

Ein Konzept zur Kopplung makroskopischer Optimierung mit mikroskopischer Simulation von Erdbauprozessen²

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein Konzept zur Kopplung makroskopischer Optimierung mit mikroskopischer Simulation vorgestellt. Das Ziel dieses Konzepts ist, die Dauer der Erdbauarbeit, insbesondere die Transportzeit der Erdmassen zu minimieren. In der makroskopischen Optimierung wird die Erdbauarbeit als bipartiten Graph modelliert, wobei die Auftrags- und Abtragbereiche als Knoten und die Transportwege als Kanten, dargestellt sind. Auf dieser Basis wird die kostenminimale Erdbewegung zwischen Einschnitten und Dämmen mit Hilfe der Linearen Programmierung (LP) exakt bestimmt, jedoch ohne Betrachtung der Prozessinformation und des Ressourceneinsatzes. Die Modellierung prozessrelevanter Information, z. B. das kinematische Verhalten der Baumaschinen, erfolgt in einem kommerziellen Ereignis-basierten Simulationssystem. Mit einer ereignisgesteuerten Ablaufsimulation kann die Dauer der Erdbauarbeit, insbesondere die Erdtransporte, ermittelt werden. Die so bestimmten Transportdauern werden anschließend als neue Eingangsparameter für die Optimierung verwendet. Dieser Vorgang wird iterativ wiederholt bis sich stabile Werte einstellen.

Der Vorteil einer solchen bidirektionalen Kopplung besteht darin, dass prozessrelevante Informationen in die mathematische Optimierung einbezogen werden. Das Verfahren wurde auf vereinfachte Daten einer realen Demobaustelle angewendet. Dabei konnten positive Erfahrungen mit dem bidirektionalen Kopplungsansatz gesammelt werden.

1 Einführung

Die Simulation von Bauprozessen wurde in verschiedenen Bereichen des Bauwesens intensiv untersucht, zum Beispiel für den Innenausbau [1], den Trockenbau [6], den Erdbau [3] und den Brückenbau [7]. Der Nutzen des Einsatzes von Simulationsverfahren besteht darin, dass der Ausnutzungsgrad der eingesetzten Ressourcen durch detaillierte Abbildung der Prozessaktivitäten und ihrer Abhängigkeiten analysiert werden können. Probleme im Bauablauf wie Unter- und Überkapazitäten sowie Leerläufe im Prozess können so frühzeitig erkannt werden. Daneben können verschiedene Einsatzvarianten der Bauausführung durchgespielt und miteinander verglichen werden.

In dieser Arbeit wird die Ablaufsimulation für Erdbauprozesse untersucht. Um die Besonderheit von Erdbauprozessen zu verdeutlichen, werden in Bild 1 die Unterschiede zwischen Erdbau und Hochbau anhand verschiedener Kategorien dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass bei der für die Ablaufsimulation notwendigen Mengenermittlung nicht nur das geplante Bauwerk, sondern auch der vorliegende Baugrund zu berücksichtigen ist. Ein weiterer Unterschied liegt im Bereich der Bauprozesse: Während der Bauablauf auf Erdbauarbeiten eher maschinenintensiv und transportlastig ist, dominieren die komplexen Prozessabhängigkeiten im Hochbau.

¹ E-Mailadresse der Autoren: {y.ji | borrmann}@bv.tum.de

² Das vorgestellte Projekt wird von der Bayerischen Forschungsförderung im Rahmen des Forschungsverbunds „ForBAU – Virtuelle Baustelle“ gefördert.



	Bauwerk	Baustoff	Baustellen	Bauprozesse
Erdbau	Böschung und Planum des Damms bzw. des Einschnitts, Baugrube	Natürliche Bodenmaterialien, - Geometrische Struktur - Bodenkennwerte nicht vollständig vorhersehbar	Deponie / Zwischenlager Erdtransport (Baustraße, Feldweg) Hindernisse (Wälder, Brücken, Flüsse) Witterung	Einfache Operationen: Lösen, Laden Transportieren Verteilen, Verdichten Maschinen-intensiv Komplexe Kinematik
Hochbau	Geometrie beliebig komplex	vorhersehbar	Baulogistik (Fertigteil Lieferung) Baustelleneinrichtung (Kran, Lagerung, etc.,)	Komplexe Abhängigkeiten Arbeiter-intensiv

