft der Prozessbaustein eines Baggers dargestellt. Neben dem Ablaufautomaten sind zusätzlich Funktionalitäten für das Ressourcenhandling und die Visualisierung implementiert. Da die Transporte einen entscheidenden Einfluss auf die Erdbauleistung haben, wird

zur Berechnung der Transportgeschwindigkeiten eine Kinematiksimulation verwendet. Diese ermittelt die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps, der Zuladung sowie des zurückzulegenden Streckenprofils.

In der Simulationsphase erfolgt durch eine genügend große Anzahl an Experimenten und der entsprechenden Auswertung eine Optimierung des Ressourceneinsatzes. Als Variationsparameter werden hier unterschiedliche Maschinenkombinationen, sowie Baustelleneinrichtungsvarianten verwendet. Dadurch wird es möglich mehrere Varianten von Transportwegführungen bei unterschiedlichem Ressourceneinsatz zu vergleichen. Untersucht werden kann beispielsweise, ob die Errichtung einer Baustraße wirtschaftlich ist, und welche Transportgeräte für das Szenario mit oder ohne Baustraße geeignet sind.

Zielparаметer ist neben der Einhaltung des Fertigstellungstermins auch die Reduzierung der gesamten Produktionskosten, welche sich aus dem jeweiligen Ressourceneinsatz ermitteln lassen. Zusätzlich steht zur Veranschaulichung der Prozesse eine parallele 4D-Visualisierung zur Verfügung, die räumliche und prozessbedingte Kollisionen aufzeigt. Vorteil ist hierbei, dass die detaillierten Planungen anschaulich mit allen Beteiligten geteilt und diskutiert werden können, so dass Probleme frühzeitig erkannt werden.

Das vorgestellte Konzept für die Ablaufsimulation im Erdbau wurde zum größten Teil mit kommerziell verfügbarer Software umgesetzt. Der Fokus lag auf der Erstellung der Schnittstellen zwischen den Programmen und der baustellenspezifischen Simulationsbausteine. Für die Trassenmodellierung wurde Autodesk Civil3D, für die Bauwerksmodellierung und den Umgebungsdatenimport Siemens NX verwendet. Projektdaten wurden über XML aus MS Project importiert. Die Baumaschinendatenbank EIS liefert maschinenspezifische Daten, welche über eine direkte Datenbankabfrage importiert werden können. Für die Erstellung der Bausteinbibliothek und die Durchführung der Simulationsexperimente wird Plant Simulation von Siemens verwendet.

3 Evaluierung an Demobaustelle

Der vorgestellte Lösungsansatz wurde an einer realen Baustelle in die Praxis getestet. Bei dieser handelt es sich um ein 14km langes Teilstück eines Trassenneubaus mit insgesamt 33 Einschnitten bzw. Dammschüttungen. Dabei kann kein vollständiger Massenausgleich erfolgen, so dass überflüssiges Material auf Deponien gefahren werden muss. Aufgrund von drei zu erstellenden Brückenbauwerken gestaltet sich die Einrichtung der Baustelle mit Transportwegen und Deponien kompliziert, so dass unterschiedliche Szenarien in der Simulation abgebildet und untersucht werden können.

Als Eingangsdaten für die Simulation dienen die Ausschreibungspläne des Bauherrn. In diesen sind ein 3D-Modell des Urgeländes, die Bodenuntersuchungen, der Verlauf der Trasse sowie ein Terminplan für die Fertigstellung gegeben. Aus der Verschneidung im Integrator erhält man dann die verschiedenen aufzutragenden und abzutragenden Erdmassen. Jeder einzelne Einschnitt und Dammbereich wird zur genaueren Berechnung der Transportwege in mehrere Untergruppen unterteilt, welche wiederum die einzelnen Erdvoxel enthalten. In Abbildung 3 sind die

voxelisierten Erdmassen eines Einschnitts und Damms zusammen mit dem Ureländemodell und dem zugehörigen 2D-Plan in der Simulationsumgebung dargestellt. Ein Problem im ausgewählten Beispiel stellt die große Anzahl an Voxeln dar, die für eine ausreichend exakte Massenbestimmung benötigt wird. Durch eine Halbierung der Kantenlängen verachtfacht sich die Zahl der Erdkörper, so dass immer ein Kompromiss zwischen der Dauer eines Simulationslaufes beziehungsweise einer ausreichend genauen Massenermittlung und Visualisierung gefunden werden muss. Dieses Problem wird in dem gewählten Ansatz umgangen, indem eine Massenermittlung mit relativ kleinen Voxeln durchgeführt wird, diese aber für die Simulation in größere Voxel zusammengefasst werden. Diese werden anschließend mit dem Volumen aus den kleinen Voxel angereichert, um die ursprüngliche Genauigkeit zu bewahren.

