

Erstellung einer Simulationsbibliothek für den Tiefbau

Dipl.-Ing. Johannes Wimmer, Dipl.-Ing. Tim Horenburg, Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit kann nicht nur über geringere Kosten, sondern vor allem auch in der Bauprozessgestaltung und Planungsqualität erfolgen. Der durchgängige Einsatz von EDV-Hilfsmitteln soll Prozessabläufe transparenter gestalten, indem standardisierte digitale Werkzeuge die Qualität und Zuverlässigkeit von Planungsdaten wesentlich erhöhen. Einen wichtigen Aspekt zur Planung komplexer Großbaustellen stellt hierbei die Methode der Ablaufsimulation dar. Um deren Einsatz im Tiefbau zu ermöglichen, wurde eine Bausteinbibliothek erstellt, welche in das stark vernetzte ForBAU-Konzept der digitalen Baustelle eingebunden ist.

1. Einleitung

Der Forschungsverbund ForBAU betrachtet sowohl die Planung als auch die Ausführung von Tiefbauprojekten. Über beide Phasen werden alle anfallenden Soll- und Ist-Daten aus der Planung beziehungsweise Ausführung mithilfe eines Produktdatenmanagementsystems (PDM) zentral verwaltet. Konventionell geplante Modelle (2D) werden ins Dreidimensionale überführt und miteinander kombiniert. Gemeinsam mit dem Bauablaufplan entsteht somit aus den 3D-Modellen von Gelände, Baugrund und Bauwerk ein zentrales 4D-Baustelleninformationsmodell. Diesem werden alle relevanten Soll- und Ist-Informationen hinzugefügt, unter anderem Qualitäts- und Lieferanteninformationen aber auch Einbauort und -zeit, so dass der Prozessablauf der untersuchten Baustelle transparenter wird.



Abbildung 1: Konzept ForBAU

Um zeitnah aktuelle Fortschrittsdaten festzuhalten, werden sogenannte Auto-ID-Systeme zur Erfassung von Ist-Daten eingesetzt und entsprechend mit dem PDM-System verknüpft. Der Einsatz technologiegetriebener Logistikkonzepte soll die Erfassung unterstützen, Such- und Wartezeiten reduzieren sowie Bestände minimieren. Dadurch werden sichere Planungsgrundlagen geschaffen, die innovative Anlieferkonzepte in der Bauausführung ermöglichen.

Der hier näher beschriebene Teilaspekt beschäftigt sich mit der Simulation von Baustellenabläufen, insbesondere im Erd- und Tiefbau, um kritische Prozesse vorausschauend in einem virtuellen Modell zu testen. Schwierigkeiten in der Bauausführung werden vorab erkannt und relevante Abläufe können bereits in der Planungsphase visualisiert werden. Dadurch lassen sich bei der späteren Durchführung Verzögerungen oder unnötige Stillstandzeiten vermeiden.

2. Anforderungsanalyse

Um die Anforderungen an die Ablaufsimulation im Tiefbau zu ermitteln, wurde im ersten Schritt ein Workshop mit den Industriepartnern des Forschungsverbundes durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die Simulation für unterschiedliche Ziele verwendet werden soll. Ein primäres Ziel ist die simulative Absicherung von Baumaßnahmen. Durch die entstehenden Unsicherheiten am Bau wird eine Methode gesucht, verschiedene Szenarien vor der Bauausführung durchzuspielen und deren relevante Parameter vergleichen zu können. Ein weiteres Ziel ist die Optimierung des Maschineneinsatzes, um die Wirtschaftlichkeit einer Baustelle zu verbessern. Neben den wirtschaftlichen Aspekten ist die anschauliche Visualisierung der Baustellenabläufe in der Simulationsumgebung ein essentieller Punkt. Den vielen teilhabenden Gewerken bietet ein 4D-Baustellenablauf eine übersichtliche Darstellung der konkreten Planungen, so dass Fehler aufgrund von Missverständnissen vermieden werden können.

Der Einsatz einer Simulationsanwendung im Tiefbau eignet sich vor allem in zwei Phasen. Zum Einen in der Angebotserstellungsphase, in der innerhalb eines kurzen Zeitraums der Bauablauf erstellt und die Kosten dafür kalkuliert werden müssen. Zum Anderen sollen in der anschließenden Arbeitsvorbereitung verschiedene Szenarien miteinander vergleichbar sein, um eine optimierte Lösung mit hohem Detaillierungsgrad zu generieren. Sinnvoll ist es daher, ein spezifisches Simulationsmodell für ein festgelegtes Bauprojekt zu erstellen, welches von der relativ groben Planung in der Angebotskalkulation bis zur Feinplanung in der Arbeitsvorbereitung durchgängig genutzt werden kann.

Da nicht alle Prozesse der Baustelle in der Simulation berücksichtigt werden können, wurde eine Einteilung der verschiedenen Prozesse für den Brücken- und Trassenbau vorgenommen. Wie in Abbildung 2 dargestellt, sind dabei die verschiedenen Prozesse in der vertikalen Achse nach deren Vorhersagbarkeit mit den bisherigen Planungsmethoden aufgeteilt. In der horizontalen Achse sind diese zudem nach dem maßgeblichen Einfluss, dem der Prozess unterliegt, gruppiert. Zudem sind diesen noch die bestimmenden Unsicherheitsfaktoren hinzugefügt, welche eine konventionelle Planung erschweren.