Bild 1 Vergleich Erdbau mit Hochbau

Die wesentliche Aufgabe bei Erdbauarbeiten besteht darin, Erdstoffe an einem Ort, z. B. einem Einschnitt, zu lösen, zu einem anderen Ort, in der Regel einem Damm, zu transportieren und dort einzubauen. Für die Ablaufsimulation ist es erforderlich, die Arbeitszeit der Erdbaugeräte wie die Spielzeit der Bagger, Durchschnittsgeschwindigkeit der Dumper nicht nur anhand der Leistungsdaten sondern auch durch Messungen vor Ort auf der Baustelle empirisch zu bestimmen. Ferner sollen die kinematischen Prozesse der Erdbaugeräte detailliert modelliert werden, sowie die für den Erdtransport relevante Rahmenbedingungen wie Fahrwege, Hindernisse, Verkehrseinschränkungen im Simulationsmodell abzubilden.

Um die Effizienz der Ausführung von Erdarbeiten zu erhöhen, soll in unserem Ansatz die Wahl der Transportwege optimiert werden. In der heutigen Praxis fallen erdbaubetriebliche Entscheidungen meistens auf Basis der Projekterfahrung des zuständigen Bauleiters. Es soll ein IT-gestütztes System geben, das dem Bauleiter vor und während der Bauausführung unterstützt, die kompletten Erdbauprozesse, den zeitlichen Bauablauf besser zu kontrollieren.

2 Ablaufsimulation von Erdbauprozessen

Im Forschungsverbund ForBAU – Virtuelle Baustelle [2] wurde im Rahmen der Teilprojekte „Bau-IT“ und „Bau-SIM“ ein 3D-Modell-basiertes Simulationsframework für Erdbauprojekte entwickelt. Dieses Framework bietet die folgenden Features:

1. Bereitstellung dreidimensionaler Simulationsquelldaten [5],
2. Modellierung von Optimierungsproblemen in Erdbauprozessen [4],
3. Verwendung einer erdbauspezifischer Simulationsbibliothek [8].

Der Aufbau und die wesentlichen Komponenten dieses Frameworks sind in Bild 2 dargestellt. Das *ForBAU Integrator* erstellt aus den verschiedenen Teilmodellen, u. a. dem 3D-Baugrundmodell, dem 3D-Geländemodell und dem Trassenmodell, die in verschiedenen Fachdomänen der Infrastrukturplanung entstanden sind, ein integriertes 3D-Modell. Auf Basis dieses Modells wird eine Voxelisierung durchgeführt, die es erlaubt, Aushubmassen und Einbauvolumen exakter als mittels klassischer Verfahren zu bestimmen. Jedes der dabei entstehenden Voxel-Elemente enthält mehrere Parameter, wie die 3D-Position, Bodenparameter sowie die Größe (Breite, Länge und Höhe). Die Voxel können auch strukturiert bzw. gruppiert werden, um sie an verschiedene Schaufel-Größen der Bagger anzupassen.