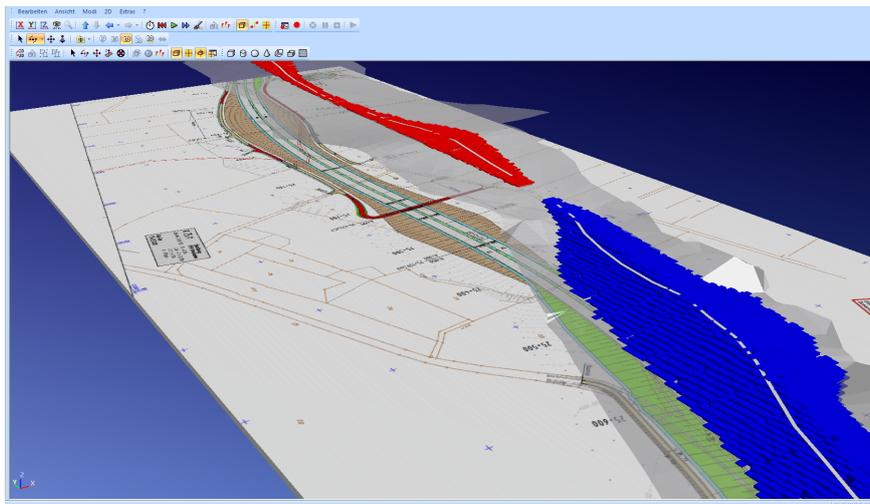


Abbildung 3: Screenshot 3D-Visualisierung der Erdbauzonen

Nach der Massenermittlung wurde für die untersuchte Demobaustelle im Integrator eine lineare Optimierung der Erdbewegungen durchgeführt, um eine niedrige mittlere Transportdistanz zwischen Ausbau- und Einbaubereiche zu erhalten. Die ermittelten Transporte werden an die Simulation übergeben, und dienen als Grundlage für die ablaufenden Tätigkeiten auf der Erdbaustelle.

Neben den Informationen von Bauherrenseite werden für eine detaillierte Simulation auch die ablaufrelevanten Informationen von Seiten des ausführenden Bauunternehmens benötigt. Wichtige Bestandteile sind hierbei die zur Verfügung stehenden Geräte, mit denen auf der Baustelle gearbeitet werden soll, sowie ein Projektplan, der den zeitlichen und prozessualen Zusammenhang der relevanten Abläufe des Bauprojekts beschreibt. Neben der Einsatzplanung der Maschinen werden vom ausführenden Bauunternehmen auch die zu erstellenden Baustraßen und sonstigen Baustelleneinrichtungselemente festgelegt.

Die Wege an der untersuchten Baustelle verlaufen meist auf dem verdichteten Bau- feld der späteren Trasse. Durch die anstehenden bindigen Böden ist die Fahrstrecke sehr witterungsempfindlich, so dass die Fahrzeiten der verwendeten Transportgeräte

stark schwanken und teilweise die Arbeiten eingestellt werden müssen. Das Verhalten der Fahrzeuge auf den unterschiedlichen Bodenverhältnissen kann mit der implementierten Kinematiksimulation nachgebildet werden, so dass dem Modell sehr realistische Transportgeschwindigkeiten zu Grunde liegen, die sich so nicht in der rein mathematischen linearen Optimierung der Transporte abbilden lassen. Dadurch kann die Ablaufsimulation die Aufteilung der Transporte evaluieren.

Der Erdbau an der untersuchten Baustelle wird mit fünf Erdbaubetrieben an verschiedenen Einschnitten betrieben. Zu einem Erdbaubetrieb gehören ein Ladegerät (Bagger), eine der Fahrstrecke entsprechende Anzahl an Transportfahrzeuge (z.B. Dumper), ein Einbaugerät (Raupe) und mehrere Walzen zur Verdichtung. Die jeweiligen Arbeitsabläufe der verwendeten Geräte sind in der Modulbibliothek als Prozessbausteine vorhanden so dass der grobe Erdbau abgebildet werden kann. Nicht im Detail betrachtet werden Nebenarbeiten, wie z.B. das Anlegen von Böschungen oder das Legen von Kanälen, welche jedoch als Zeitverbrauch mit stochastischer Verteilung berücksichtigt werden können.