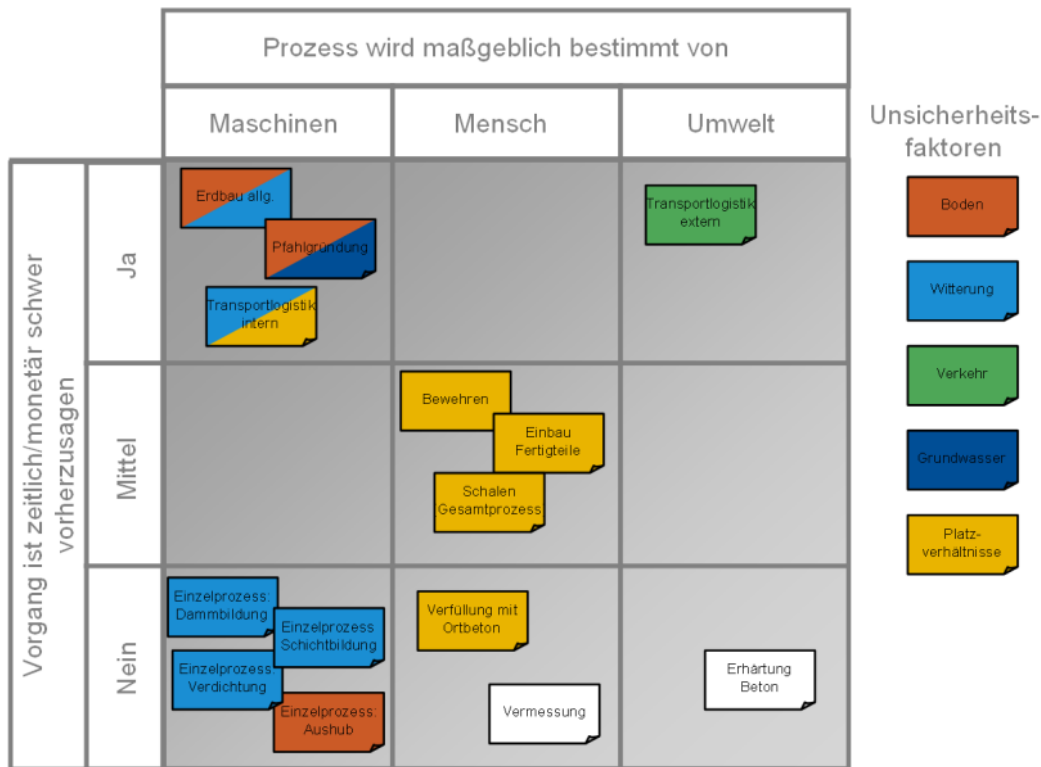


Abbildung 2: Einteilung verschiedener Bautätigkeiten nach Vorhersagbarkeit und Haupteinflussfaktoren

Einzelprozesse, wie die Dammbildung, die Verdichtung von Oberflächen oder der Schichtauftrag, die stark von der Maschinenleistung abhängen, sind bereits mit den bestehenden Planungsmethoden sehr gut vorhersehbar. Im Zusammenspiel mehrerer Maschinen, wie z.B. bei der Pfahlgründung oder im Erdbau, ergeben sich hingegen Schwierigkeiten in der Prognostizierbarkeit. Vor allem Bodeneigenschaften und Witterung sind beim Erdbau entscheidende Unsicherheitsfaktoren, welche eine Vorhersage der erzielbaren Leistung unterschiedlicher Maschinenkombinationen erschweren. Des Weiteren ist die interne Baustellenlogistik geprägt von den Raum- und Platzverhältnissen sowie den Bodenparametern der Transportwege.

3. Analyse der Erd- und Tiefbauverfahren

Nach der Ermittlung der Anforderungen an die Ablaufsimulation, wurden bestehende Berechnungsverfahren [1] [2] [3] für die einzelnen Erd- und Tiefbauprozesse auf der Baustelle analysiert und auf ihre Eignung für den Einsatz in der Simulation überprüft. Die Berechnung der Ladegerätleistung im Erdbau ist ausreichend bekannt, durch vielfältige Einflussfaktoren parametrierbar und kann daher für die Ablaufsimulation verwendet werden. Ein deutliches Optimierungspotenzial liegt hingegen in der Berechnung der Transportleistung, genauer in der Prognose von Umlaufzeiten spezifischer Transportfahrzeuge. Bisherige Verfahren berücksichtigen die dynamischen Bewegungen der Fahrzeuge nicht, Verzögerungs- und Beschleunigungszeiten sowie geringere Geschwindigkeiten bei Kurvenfahrten werden somit nicht betrachtet. Dies führt je nach Streckenprofil zu großen Abweichungen in den Fahrzeiten und somit zu Ungenauigkeiten bei der Planung von Transportkapazitäten.

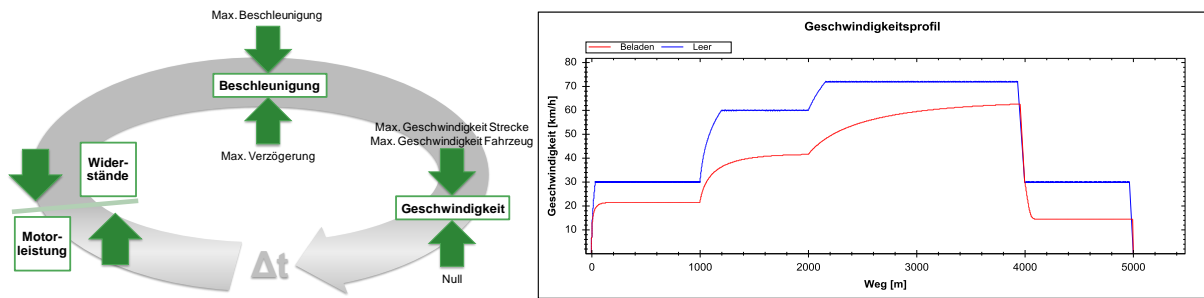


Abbildung 3: Funktionsweise Kinematiksimulation der Transportfahrzeuge

Um die Berechnung der Fahrzeiten zu verbessern, kann die Technik der kinematischen Simulation verwendet werden. Diese bietet für jedes Fahrzeug die Möglichkeit, ein Geschwindigkeitsprofil je nach befahrener Strecke und aktuellem Beladungszustand zu erstellen. Dabei wird in sehr kleinen Zeitschritten die Beschleunigungsfähigkeit des Fahrzeugs in Abhängigkeit der aktuellen Geschwindigkeit, den Fahrzeugeigenschaften und den Streckenparametern ermittelt. Ist die Antriebskraft im Vergleich zu den Fahrwiderständen zu klein, verringert sich die Geschwindigkeit in einem Zeitschritt, ansonsten wird sie erhöht. Grenzggeschwindigkeiten können sowohl für das Fahrzeug, als auch für die verschiedenen Streckenabschnitte angegeben werden, um beispielsweise Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Stauinflüsse zu berücksichtigen. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 3. Im leeren Zustand erreicht das Fahrzeug die Grenzggeschwindigkeiten der Streckenabschnitte, im beladenen Zustand ist nur das Verhältnis von Fahrzeugleistung zu den Fahrwiderständen ausschlaggebend.

