Erweiterung des zyklischen Ansatzes zur Kombination von Mikrosimulation und Makrosimulation

Extension of the cyclical approach to the combination of microsimulation and macrosimulation

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
M.Sc.
an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München.

Themenstellender	Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Betreuerin	Anne Fischer, M.Sc.
Eingereicht von	Zhuoran Li, B.Sc.
Eingereicht am	03.05.2021 in Garching
Inventarnr. fml	2020105

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand unter der wissenschaftlichen und inhaltlichen Anleitung von Anne Fischer, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München.

Vereinbarung zum Urheberrecht

Hiermit gestatte ich dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik diese Studienarbeit bzw. Teile davon nach eigenem Ermessen an Dritte weiterzugeben, zu veröffentlichen oder anderweitig zu nutzen. Mein persönliches Urheberrecht ist über diese Regelung hinaus nicht beeinträchtigt.

Eventuelle Geheimhaltungsvereinbarungen über den Inhalt der Arbeit zwischen mir bzw. dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik und Dritten bleiben von dieser Vereinbarung unberührt.

München, 03.05.2021, Li. Li

Ort, Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **I**

1 Einleitung **1**
1.1 Ausgangssituation 1
1.2 Problemstellung 1
1.3 Zielsetzung 2
1.4 Aufbau der Arbeit 3

2 Stand der Wissenschaft und Technik **5**
2.1 Simulation im Bauwesen 5
2.1.1 Begriff der Simulation 5
2.1.2 Klassifikation von Simulationsmodellen 6
2.1.3 Simulatoren 8
2.1.4 Vorgehensweise bei der Simulation 11
2.2 Simulationsgestützte Bauablaufplanung 12
2.2.1 Aufbau des Simulationsmodells für den Bauablauf 12
2.2.2 Verschiedene Modellierungsansätze für die Bauablaufplanung 14
2.2.3 Interaktion zwischen den Simulationsmodellen 21
2.3 Integration von Bauschrittdaten in die Simulation 22
2.3.1 Building Information Modelling (BIM) 22
2.3.2 Tracking and Tracing (TaT) 23
2.3.3 Maschinendaten 25
2.4 Relevante Simulationsstudien 26
2.5 Fazit 26

3 Modellierung **29**
3.1 Dreiteiliges Konzept 29
3.2 Simulationsmodell der Makrosimulation 30
3.2.1 Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP) 31
3.2.2 Konzept des Multi-Agenten-Systems 34
3.2.3 Eingangsdaten 36
3.2.4 Optimierungsansätze 38

3.3 Simulationsmodell der Ablaufsimulation in der Mikrosimulation 42
3.3.1 System 43
3.3.2 Eingangsdaten 45
3.3.3 Bohrpfahlherstellung durch das Simulationsmodell 45
3.3.4 Optimierungsansatz 48
3.4 Simulationsmodell der Prozesssimulation in der Mikrosimulation 50
3.4.1 System 50
3.4.2 Eingangsdaten 50
3.4.3 Optimierungsansatz 51
3.5 Zyklischer Ansatz zur Kombination der Makro- und Mikrosimulation 51
3.5.1 Allgemeine Bauablaufplanung 51
3.5.2 Datenaustausch 52
3.5.3 Fortschrittsberechnung 54

4 Implementierung 55
4.1 Erweiterung der Makrosimulation 55
4.1.1 Ziel und Anforderung 55
4.1.2 Neue Bausteine und Funktionen 56
4.2 Erweiterung der Prozesssimulation 58
4.2.1 Ziel und Anforderungen 58
4.2.2 Neue Bausteine und Funktionen 59
4.3 Modellbildung für die Ablaufsimulation 61
4.3.1 Unterschiede zwischen Bohrpfahlwänden und dem Brückenfundament des Brückenbauprojekts 61
4.3.2 Lösungskonzept zur Anpassung 62
4.3.3 Aufbau des Modells 63
4.3.4 Erweiterung zur Verbindung mit der Makrosimulation 64