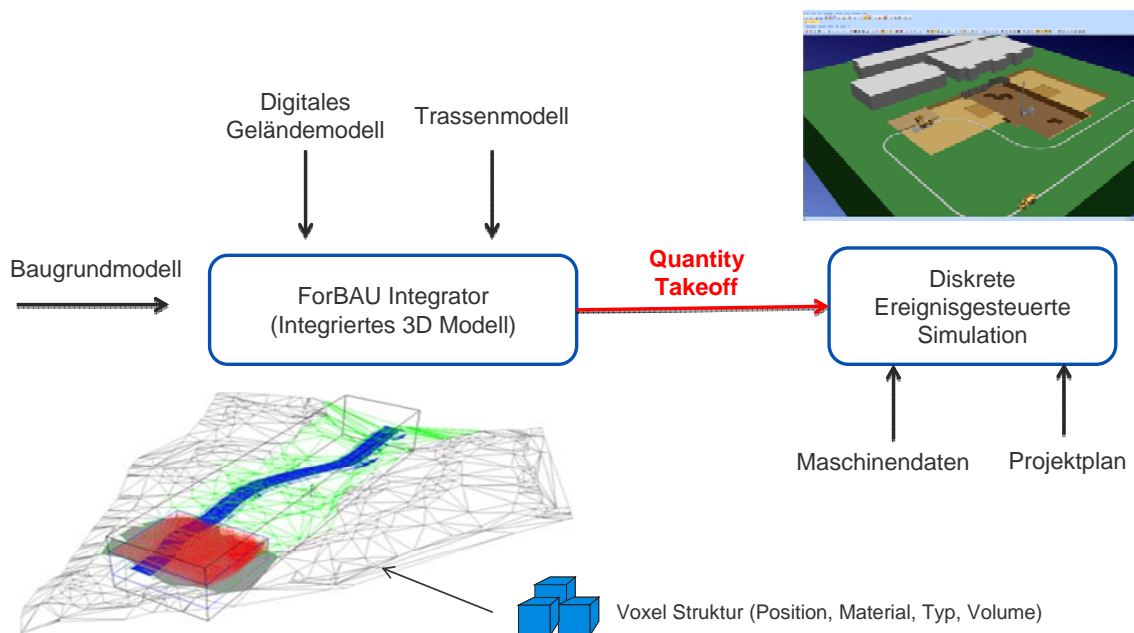


Bild 2 Konzeptübersicht des ForBAU Simulationsframeworks

Für die Planung der Erdtransportwege und Baustelleneinrichtungsobjekte, wie Zwischenlager und Deponien, stellt der *ForBAU Integrator* eine graphische Oberfläche zur Verfügung. Dabei wird eine Katasterkarte hinterlegt, die es erlaubt, die Transportplanung auf intuitive Weise durchzuführen. Die Voxeldaten und die Baustelleneinrichtungsinformation werden über eine XML-Schnittstelle in das Simulationssystem importiert.

Quantitäten der Erdbewegung -Position -Volumen -Bodenkennwerte und der Erdbaumaschinen -Anzahl der Baggers / LKWs / Raupen	Kennwerte der Baumaschinen -Geschwindigkeit, -Größe des Bagger-Löffels -Größe der Mulde eines Dumpers / LKWs -Verdichtungsleistung -Spielzeit -Umlaufzeit
Projektplan (Terminierung) - zeitliche Zusammenhänge Prozessbeschreibung - von wo nach wo wie viele Erdstoffe	Baustelleneinrichtung / Umgebungsdaten -Zwischenlager, Deponie -Baustraßen -Hindernisse (Brücke, Flüsse, usw.)

Bild 3 Klassifizierung Simulationsquelldaten

Das ForBAU Simulationsframework enthält eine kommerzielle, bausteinorientierte Simulationsumgebung. Auf Basis dieser Umgebung wurde im Rahmen des ForBAU-Projekts eine bauspezifische Simulationsbibliothek erstellt [9]. Zusätzliche Information, wie Projektplan und Maschinenkennwerte, werden von externen Datenquellen in das Simulationssystem importiert. In Bild 3 ist eine Klassifizierung der Simulationsquelldaten dargestellt. Der prinzipielle Aufbau eines Simulationsmodells wird in Bild 4 verdeutlicht. Die grundlegenden Komponenten, auch Bausteine genannt, bestehen aus Modulen,



Verbindungselementen, Ressourcen und Aktivitäten. Die zwei Basismodule im Erdbausimulationsmodell sind „Erdabtrag“ und „Erdauftrag“, verknüpft durch ein Verbindungselement, z. B. eine Baustraße. Sowohl das Basismodul als auch das Verbindungselement können Aktivitäten und Ressourcen enthalten.