Zudem wurden verschiedene Verfahren der Tiefgründung auf deren Einflüsse und Prozessparameter untersucht. Diese Verfahren sind abhängig von verschiedenen Faktoren aus dem Bereich der geotechnischen Daten, der Maschinendaten und den organisatorischen Einflüssen auf der Baustelle. Die ersten beiden Gruppen können als Eingangswerte in die Simulation übernommen werden, die letztere ergibt sich zum größten Teil aus dem Baustellenablauf sowie dem importierten geometrischen Zusammenhang.

4. Modellbildung und Implementierung

Um eine Grundlage für den Einsatz der Ablaufsimulation zu schaffen, ist im Rahmen des Forschungsprojekts eine Bausteinbibliothek für den Tiefbau modelliert und in Tecnomatix Plant Simulation von Siemens PLM implementiert worden. Wie in Abbildung 4 dargestellt, umfasst die Bibliothek Bausteine für den Datenim- und -export, für die Modellierung der baustellenbedingten Vorgänge, interne Verwaltungsbausteine, sowie spezifische Objekte für die Baustelleneinrichtung.

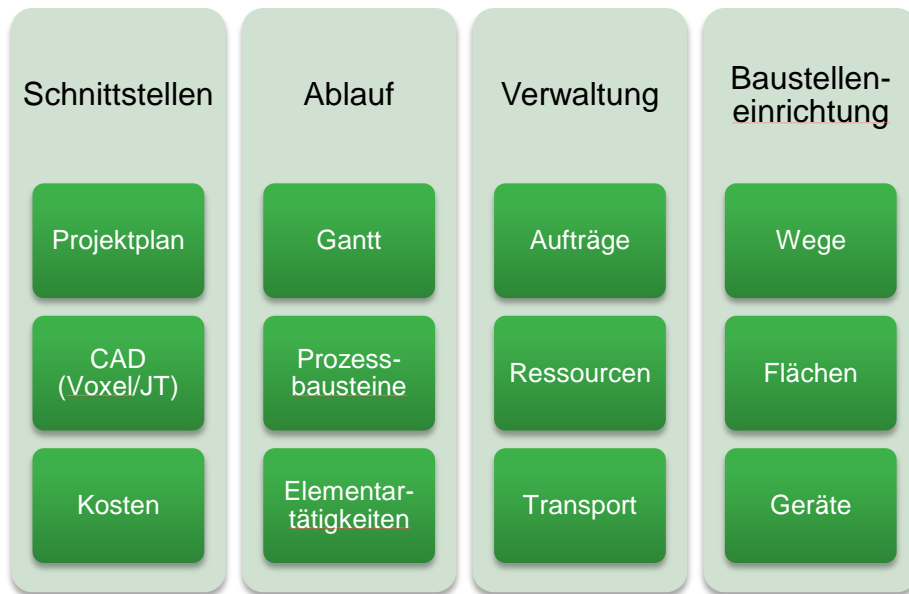


Abbildung 4: Zusammensetzung Bausteinbibliothek

Schnittstellen

Ein wichtiger Grundsatz der Bausteinbibliothek ist die Wiederverwendung von bereits bestehenden Planungsdaten. In dem in Abbildung 5 dargestellten Schnittstellenkonzept der 4D-Ablaufsimulation sind die Ein- und Ausgangsdaten für das Gesamtkonzept des Simulationssystems dargestellt.

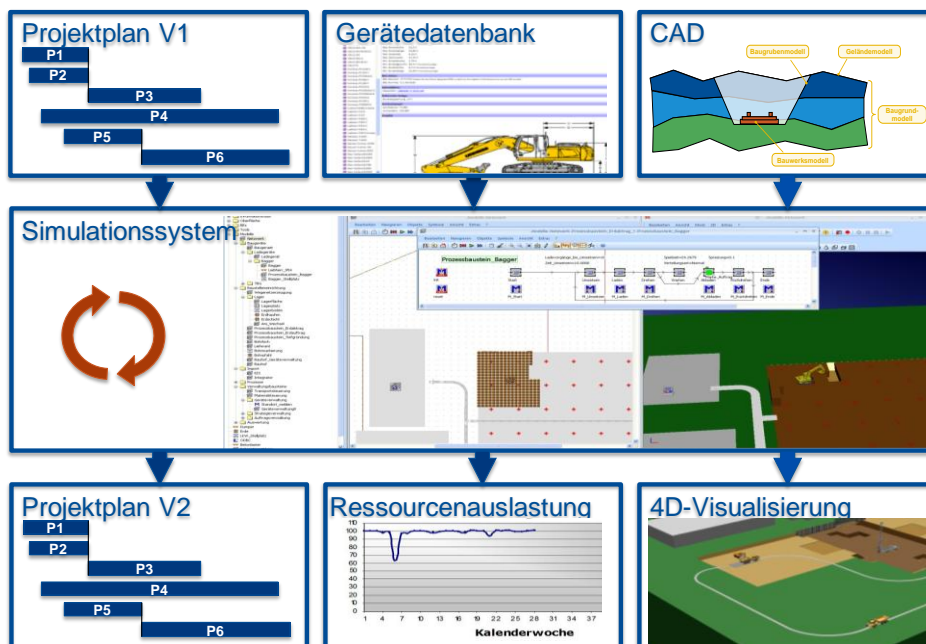


Abbildung 5: Schnittstellen Simulation

Zunächst wird ein vorweg erstellter Projektplan aus einem konventionellen Projektmanagementtool als Eingangswert in die Simulationsumgebung importiert. Eine weitere Eingangsgröße für die Simulation sind die auf- und abzutragenden Erdkörper. Um die Massenermittlung im Erdbau zu erleichtern, wurde im Forschungsverbund ein Tool geschaffen, mit dem das Untergrund-, das Oberflächen- sowie das Bauwerksmodell miteinander verschnitten und daraus das Volumen der jeweils abzutragenden und

aufzubringenden Erdmassen zu bestimmt wird. Dabei werden die entsprechenden Massen als gleichförmige Quader (Voxel) gespeichert, welche Informationen über Position, Volumen und Bodenart enthalten. [4] Die Voxelstruktur der ab- und der aufzutragenden Volumina wird in eine XML-Datei exportiert, welche dann in die Simulationsumgebung eingelesen werden kann.