5 Verifikation und Validierung 65
5.1 Simulationsstudie 65
5.1.1 Das Brückenbauprojekt Westtangente Rosenheim 65
5.1.2 Aufbau der Simulationsstudie 66
5.1.3 Datenbeschaffungen und -aufbereitungen 67
5.2 Bauablauf in der Ablaufsimulation 72
5.2.1 Bauablauf mit der Parameterstudie von Ressourcen 73
5.2.2 Bauablauf mit der Parameterstudie über die Sequenzierung 77

5.2.3 Bauablauf mit verschiedener Verteilungsfunktion zur Dauerberechnung 77

5.2.4 Beschränktheit in Bezug auf dem Brückenbauprojekt Westtagente Rosenheim 79

5.3 Terminplanung mit verschiedenen Prioritätsregeln in der Makrosimulation 80

5.4 Zyklische Anwendung zwischen den Modellen 82

6 Diskussion 87

7 Zusammenfassung und Ausblick 89

Literaturverzeichnis 91

Abkürzungsverzeichnis 99

Formelzeichenverzeichnis 101

Abbildungsverzeichnis 103

Tabellenverzeichnis 105

Anhang A Abbildungen A-1

Anhang B Tabellen B-1

Anhang C Datei j301_3.mm aus PSPLib C-1

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Jede Baustelle ist ein Unikat. Im Gegensatz zur stationären Industrie ist die Bauindustrie durch eine Abhängigkeit des Standorts der Baustelle gekennzeichnet. Mit einem hohen Anspruch an einen effizienten Bauablauf in der Bauwirtschaft ist die Terminplanung eines komplexen Bauvorhabens vor und während der Bauausführung immer von hoher Bedeutung. Basierend auf der steigenden Digitalisierung in der Bauindustrie werden digitale Daten eines Bauprojekts, die das Bauprojekts ausführlich beschreiben, in Echtzeit zur Verfügung gestellt. In der Praxis werden diese Daten zwar gesendet, aber kaum genutzt. Heutzutage ist die Terminplanung noch stark manuell geprägt und erfolgt basierend auf Erfahrungswerten. Auch Informationen über das Projekt werden meist manuell erhoben.

Im Vergleich zum Bereich der Produktion und Logistik, wo die ereignisdiskrete Simulation schon als ein wichtiges Instrument eingesetzt, hat diese Leistung bei der Simulation in die Bauindustrie noch nicht erreicht [VDI-3633]. Mit der ereignisdiskreten Simulation steht ein Werkzeug zur Verfügung, was den Bauprozess computergesteuert unterstützen kann, in dem vorab Varianten durchgespielt werden und so die optimale Lösung gefunden werden kann. Durch die fortschreitende Digitalisierung kann auch die ereignisdiskrete Simulation an die Dynamik der Bauindustrie angepasst werden und so eine höhere Flexibilität garantiert werden. Die ereignisdiskrete Simulation muss fähig sein, diese Daten zu importieren und dann die Prozesse eines Bauprojekts zu analysieren. Damit wird ein Grundstein für die zukünftige Entwicklung gelegt, um die stetig wachsende Komplexität der Bauvorhaben mit vorliegenden Ressourcen, Material, Arbeitsflächen und Arbeitskräften effizient anzugehen.

1.2 Problemstellung

Aufgrund der Komplexität, Flexibilität und der hohen Anzahl der Beteiligten eines Bauprojekts können Störungen während der Ausführungen getreten. Auch Umweltfaktoren beeinflussen den Ablauf der Bauausführungen und erfordern somit Planungsänderungen. Deswegen ist es in der praktischen Bauindustrie sinnvoll, die Ist-Zustände immer mit den Soll-Zuständen abzugleichen, damit ein optimierter Terminplan für die noch nicht ausgeführten Prozesse herausgegeben werden kann.