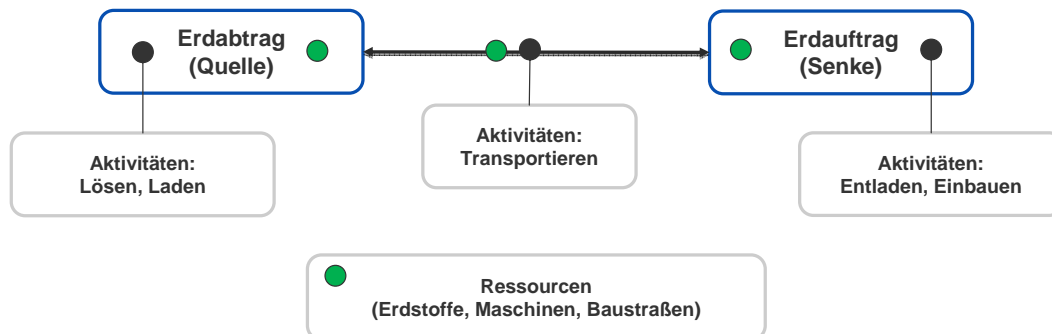


Bild 4 Prinzip ereignisgesteuerter Ablaufsimulation von Erdbauprozessen

Wie in Bild 4 zu sehen ist, gehören die Aktivitäten Lösen und Laden zum Modul „Erdabtrag“ und die Aktivitäten Entladen und Einbauen zum Modul „Erdauftrag“. Die Aktivität Transportieren bildet das Verbindungselement. Die Ressourcen werden im Simulationssystem in verschiedenen Kategorien verwaltet:

- Quantitäten, z. B. Volumen der Erdbewegung, Anzahl der LKWs, Kapazität der Lagerplätze und Fahrwege,
- Baustelleneinrichtungsobjekte, z. B. Zwischenlager und Deponie,
- Erdbaugeräte, z. B. Bagger, LKW, Dumper, Raupe und Walzer,
- Betriebsplanungsdaten, z. B. Zeitplan, Transportstrategie.

Mit Hilfe des ForBAU-Simulationsframeworks ist es möglich, die Abläufe auf Erdbaustellen frühzeitig und detailliert zu analysieren und verschiedene Varianten des Ressourceneinsatzes zu untersuchen. Die Simulationsergebnisse geben dem Erdbauplaner Auskunft darüber, wie viel Zeit der Erdtransport bei einem gegebenen Ressourceneinsatz in Anspruch nehmen wird [8].

3 Optimierung der Erdbewegung

Eine weitere Funktionalität des ForBAU-Simulationsframeworks ist die optimale Festlegung der Transportwege auf Basis des zentralen 3D-Modells, d. h. die Zuordnung von Einschnitts- zu Dammbereichen (Bild 5 oben). Diese Information ist eine wichtige Ausgangsinformation für die Simulation von Erdbauprozessen. Ziel ist, Erdmaterial, das im Einschnittsbereich ausgebaut wird, in möglichst großem Umfang für den Einbau in Dammbereichen zu verwenden, um Zusatzkosten für den Einkauf fremder Erdmaterialien bzw. das Zwischenlagern bzw. Deponieren überflüssiger Erdstoffe zu minimieren. Die Zuordnung von Einschnitts- zu Dammbereichen sollte dabei so erfolgen, dass die zurückzulegenden Wege für die Transportmittel minimal sind. Aus dieser Aufgabenstellung ergibt sich ein klassisches Optimierungsproblem, das mit Hilfe eines gewichteten bipartiten Graphen beschrieben und mittels linearer Optimierungstechnik gelöst werden kann (Bild 5 links unten).

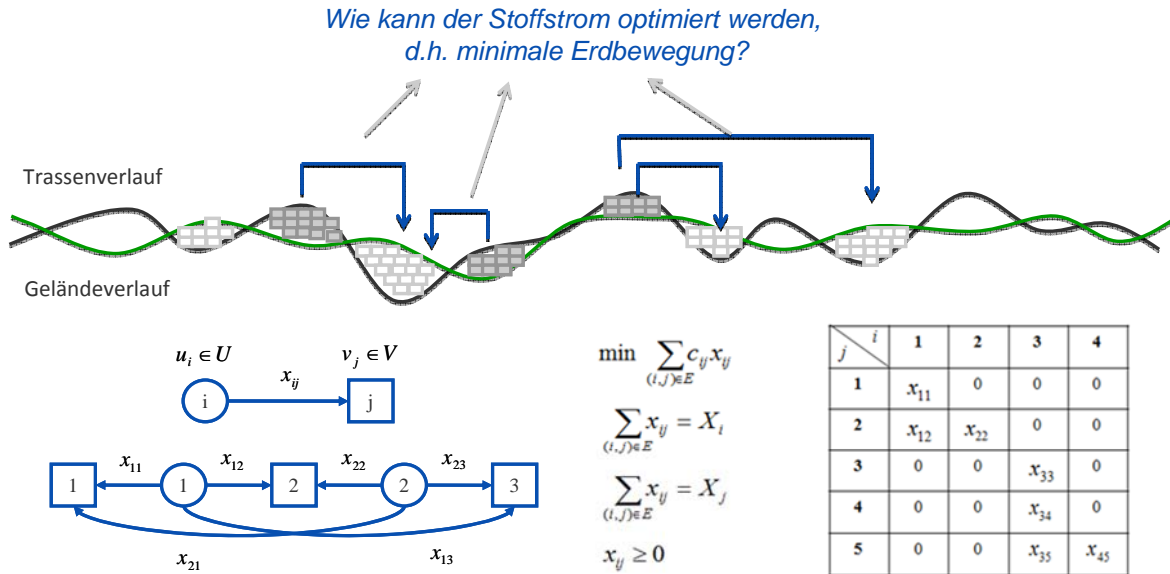
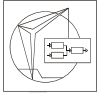