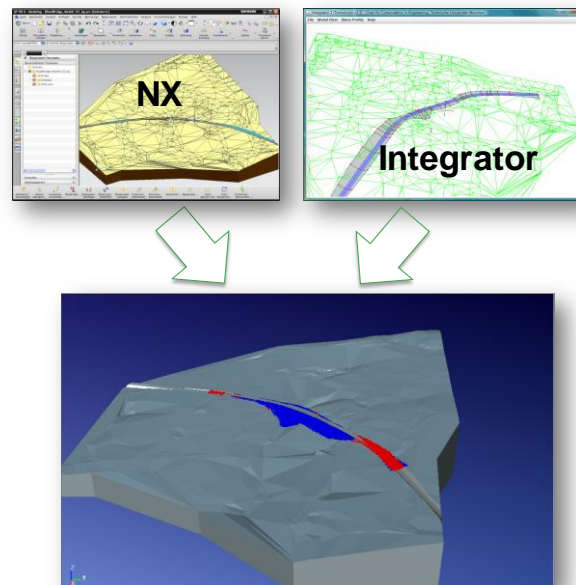


Abbildung 6: CAD-Schnittstellen

Neben der Voxelstruktur wird auch die Umgebung als 3D-Modell (JT-Format) importiert. Zudem kann eine aus mehreren Bauteilen zusammengesetzte Bauwerksstruktur für die Abbildung eines zeitlich veränderlichen Bauobjekts, wie beispielsweise ein Brückenmodell, übernommen werden. Eine Schnittstelle analysiert die CAD-Struktur des Bauwerks und übergibt diese an das Simulationssystem. Mit Hilfe eines für das CAD-System NX entwickelten Plugins wird die Struktur mit der Lage der Einzelbauteile bezüglich des Ursprungs der Gesamtbaustelle analysiert und in eine XML-Datei exportiert. In der Simulationsumgebung wird dann die XML-Datei eingelesen und in eine hierarchische, objektorientierte Bauwerksstruktur überführt, so dass jeweils der aktuelle Grad der Fertigstellung und der Status des Bauwerks (im Bau, Fertiggestellt, etc.) bis in die tiefste Strukturebene visualisiert werden.

Zudem ist eine Schnittstelle für die am Lehrstuhl fml entwickelte Baumaschinendatenbank Equipment Information System (EIS) vorhanden, in der Maschinendaten von über 2000 Baugeräten mit ihren jeweiligen Eigenschaften zur Beauskunftung hinterlegt sind. [5] Durch eine webbasierte Benutzeroberfläche und entsprechende Suchfunktionalitäten können dort mit wenig Aufwand geeignete Maschinen gefunden und deren spezifische Eigenschaften in das Simulationstool übertragen werden. Somit wird es möglich auch Leihgeräte ohne großen Aufwand in die Ablaufplanung mit einzubeziehen.

Die Importdaten werden anschließend in der Simulationssoftware miteinander verknüpft und eine ereignisgesteuerte Ablaufsimulation erzeugt. Ein erster Ablauf ohne Betrachtung der Detailvorgänge auf der Baustelle kann sofort gestartet werden. Hier werden die statistischen Schwankungen der Prozesse mit ihrer Auswirkung auf die Gesamtprozessdauer betrachtet. Sind Prozesse schwer vorherzusehen oder stark baustellenabhängig, können diese, wie

anschließend gezeigt wird, im Detail simuliert werden. Hierzu wird die Vorgangsdauer in Abhängigkeit der Spielzeiten beteiligter Ressourcen und der gegebenen Baustellenrandbedingungen ermittelt.

Als Ergebnis der Simulation entsteht ein verbesserter Projektplan, in dem auch feingranular aufgeteilte Vorgänge betrachtet werden können. Dieser Projektplan, dem die benötigten Ressourcen und Materialien hinterlegt sind, kann anschließend in der Ausführungsphase als Basis für die Bedarfsermittlung und die Steuerung der Anlieferungen verwendet werden. Diese Auswertungen können zusätzlich für eine Prozesskostenrechnung genutzt werden, um detaillierte Kosteninformationen über die jeweilig simulierten Szenarien zu erhalten.

5. Detailsimulation der Baustellenvorgänge

Im Gegensatz zu weniger relevanten Standardabläufen werden kosten- oder zeitkritische Prozesse wesentlich detaillierter betrachtet und in einem sehr genauen, realitätsnahen Modell abgebildet. Abbildung 7 zeigt die daraus resultierende, hierarchische Struktur der Bauprozesse in der Detailsimulation.