Durch die umfangreiche Vorarbeit des Lehrstuhls für Fördertechnik, Materialfluss und Logistik (fml) der Technischen Universität München (TUM) steht die Makrosimulation, welche als Multi-Agenten-Modell aus dem DFG-Forschungsantrag „Entwicklung einer agentenbasierten Terminplanoptimierung im Bauwesen unter Berücksichtigung ressourcenabhängiger Prozesslängen“ (DFG Forschungsvorhaben GU 427/22-1) vorliegt [Wen-2016], sowie ein zyklischer Ansatz zur Verbindung der Makro- und einer vereinfachten Mikrosimulation [Li-2020; Fis-2021] zur Verfügung. Der Ansatz wurde nur basierend auf einem fiktiven vereinfachten Versuchsplan entwickelt, ist aber für die praktische Anwendung nicht ausreichend.

In der Praxis beinhaltet ein Prozess häufig Subprozesse. Aufgrund der Flexibilität einer Bauausführung können nicht alle Subprozesse nach dem geplanten Terminplan durchgeführt werden. Daher kann es vorkommen, dass ein laufender Prozess noch nicht beendet ist, der nachfolgende aber schon beginnt ist. Vor Beginn des Bauprojekts werden verschiedene Modi jedes Prozesses zur Verfügung gestellt. Durch die computergestützte Simulation wird der theoretische optimale Modus jedes Prozesses ausgewählt. Die Praxis könnte nach einem anderen Modus unter Berücksichtigung von Einflussfaktoren durchgeführt werden. Solche praktischen Situationen müssen immer weiter in den zyklischen Ansatz vordringen.

1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den zyklischen Ansatz der Terminplanung aus Li [Li-2020] mit digitalen Daten aus der Baustelle zu ergänzen. Zum einem soll die dynamische Simulation ein reales Bauprojekt abbilden. Zum anderen soll eine Visualisierung der Baustelle und des Bauablaufs ermöglichen werden. Dies zielt darauf ab, eine Prognose des Zeitaufwandes der nicht durchgeführten Prozesse basierend auf bestehenden digitalen Daten aus demselben Bauprojekt zu treffen.

In der Arbeit wird die Anwendung durch die ereignisdiskrete Simulation in zwei Detaillierungsebenen unterteilt: die Makrosimulation und die Mikrosimulation. Die Makrosimulation zielt darauf ab, die Prozesse eines Bauprojekts vernünftig aufeinander abzustimmen und den zugehörigen Bauablauf effizient zu planen. Sie bietet eine Darstellung einzelner Prozesse im Gantt-Diagramm. Über einen Multi-Agenten-Ansatz auf Basis von Prioritätsregeln werden Ressourcen wie Materialien, Maschinen oder Flächen optimal angeordnet. Die Mikrosimulation verfügt auf der einen Seite über die Integration von Ist-Daten und Soll-Daten, bietet auf der anderen Seite die Möglichkeit, den Bauprozess als Materialfluss abzubilden. Dabei werden Quellen, Senken und Transportgüter/-mittel bestimmt, um Varianten vorab durchzuspielen.

Aus dieser funktionalen Aufsplittung der Mikroebene, leitet sich in dieser Arbeit ein dreiteiliges Konzept ab, Daraus folgt die Anwendung mit den digitalen Daten, wobei die Makrosimulation mit der Mikrosimulation zusammenarbeitet, sodass die Terminplanung des Bauprojekts immer am Ist-Zustand anzupassen ist.

1.4 Aufbau der Arbeit

Im Unterkapitel 2.1 werden zunächst die Grundlagen der Simulation im Bauwesen vorgestellt. Dann folgen die verschiedenen Modellierungsansätze für die Bauablaufplanung im Unterkapitel 2.2. Hier wird auch die Interaktion zwischen den Modellen aus den verschiedenen Modellierungsebenen erklärt. Der Unterkapitel 2.3 ist auf die Integration von Bauschrittdaten in die Simulation ausgerichtet. Danach werden Beispiele für Bereiche ressourcenbeschränkte Projektplanung, dynamische Planung der Bauaktivitäten und Planung beim Tiefbauprojekt im Unterkapitel 2.4 aufgelistet. Anschließend erfolgt im Unterkapitel 2.5 eine Zusammenfassung über die Ansätze und die digitalen Daten, die in dieser Arbeit verwendet werden.