Bild 5 Mathematische Optimierung der gesamten Erdbewegung

Die Information zu Einschnitts- bzw. Dammbereichen, vor allem die Volumina, die Positionen und die Materialeigenschaften wurden bereits vom *ForBAU Integrator* mit Hilfe des Voxelisierungsalgorithmus bestimmt. Die Position und die Größe sowie die Anzahl der Zwischenlager und Deponien werden vom Benutzer festgelegt. Aus Sicht der graphentheoretischen Modellierung unterscheiden sich Deponie und Dammbereich nicht, weil beide Elemente nur Materialfluss aufnehmen können, analog gilt das auch für Zwischenlager und Einschnittsbereich. Dabei ist zu beachten, dass der Begriff des Zwischenlagers hier nur im Sinne der Zwischenlagerung eingekaufter Erdstoffe zu verstehen ist.

Das als lineares Programm (LP) formulierte Optimierungsproblem lässt sich mit dem LP Solver GLPK [10] mit Rechenleistung eines Standard-PCs in einer akzeptablen Zeit exakt lösen. Die Lösung ist eine Matrix, deren Einträge die Volumina der zu transportierenden Erdstoffe zwischen jeweiligen Damm und Einschnitt sind (Bild 5 rechts unten).

4 Bidirektionales Kopplungskonzept

Eine bidirektionale Kopplung der Ablaufsimulation von Erdbauprozessen mit der Optimierung der Erdbewegung ist eine konzeptionelle Erweiterung des ForBAU Simulationsframeworks (Bild 6).