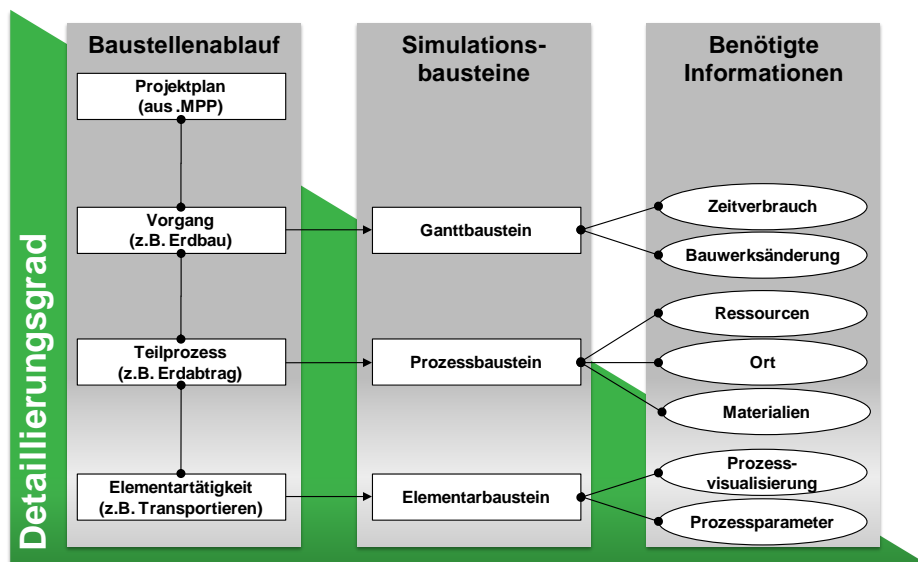


Abbildung 7: Hierarchieebenen der Baustellenabläufe

Der zuvor importierte Projektplan stellt einen groben Ablauf der Bauprozesse dar. Dieser ist in mehrere Vorgänge, wie beispielsweise den Erbau unterteilt, welche in der Simulation durch einen Gantt-Baustein abgebildet werden. Dieser kann wiederum aus weiteren Teilvorgängen mit entsprechenden Gantt-Bausteinen zusammengesetzt sein. Zur präziseren Spezifikation des Ablaufs sind zum Einen der Zeitverbrauch des Vorgangs und zum Anderen eine Information über den Fortschritt des Bauwerks nach Vorgangsende erforderlich. Bei Bedarf können Vorgänge in eine tiefere Detaillierungsebene überführt werden. Daraus ergeben sich mehrere Teilprozesse, welche in der Simulation mit sämtlichen Informationen angereichert werden, die für den Ablauf von Prozessbausteinen notwendig sind. Dazu gehören die örtliche Einordnung auf der Baustelle sowie die benötigten Ressourcentypen und Materialien, welche in diesen Teilprozessen verarbeitet werden. Für den höchsten Detaillierungsgrad wird ein Teilprozess weiter in dessen Elementartätigkeiten zerlegt. Um deren Ablauf zu sicherzustellen, sind zusätzlich die Prozessparameter sowie korrespondierende Visualisierungsinformationen notwendig.

Abbildung 8 zeigt den Gesamtzusammenhang der entwickelten Bausteine. Über Detaillierungsgrad und Simulationstiefe von Vorgängen wird bei der Implementierung des Simulationsmodells entschieden. Werden während der ausführlichen Experimente und Auswertungen weitere kritische Prozesse identifiziert, wird die Detailstufe für diese Vorgänge ebenfalls erhöht.

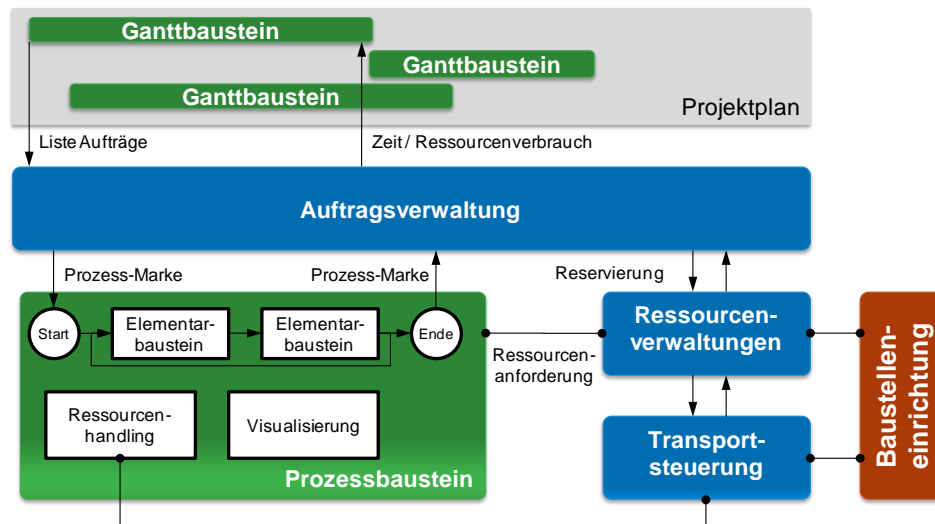


Abbildung 8: Interner Zusammenhang der Simulationsbausteine

Im Folgenden wird das Zusammenspiel der verschiedenen Bausteintypen erläutert. Gantt-Bausteine haben die Funktion einen Vorgang in Bezug auf seine Vorgänger und/oder ab einem bestimmten Termin zu starten. Wird ein Vorgang nicht weiter unterteilt, ist der Simulation lediglich ein Zeitverbrauch hinterlegt, welcher bei Beginn und am Ende eine Zustandsänderung des Bauwerks auslösen kann. Der Zeitverbrauch kann um eine statistische Komponente für die Monte-Carlo-Simulation erweitert werden. Dadurch kann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Ende jedes Vorgangs und somit auch für den Fertigstellungszeitpunkt des Gesamtprojekts ermittelt werden. Für den Fall einer weiteren Detaillierung von Vorgängen, werden im jeweiligen Gantt-Baustein die Informationen über die auszuführenden Teilprozesse und die benötigten Informationen aus Abbildung 7 vorgehalten. Beim Starten eines Gantt-Bausteines werden diese dann analog zum constraintbasierten Simulationsansatz (siehe [9]) über eine Auftragsverwaltung geordnet und alle zu dem Zeitpunkt möglichen Teilprozesse ausgeführt. Dabei wird in den Ressourcenverwaltungen geprüft, ob alle erforderlichen Ressourcen vorhanden sind, und diese für den Prozessbaustein reserviert. Anschließend erzeugt die Auftragsverwaltung einen Prozessbaustein und übergibt alle Informationen in Form einer Marke.