Im Kapitel 3 werden zunächst ein kurzer Überblick über das dreiteilige Konzept vorgestellt. Es beschreibt die Interaktion zwischen den Modellen, um eine optimierte Projektplanung zu jeder Zeit zur Verfügung zu stellen. Danach folgen drei Ausgangsmodelle über ihren Theorien, Systeme, Eingangsdaten und Optimierungsansätze. Zuletzt wird die zyklische Anwendung dieses Systems vorgestellt. Kapitel 4 stellt die Modellbildung und Modellerweiterung basierend auf den Ausgangsmodellen vor.

Kapitel 5 beinhalt die Verifikation und Validierung der Simulationsstudie. Nach der Vorstellung dieser Studie werden der Bauablauf in der Ablaufsimulation, die Terminplanung in der Makrosimulation und die zyklische Anwendung bezüglich des aufgebauten Hybrid-Simulation-Systems überprüft.

Im Kapitel 6 wird die Diskussion über die Ergebnisse aus der Verifikation und Validierung vorgestellt. Hierbei werden auch die Einschränkungen der entwickelten Simulation erläutert.

Am Ende dieser Arbeit steht die Zusammenfassung. Auch wird ein Ausblick über die zukünftige Richtung und die Möglichkeit zur Optimierung beigefügt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Simulation im Bauwesen

2.1.1 Begriff der Simulation

Die Simulation ist wie eine Brücke, die die digitale mit der realen Welt verbindet. Dadurch werden die Beziehungen zwischen den verschiedenen Elementen in der Realität abstrakt präsentiert. Diese Simulationsstudie ist nützlich für die Analysierung der Ergebnisse und des Ablaufs eines Projekts innerhalb eines Systems. Nach der Richtlinie VDI 3633 wird der Begriff der Simulation im Bereich Produktion und Logistik mit folgenden Sätzen definiert: Simulation ist das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt“ [VDI-3633]. Daher sind bei der Simulation immer Modell und System eng miteinander verbunden. Das zugehörige Modell wird Simulationsmodell genannt.

Die DIN IEC Norm 60050-351 beschreibt ein System als „eine von ihrer Umwelt abgegrenzte Menge von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen“ [DIN-60050-351]. Nach der Richtlinie VDI 3633 sind die Eigenschaften eines Systems in den folgenden Sätzen beschrieben [VDI-3633]:

- In einer Simulationsstudie ist die Umgebung des beschriebenen Systems begrenzt, dazu gibt es die Eingangsgröße und die Ausgangsgröße, die den Austausch zwischen der Umwelt und den Schnittstellen Energie, Materie und Informationen des Systems beschreibt.

- Ein System besteht aus Systemelementen, die bei der Verfeinerung selbst wiederum als Subsysteme dargestellt werden oder aber als nicht weiterzerlegbar angesehen werden.

- Die Ablaufstruktur innerhalb eines Systemelements ist durch spezifische Regeln und konstante oder variable Attribute (Zustandsgrößen) bestimmt. Um einen Prozess ablaufen zu lassen, spielen die Relationen zwischen den Systemelementen eine entscheidende Rolle.

- Die Änderung von einer oder mehreren Zustandsgrößen beeinflusst den Zustand eines zugehörigen Systemelements.

Zur Untersuchung des Systemverhaltens liegt das Modell vor, mit dem die Eigenschaften und Zustände des Systems intuitiv nachgebildet werden. Für die dazu notwendigen Rechnungen wird das Modell durch ein Computerprogramm in mathematisch-logischer Form implementiert [Ele-2012]. Was ein Simulationsmodell präsentiert, ist ein vereinfachtes System. Dazu werden nur entscheidende Systemelemente für die Untersuchung erstellt. Auch simuliert das Simulationsmodell das Systemverhalten in einem bestimmten Zeitraum. Durch die Änderung von Eingangsgrößen, Zustandsgrößen und dem Startzeitpunkt können unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Jede vernünftige Kombination präsentiert ein Systemverhalten des untersuchten Systems in verschiedenen Situationen.