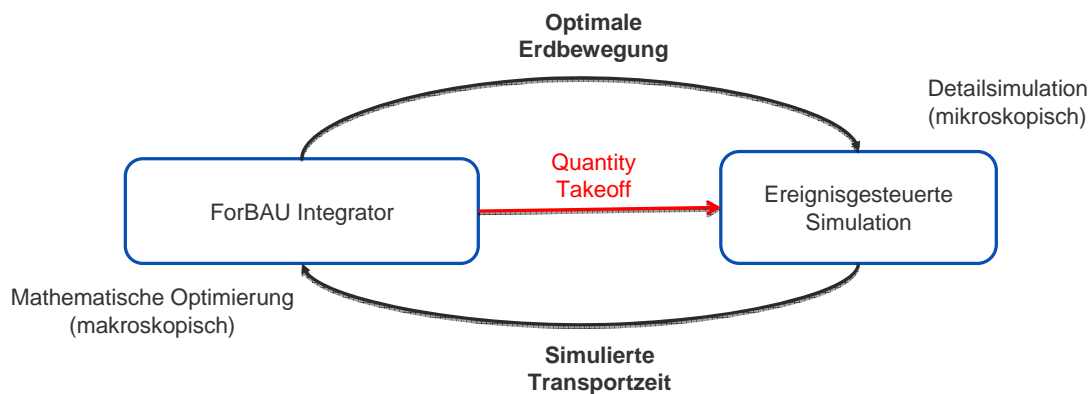


Bild 6 Bidirektionales Kopplungskonzept



Die ermittelten Mengen und die optimierten Transportwege werden über eine directionale Verbindung vom *ForBAU Integrator* in das Simulationssystem übergeben. Nach Ablauf der Simulation wird die ermittelte Transportzeit durch eine Rückkopplung wieder in den *ForBAU Integrator* eingespeist. Dieser führt eine erneute Optimierung der Transportwege durch, allerdings unter Berücksichtigung der neuen Transportzeiten als Kantengewichte. Der Vorteil einer bidirektionalen Kopplung besteht darin, dass die Dauer des Erdtransports iterativ optimiert wird. Wie es in Bild 7 veranschaulicht wird, werden im ersten Schritt die optimalen Transportwege für die Erdbewegung („von wo nach wo, wie viele Erdstoffe“) anhand der initialen Transportdauer $t^0_{i,j}$, die durch Division der Entfernung zwischen Damm i und Einschnitt j mit der Durchschnittsgeschwindigkeit der Transporter ermittelt wird, festgelegt. Die resultierte Transportmatrix $x^0_{i,j}$ wird in die Simulationsumgebung importiert. Im nächsten Schritt ergibt sich aus der Ablaufsimulation die entsprechende Transportdauer-Matrix („von wo nach wo in wie viel Zeit“) $t^1_{i,j}$, zwischen entsprechenden Einschnitt- und Dammbereichen, die wiederum als Eingangsparameter für die Optimierung der Erdbewegung importiert wird. Nun ist die erste Iteration zwischen Simulation und Optimierung abgeschlossen. Weitere Iterationen erfolgen automatisch durch die bidirektionale Kopplung solange, bis die Transportdauer $t^n_{i,j}$ konvergiert oder die vordefinierte Anzahl der Iterationsschritte erreicht wird. In Bild 7 werden die zwei Kopplungsparameter in Matrixform dargestellt – auf der rechten Seite die optimale Erdbewegung aus der Optimierung, auf der anderen Seite die entsprechende Transportdauer aus der Simulation.

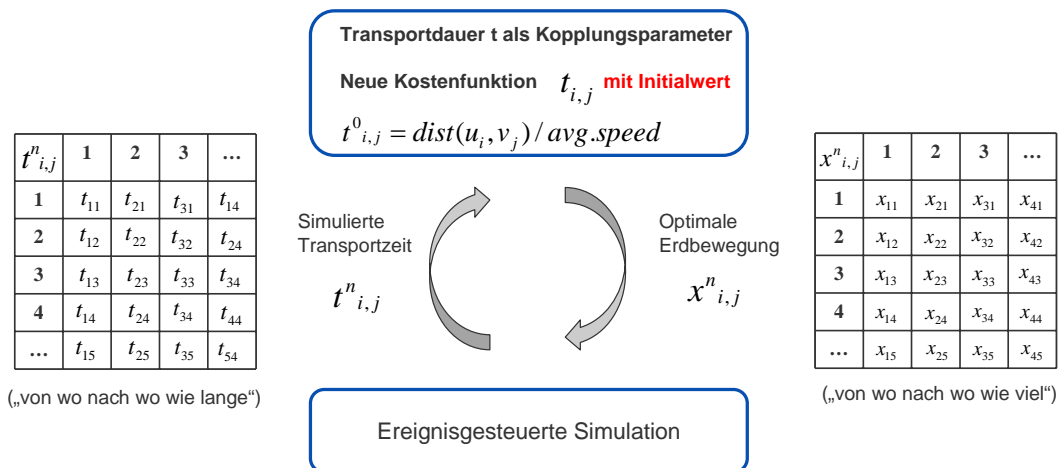


Bild 7 Spezifikation des Kopplungskonzepts

5 Testversuch und erste Ergebnisse

Das vorgestellte Kopplungskonzept wurde bereits als Softwareprototyp implementiert. Für den Testzweck wurden verschiedene Planungsdaten von einer Demo-Straßenbaustelle erhoben. Das zentrale 3D-Modell wird im *ForBAU Integrator* erstellt. In Bild 8 sind die gesamte Transportdauer und die wichtigen Konfigurationsparameter dargestellt.

Dabei ist zu beachten, dass das Simulationsergebnis in diesem Testversuch nur eine Tendenz des Transportzeitverlaufs nach mehreren Iterationen zeigen kann. Der Ressourceneinsatz sowie die Rahmenbedingungen für den Erdbaubetrieb wurden stark vereinfacht, d. h. z. B. keine Störfaktoren, wie Wettereinfluss, Reparatur und Wartung der Maschinen, Pausen, Verkehrsbedingung, usw. berücksichtigt. Auf Grund dieser Vereinfachung konvergiert die Transportzeit nach nur vier Schritten. Das zeigt einerseits, dass das bidirektionale Kopplungskonzept prinzipiell funktioniert, andererseits, dass weitere Untersuchungen mit verschiedenen Konfigurationsparametern durchgeführt werden müssen.