Abbildung 9 zeigt exemplarisch einen implementierten Prozessbaustein, welcher typischerweise in die drei Bereiche des Zustandsautomaten, des Ressourcenhandlings und der Visualisierung gegliedert ist. Im Zustandsautomaten (höchste Detaillierungsstufe) durchläuft eine Marke nacheinander verschiedene Elementartätigkeiten, wobei jeweils das Eintreten und das Vollenden einer Tätigkeit einen neuen Zustand aktivieren. Einzelne Zustände können mehrfach durchlaufen, aber auch übersprungen werden. Dies hängt von der Parametrierung und den aktuellen Randbedingungen des Prozessbausteins im Gesamtumfeld ab. Für das Ressourcenhandling sind Elementartätigkeiten in Form von Elementarbausteinen umgesetzt, die jeweils Material, Personal, Geräte und Flächen buchen und wieder freigeben können, indem Anfragen an eine globale Ressourcensteuerung gestellt

werden. Die angeforderte Ressource ist jeweils einem bestimmten Tätigkeitstyp zugeordnet. Die Steuerung ermittelt eine entsprechende freie Ressource und übergibt diese an den Prozessbaustein. Sobald die Ressource eingetroffen ist, wird diese verarbeitet, der Prozess fortgesetzt und die Marke wird an die folgende Elementartätigkeit weitergeleitet. Des Weiteren übernimmt der Prozessbaustein Visualisierungsfunktionen wie Drehungen und Translationen von 2D- und 3D-Objekten, die den aktuellen Prozesszustand übersichtlich abbilden.

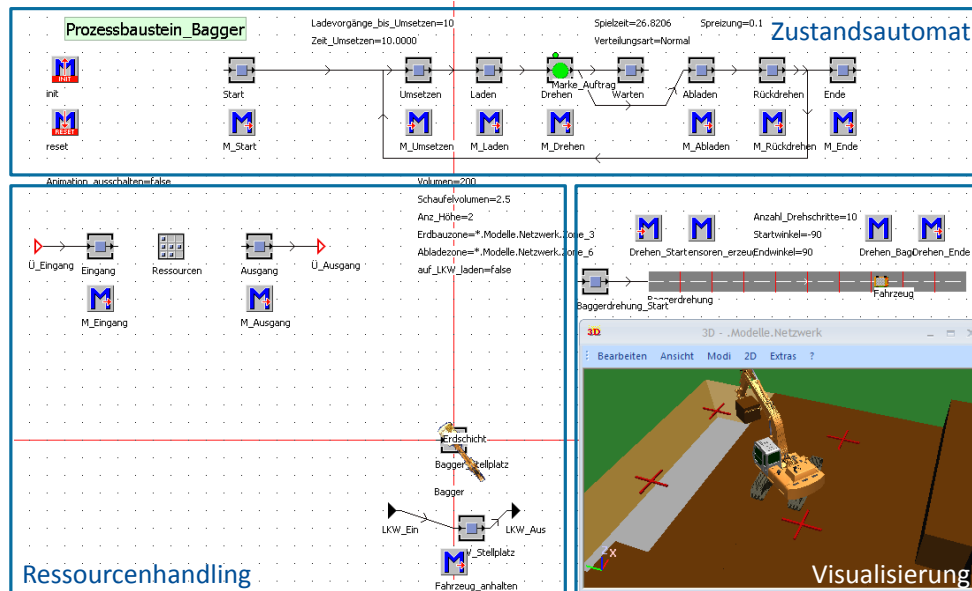


Abbildung 9: Prozessbaustein

Durch die in Abbildung 9 dargestellte Bausteinstruktur sind die verschiedenen Vorgänge in einer Baustelle beliebig kombinierbar. Die Ablaufbausteine haben standardisierte Schnittstellen, so dass auch beliebige weitere Aktivitäten in der Bausteinbibliothek umgesetzt werden können. Die Bausteinbibliothek ist objektorientiert aufgebaut, benutzerdefinierte Attribute, wie z.B. auch 3D-Objekte sind jedem Baustein hinterlegt. Die Simulationsbibliothek ist für eine kombinierte 2D/3D-Visualisierung ausgelegt, so dass auch ein Einsatz als Kommunikationsmittel ermöglicht wird.

Dynamische Planung der Baustelleneinrichtung

Die Baustelleneinrichtung und das Layout der Baustelle schaffen die organisatorisch-strukturellen Voraussetzungen für einen störungsfreien, ungehinderten Materialfluss von Bauprozessen und sind daher Grundlage für die Detailsimulation. Dafür ist es notwendig Transportwege, Logistikflächen und den Geräteinsatz derart zu planen, dass der Materialfluss trotz flexibler Baustellenabläufe sowie wechselnder Bedarfsorte und Anlieferstrategien sichergestellt wird [6]. Mithilfe der Ablaufsimulation sollen logistische und räumliche Kollisionen aufgedeckt und entsprechend optimiert werden.

Für die Planung des Materialflusses auf Baustellen wurde eine modulare Bibliothek mit intelligenten Baustelleneinrichtungsobjekten entwickelt. Über definierte Schnittstellen lassen sich die Objekte mit anderen Bausteinen koppeln. Neben den 2D- und 3D-CAD-Daten der herkömmlichen Baustelleneinrichtung sind diesen weitere Attribute und Funktionen (z.B. Zeit und Kosten für die Errichtung) hinterlegt, um entsprechende Ergebnisse aus den Experimenten zu generieren. Die zeitliche Dynamik der Baustellenumgebung wird durch

Objekte abgebildet, die spezifisch über die Zeit veränderlich sind. Somit können unterschiedliche Transportnetze, Szenarien verschiedener baustelleninterner Materialflussplanungen, aber auch der Geräteeinsatz auf Nutzen und Qualität untersucht werden. Hierzu können Bausteine aus der Bibliothek auf dem Baufeld platziert und mit Hilfe von Dialogen parametrisiert werden. So kann die Baustelle planbasiert und in Abhängigkeit der bekannten Anliefer- und Lagerstrategien eingerichtet werden. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt das Vorgehen.