Ein abstraktes Modell ist grundsätzlich ein experimentierfähiges Modell, um den Ist-Zustand und den geplanten Zustand des Systems zu beschreiben. Damit werden die Vorgänge innerhalb des Systems nachvollzogen. Der zweite Schritt ist, dass das Simulationsmodell mit neuen Eingangsdaten verwaltet wird. Auf diese Weise wird ermöglicht, neue Konstellationen ohne Störungen des Betriebs zu testen und Schwachstellen zu analysieren. [Hrd-1997]

2.1.2 Klassifikation von Simulationsmodellen

Nach der Änderung über die Zeit werden Simulationsmodelle in statisch und dynamisch unterteilt. Bei der statischen Simulation wird der Zeitverlauf nicht berücksichtigt, wohingegen bei der dynamischen Simulation verschiedene Zustände während des betrachteten Zeitraums zur Verfügung stehen [Gün-2011]. Die dynamische Simulation kann noch in kontinuierlich und diskret dividiert werden (s. Abbildung 2-1). Der Unterschied dazwischen ist, ob die Änderung von Zuständen bezüglich der betrachteten Zeit stetig ist. Bei der kontinuierlichen Simulation kann der Verlauf von Zuständen durch eine stetige Funktion abgebildet werden. Für die diskrete Simulation ändern sich, die Zustände sprunghaft zu einem bestimmten Zeitpunkt. Es gibt keinen Vorgang zwischen den Änderungen, sodass die Zustandsänderungen zu den bestimmten Zeitpunkten betrachtet werden.

Die diskrete Simulation ist weiter grundsätzlich aufgrund des Fortschrittes der Simulationszeit als zeitgesteuert und ereignisgesteuert klassifiziert (s. Abbildung 2-1). Für die zeitgesteuerte Simulation werden die Änderungen während eines bestimmten Zeitraums fokussiert, z. B. die Finite-Elemente-Methode (FEM) -Simulation [Gün-2011]. Andererseits wird der Zeitverlauf nach Reihenfolge von Ereignissen gesteuert. Sobald

ein Ereignis während der Simulation vorbei ist, springt der Zeitverlauf auf dem Endzeitpunkt des Ereignisses. Die Ablaufsimulation in dieser Arbeit ist eine dynamische diskrete ereignisgesteuerte Simulation, oft auch als ereignisorientierte Ablaufsimulation oder „discrete event simulation“ (DES) bezeichnet, die für die Abbildung und Planung von Prozessen geeignet ist [Gün-2011].

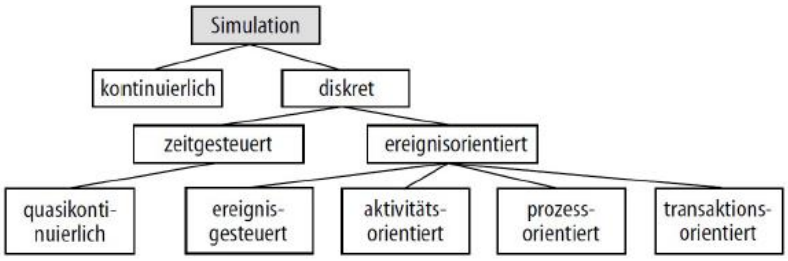


Abbildung 2-1: Klassifikation von dynamischen Simulationsmodellen [Arn-2008]

Die diskrete ereignisorientierte Simulation wird über Ereignisse, Prozesse und Aktivitäten (s. Abbildung 2-2) bezüglich des betrachteten Systems entwickelt [Tem-2018]. Dazu wird sie in prozessorientierte, aktivitätsorientierte und ereignisgesteuerte Simulation verfeinert.