Länge der Strecke: 12 km
 Anzahl der Einschnitte: 16
 Anzahl der Dämme: 17
 Zwei Bauabschnitte (parallele Bearbeitung):
 Einschnitt 8 bis Damm 9
 Einschnitt 8 bis Einschnitt 16
 Anzahl der LKWs pro Abschnitt: 5
 Anzahl der Bagger pro Abschnitt: 2
 LKW-Geschwindigkeit im Durchschnitt: 20 km/h

Iteration	Transportzeit
1	5:13:08:41.783
2	5:13:07:57.310
3	5:13:07:56.610
4	5:13:07:56.610

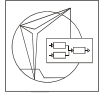


Bild 8 Simulationsparameter und erste Testergebnisse

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein bidirektionales Kopplungskonzept zwischen makroskopischer Optimierung und mikroskopischer Ablaufsimulation, basierend auf dem im Forschungsverbund ForBAU entwickelten Simulationsframework, vorgestellt. Ziel dieses Ansatzes ist, die Gesamtdauer von Erdbauprozessen und insbesondere die Transportzeit von Erdstoffen zu minimieren. Ein erster Testversuch mit Daten aus einem realen Straßenbauprojekt bestätigt, dass die gesamte Transportzeit iterativ minimiert werden kann und das Verfahren in wenigen Iterationsschritten konvergiert. In zukünftigen Arbeiten werden weitere Untersuchungen mit verschiedenen Konfigurationsparametern durchgeführt. Ein weiterer Schritt ist, die simulierte Transportzeit mit der gemessenen Transportdauer auf dieser Erdbaustelle zu vergleichen, um die Praxistauglichkeit des ForBAU-Simulationsframeworks zu evaluieren.

Literatur

- [1] H.-J. BARGSTÄDT, J. VOIGTMANN: Simulation von Baulogistikprozessen im Ausbau, ASIM-Fachtagung 2008, S. 131–140, 2008
- [2] A. BORRMANN, Y. JI, I.-C. WU, M. OBERGRIEBER, E. RANK, C. KLAUBERT, W. GÜNTNER: ForBAU – The virtual construction site project. In Proc. of the 26th CIB-W78 Conference on Managing IT in Construction. Istanbul, Turkey, October 2009.
- [3] R. CHAHROUR: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Institut für Bauwirtschaft an der Universität Kassel (Hrsg.): Schriftenreihe Bauwirtschaft, S. I. Forschung. Kassel University Press, Kassel, 2007.
- [4] Y. JI, F. SEIPP, A. BORRMANN, S. RUZIKA, E. RANK: Mathematical Modeling of Earthwork Optimization Problems. In Proc. of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering 2010 (ICCCBE 2010), Nottingham, UK, Juli 2010.
- [5] Y. JI, A. BORRMANN, E. RANK, J. WIMMER, W. GÜNTNER: An Integrated 3D Simulation Framework for Earthwork Processes. In Proc. of the 26th CIB-W78 Conference on Managing IT in Construction. Istanbul, Turkey, October 2009.
- [6] M. KÖNIG, U. BEISSERT, H.-J. BARGSTÄDT: Ereignis-diskrete Simulation von Trockenbauarbeiten – Konzept, Implementierung und Anwendung. In: Tagungsband des 1. IBW-Workshops, Simulation in der Bauwirtschaft 13. September 2007, S. 15–28. Universität Kassel 2007
- [7] I.-C. WU, A. BORRMANN; E. RANK; U. BEIßER; M. KÖNIG: A Pattern-based Approach for Facilitating Schedule Generation and Cost Analysis in Bridge Construction Projects. In: Proc. Of the 26th CIB-w78 Conference on Managing IT in Construction; Istanbul, Turkey, 2009, pp. 93-100
- [8] J. WIMMER, Y. JI, T. HORENBURG, A. BORRMANN, W. GÜNTNER, E. RANK: Evaluation of the 3D Model-based Earthwork Process Simulation in Practice. In Proc. of the 14th ASIM-Conference Simulation in Production and Logistic (ASIM2010), Karlsruhe, Germany, October 2010, (to appear).
- [9] J. WIMMER, T. HORENBURG, W. A. GÜNTNER: Erstellung einer Simulationsbibliothek für den Tiefbau. In: Tagungsband des Simulationsworkshops an der Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Deutschland, März, 2010.