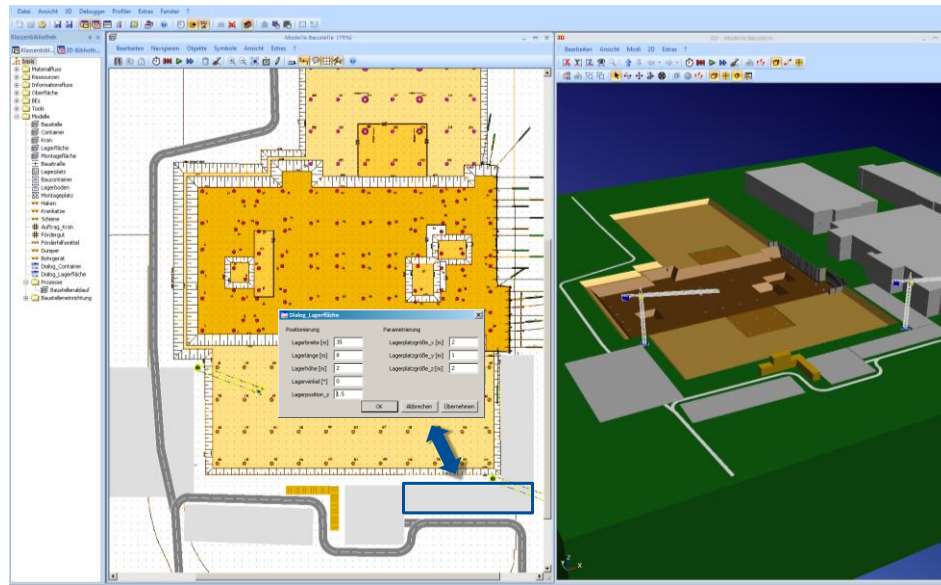


Abbildung 10: Layoutplanung und Baustelleneinrichtung

Sobald ein Baustelleneinrichtungselement auf dem 2D-Plan positioniert wird, wird das entsprechende 3D-Modell des Objektes geladen sowie das Gesamtmodell des räumlichen Layouts automatisch aktualisiert. Somit kann eine aufwandsarme, dreidimensionale Kontrolle der Einrichtungsgegenstände durchgeführt werden. Die jeweilige Konfiguration wird für jede Bauphase spezifisch erstellt und gespeichert. Auswertungen des Gesamtmodells sollen unter anderem einen optimierten Einsatz von Geräten, ein ausgewogenes Transportnetz sowie sinnvoll geplante Flächen für Lagerung und Montage zum Ergebnis haben.

Die Bausteinbibliothek beinhaltet Baustraßen, die entsprechend der durchgeführten Maßnahme im Modell platziert werden können. Den verschiedenen Bauphasen können unterschiedliche Transportnetze zugeordnet werden, die aus parametrierbaren Wegen aufgebaut sind. Parameter sind beispielsweise die Ein- oder Mehrspurigkeit, aber auch Bauart, Steigung oder Rollwiderstand, welche für die Geschwindigkeit der Transporte maßgeblich sind. Somit ergibt sich für jeden Transportweg ein Streckenprofil, das Basis für die oben erläuterte Kinematiksimulation ist. Mit Hilfe von Simulationsexperimenten kann für die spätere Ausführungsphase ein auf die jeweilige Bauphase optimiertes Transportnetz erzeugt und im Gesamtsystem validiert werden.

Die einzelnen Elemente der Baustelleneinrichtung sind über die Zeit veränderlich, um speziell im Bezug auf die Flächenplanung von Lagern oder Montageplätzen eine dynamische Belegung zu ermöglichen. Größe und Position können so den verschiedenen Bauphasen angepasst werden. An dieser Stelle ist es möglich diverse Tools zur Optimierung des Layouts (z.B. [7], [8]) zu nutzen und den optimierten Entwurf einzubinden. Unbeplante Flächen einzelner Bauphasen stehen ebenso wie ungenutzte Geräte einer

Ressourcenverwaltung zur Verfügung, die eine Doppelbelegung von Flächen unterbindet. So entstehen je nach Parametrisierung und Materialfluss andere Abläufe, da Prozesse – in Abhängigkeit des auszuführenden Prozessschritts – Einrichtungsflächen dynamisch anfordern und freigeben.

Ressourcenzuweisung

Eine Herausforderung in dieser flexiblen Simulationsarchitektur ist die Zuweisung der passenden Ressourcen zu den jeweiligen Vorgängen. Dabei gilt es verschiedene Fälle zu überprüfen, welche im Baustellenumfeld auftreten können:

- Eignung
 - Eine Tätigkeit kann von unterschiedlichen Ressourcen ausgeführt werden
 - Eine Ressource kann mehrere Tätigkeiten mit unterschiedlicher Eignung ausführen
- Zuweisungstiefe
 - Eine Tätigkeit und Parameter werden vorgegeben (z.B. Transport, 5t, Schüttgut)
 - Eine Ressourcengruppe und Parameter werden vorgegeben (z.B. Dumper, Nutzlast größer als 5t)
 - Ein Ressourcentyp wird vorgegeben (Hersteller X, Typ Y)
 - Eine spezifische Ressource wird benötigt