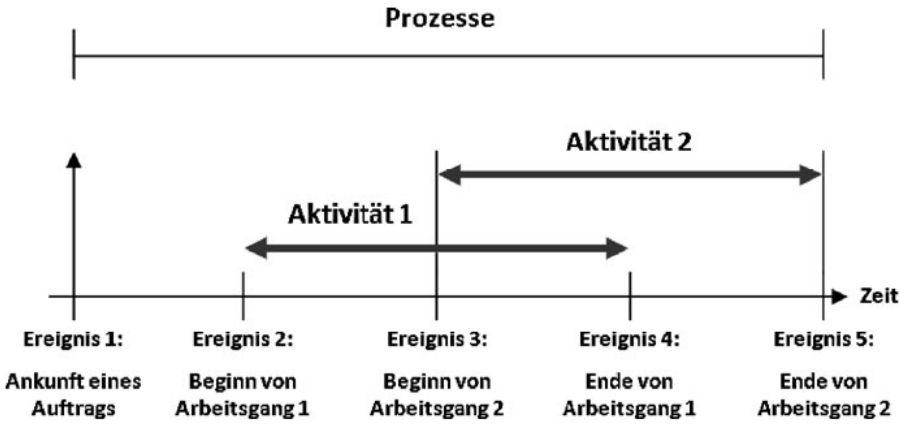


Abbildung 2-2: Prozesse, Aktivitäten und Ereignisse [Ele-2012]

Die Unterschiede dazwischen werden in den folgenden Sätzen nach Tempelmeier [Tem-2018] erklärt :

- Ein **Ereignis** tritt in einem Zeitpunkt ein, daher gibt es keinen Zeitverlust. Die Verteilung von Ereignissen des betrachteten Systems kann nicht äquidistant sein. Nicht nur der Zustand oder Ereignisse innerhalb des Modells, sondern auch außerhalb des Modells beeinflussen das Auftreten des folgenden Ereignisses. Der entstehende Zustand besteht im Simulationsmodell bis zum nächsten Eintritt des neuen Ereignisses.

- Eine **Aktivität** präsentiert den Zustand eines einzigen Objekts, dazu werden Anfangs- und Endereignis zur Charakterisierung bemerkt.

- Die Beschreibung einer zeitlich geordneten und inhaltlich zusammengehörigen Folge von Ergebnissen wird als ein **Prozess** bezeichnet. Normalerweise gehört diese Folge zu einem bestimmten Simulationselement.

Die ereignisorientierte Simulationsmethode ist besonders nützlich, um mit einem operativen System umzugehen, in dem die Aktivitäten einer komplexen Aktivierungsbedingung unterliegen [Mar-1994]. Bei einer prozessorientierten Simulation werden die interagierenden parallelen Prozesse organisiert, die einerseits Zustandsvariablen verändern, andererseits warten. In der ereignisgesteuerten Simulation wird eine Menge von Ereignissen nach der Reihenfolge auf der Simulationsuhr simuliert. Obwohl sie eine komplexere Modellierung ist, als die zwei andere, läuft das Modell schneller, somit kann Zeit während der Analyse und Optimierung gespart werden.

2.1.3 Simulatoren

Am Markt stehen heutzutage diverse Simulatoren (Synonyme: Simulationswerkzeug oder Simulationsinstrument) in Produktion und Logistik zur Unterstützung der Simulation zur Verfügung. Nach Wenzel [Wen-2018] werden die Simulationswerkzeuge in 7 Ebenen klassifiziert (s. Abbildung 2-3). Allgemeine Programmiersprachen wie C++, Simula oder Smalltalk, die keine Erweiterung oder Anpassung für simulationsspezifische Bedarfe bieten, stehen ganz unten [Gut-2017]. Obwohl es vielfaltige Möglichkeiten bietet, ist damit ein enormer Aufwand bei der Modellierung verbunden. Hier müssen sämtlichen Funktionen, Bausteine und Prozesse selbst entwickelt werden, das bedeutet einen großen Zeitaufwand. Im Gegensatz dazu stehen Spezialsimulatoren in der Spitze, die für unterschiedliche spezialisierte Simulationssysteme geeignet sind. Mit Hilfe dieser Simulatoren kann eine schnelle und anschauliche Simulationserstellung erfüllt werden, aber die Modellierung ist auf die jeweilig vorgegebene Funktionen beschränkt [Wim-2014]. Wenn ein Erweiterungsbedarf erwartet wird, könnte die Modellierung aufgrund des engen Anwendungsbereichs stark beeinflusst werden.