In Abbildung 4 dargestellt ist die Auswertung mehrerer Maschineneinsatzszenarien eines Erdbaubetriebs an einem Teilstück der untersuchten Baustelle. Variiert wurde hier die Anzahl der Transportfahrzeuge, welche das Erdreich vom Ladegerät zur Einbaustelle transportieren. Bei wenigen Fahrzeugen ist die Transportleistung entscheidend, die Gesamtdauer sinkt mit jedem zusätzlichen Fahrzeug. Ab vier Fahrzeugen ist die Ladeleistung entscheidend, so dass weitere Fahrzeuge keinen Einfluss auf die Gesamtdauer der Maßnahme haben und die Gesamtkosten linear mit der Fahrzeuganzahl steigen.

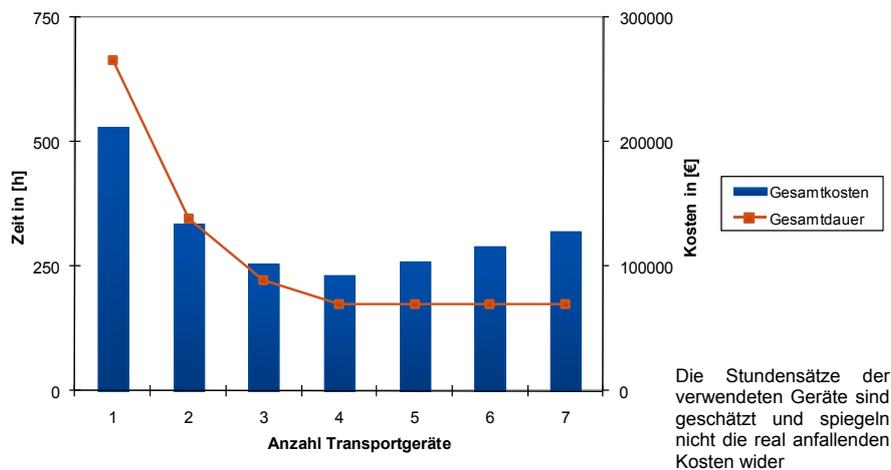


Abbildung 4: Auswertung verschiedener Maschineneinsatzszenarien

4 Zusammenfassung

Um die Komplexität von Planungsprozessen im Erdbau zu reduzieren, wurde im Forschungsverbund ForBAU ein durchgängiges Lösungskonzept entwickelt und an

einem Demonstrationsobjekt evaluiert. Das Konzept basiert auf einer realitätsnahen Modellierung der erdbaurelevanten Prozesse auf Baustellen während der Planungsphase und dient den Verantwortlichen als Entscheidungshilfe, um die wesentlichen Ressourcen möglichst optimal einzuteilen. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse können ein wirtschaftlicher Maschineneinsatz sowie entsprechende Transportrouten in Abhängigkeit der Gesamtbaustelle im Voraus geplant werden, so dass der Erdbau kostengünstig und termingerecht abgeschlossen werden kann.

5 Acknowledgements

Die Ergebnisse dieser Veröffentlichung wurden durch die Förderung der Bayerischen Forschungstiftung im Rahmen des Bayerischen Forschungsverbundes ForBAU ermöglicht.

Literatur

- BAUER, Hermann: Baubetrieb. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- CHAROUR, Racha: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Kassel: University of Kassel, 2007.
- GIRMSCHIED, Gerhard: Leistungsermittlung für Baumaschinen und Bauprozesse. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- GÜNTNER, Willibald, FRENZ, Thorsten u.a.: Einsatz einer Baumaschinendatenbank (EIS) bei der Bayerischen BauAkademie. In: Tiefbau, München, (2008)12, S.736-738.
- JI, Yang, WIMMER, Johannes u.a.: An Integrated 3D Simulation Framework for Earthwork Processes. In: Proc. of the 26th CIB-W78 Conference on Managing IT in Construction. Istanbul: 2009, S. 29-36.
- KÖNIG, Markus und BEIBERT, Ulrike: Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen. In: Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)haus-Bau. Hrsg.: BARGSTÄDT, H.-J. Weimar: Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren, 2008, S.17-36.