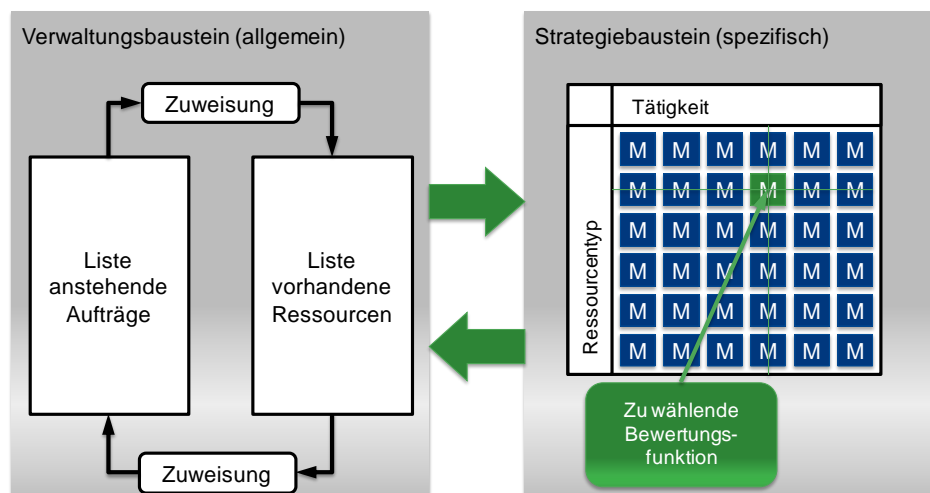


Abbildung 11: Flexible Steuerungsarchitektur

Deshalb werden die Ressourcenanforderungen aus den Prozessbausteinen in einer zentralen Ressourcenverwaltung bearbeitet. Um auf die verschiedenen Anforderungs- und Zuweisungsarten zu reagieren, wurde eine flexible Steuerungsarchitektur geschaffen, welche auf die Ressourcentypen Personal, Geräte, Material und Fläche anwendbar ist. Die Anforderung der Ressourcen erfolgt dynamisch zur Laufzeit über das Brokerprinzip, welches in Abbildung 11 auf der linken Seite schematisch dargestellt ist. Dazu werden alle auszuführenden Buchungsaufträge der Elementartätigkeiten sowie alle vorhandenen Ressourcen in zwei Listen gesammelt. Nach jedem Eingang einer neuen Ressource oder eines Auftrages wird eine Funktion aufgerufen, welche die am bestem geeigneten Ressourcen dem bestmöglichen Auftrag zuweist. Diese Bewertungsfunktionen können variieren, um je nach Ressourcen- und Auftragstyp auch spezifische Parameter zu berücksichtigen. Die Parameter des Auftrags sowie der Ressourcen wie z.B. Entfernung,

Gewicht, etc. werden zudem verschieden stark gewichtet um eine optimale, für jede Baustelle anpassbare Zuweisung zu vollziehen. Die eingesetzte Strategie wird somit zum Simulationsparameter und kann für eine Optimierung genutzt werden.

6. Simulationsexperimente und Auswertung

Die Ergebnisse des von fertiggestellten Simulationsexperimenten werden auf mehreren Ebenen bereitgestellt. Zum einen soll dem Projektplan, welcher auch als Eingang für die Simulation dient, die simulierten Dauern, die dafür benötigten Ressourcen und Materialien angefügt werden. Somit werden für die spätere Ausführungsphase detaillierte Prozessinformationen übergeben. Zum anderen können Maschinenauslastungen und -einsatzzeiten auf verschiedenen Detaillierungsebenen in eine Prozesskostenrechnung exportiert werden, so dass eine verursachungsgerechte Kostenbetrachtung vorgenommen werden kann.

Die Validierung der Baustelleneinrichtung stellt einen weiteren wichtigen Schritt im Konzept dar. Auf Basis der Prozesssimulation werden aussagekräftige Auswertungen über die Auslastung der Einrichtungsgegenstände für jede Phase gesondert erzeugt. So können beispielsweise Lagerfüllstände überprüft und die Kapazität überlasteter Flächen erweitert oder Maschinenauslastungen von teuren Großgeräten optimiert werden.

Außerdem kann durch die Modellierung innerhalb der Simulationsumgebung – anders als im CAD-System – direkt eine Materialflussanalyse, z. B. mittels Sankey-Diagramm oder Engpassanalyse, erfolgen. Dazu ergibt sich der Vorteil, dass das aktuelle Layout mit Hilfe der Simulation hinsichtlich eines optimalen Materialflusses und der effizienten Anordnung einzelner Funktionsflächen durch eine genügend große Anzahl an Experimenten validiert werden kann. Die Visualisierung der Materialflüsse ermöglicht eine übersichtliche Planung, in der Auswirkungen von Layoutänderungen einfach analysiert werden können.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In den bisherigen Arbeiten wurden die Modelle der einzelnen Bauprozesse erstellt, im Rahmen einer Bausteinbibliothek zusammengefasst und damit begonnen, diese anhand bereits abgeschlossener Demobaustellen zu validieren. Für eine ausreichende Überprüfung der Prozessbausteine müssen jedoch noch weitere Praxistests durchgeführt werden. Die kommenden Demobaustellen sollen daher intensiv begleitet werden, um weitere Realdaten für den Vergleich mit den simulierten Werten zu erhalten.

8. Literaturverzeichnis

- [1] H. Bauer, *Baubetrieb*. Berlin: Springer, 2006.
- [2] F. Hüster, *Leistungsberechnung der Baumaschinen*, 2nd ed. Düsseldorf: Werner, 1992.
- [3] G. Girmscheid, *Leistungsermittlung für Baumaschinen und Bauprozesse*. Berlin u.a.: Springer, 2003.
- [4] Y. Ji, K. Lukas, M. Obergrießer, and A. Borrmann, "Entwicklung integrierter 3D-Trassenproduktmodelle für die Bauablaufsimulation," in *Tagungsband des 20. Forum*

Bauinformatik , Dresden, 2008.

- [5] W. A. Günthner, S. Kessler, T. Frenz, B. Peters, and Walther K., "Einsatz einer Baumaschinendatenbank (EIS) bei der Bayerischen BauAkademie," no. 12, pp. 736-738, 2008.
- [6] Rainer Schach and Jens Otto, *Baustelleneinrichtung - Grundlagen - Planung - Praxishinweise - Vorschriften und Regeln*. Wiesbaden: B.G Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008.
- [7] F. Zhou, S. M. AbouRizk, and H. AL-Battaineh, "Optimisation of construction site layout using a hybrid simulation-based system," in *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009.
- [8] Sai-On Cheung, Thomas Kin-Lun Tong, and Chi-Ming Tam, "Site pre-cast yard layout arrangement through genetic algorithms," in *Automation in Construction*, 2002.
- [9] M. König and U. Beißert, "Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen.," in *Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)haus-Bau*, Weimar, 2008, pp. 17-36.
- [10] DIN e.V., *VOB 2006 - Teil A - DIN 1960, Teil B - DIN 1961, Teil C - ATVen: Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen* , Gebundene Ausgabe ed.: Beuth, 2006.