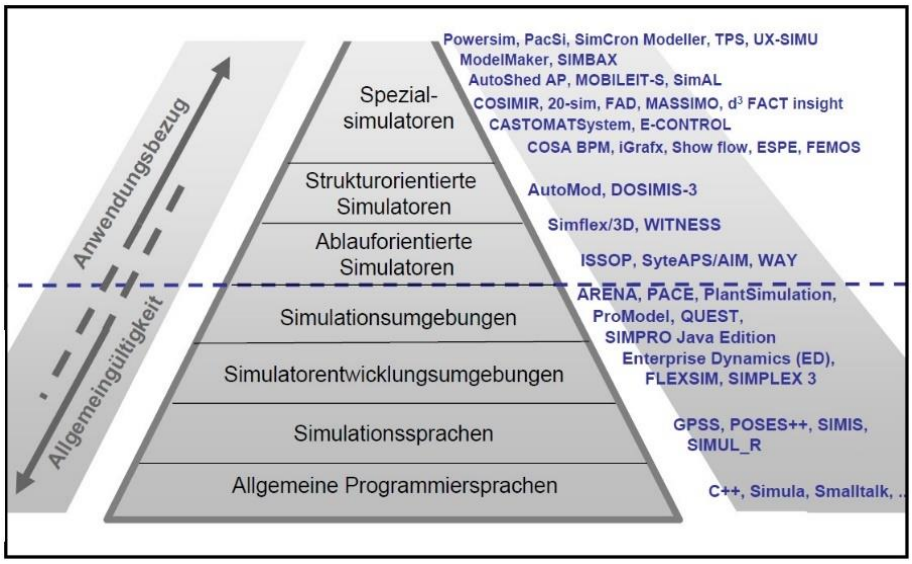


Abbildung 2-3: Auszug aus der Liste existierender Simulationswerkzeuge: Stand 2008 [Wen-2018]

Die bauspezifischen Simulatoren hat schon im letzten Jahrhundert in das Bauwesen einbezogen. Dafür entwickelte Halpin mit CYCLONE das erste bekannte Simulationssystem [Hal-1977]. CYCLONE ist in der Lage, ein zyklisches Netzwerk zu modellieren, aber es ist aufgrund der Unfähigkeit der Modellierung von Ressourcen beschränkt [Abo-2010]. Dieses und seiner Nachfolger STROBOSCOPE [Mar-1994] beruhen auf der ACD-basierten Simulation [Wim-2014]. STROBOSCOPE ist ein programmierbares und erweiterbares Simulationssystem, um die komplexen Bauarbeiten im Detail zu modellieren [Mar-1999]. Zur schellen Erstellung von CYCLONE-Modellen entwickelte Hajjar mit SIMPHONY eine allgemeine Simulationsumgebung, welche auch weitere Möglichkeiten wie die Erzeugung von Vorlagen für spezielle Anwendungsfälle bietet [Haj-1999; Eky-2012]. Xu et la. erweiterten SIMPHONY durch die Integration mit 3D CAD [Xu-1999]. Mit COSYE kann die Simulationsumgebung mit anderen Programmen in Echtzeit kommunizieren, bspw. Ist-Daten von der Baustelle zu integrieren oder die Informationen für die Visualisierung zu weiterreichen [Abo-2011].

Nach der Meinung von Law [Law-1989] gibt es sechs Merkmale, die für die Auswahl des passenden Simulators zur Analyse der Fertigungssysteme entscheidend sind:

- In erster Linie kommt die **Modellierungsflexibilität** in Betracht. Wenn das Simulationspaket über keine Fähigkeit für eine bestimmte Anwendung verfügt, muss es fähig sein, ein angenähertes Ergebnis im Modell zur Verfügung zu stehen.

- Für einen Simulator ist erwünscht, **allgemeine Attribute** zu haben, die zu jeder Zeit zu ändern sind.

- **Einfache Modellentwicklung** ist auch wichtig, um eine Untersuchung in einer kurzen Zeit zu erreichen.

- Genauigkeit und Geschwindigkeit der Simulationsstudie werden erhöht, wenn der Simulator **einen qualitativen Debugger** besitzt.

- **Eine schnelle Modellausführungsgeschwindigkeit** ist entscheidend, wenn das Simulationsmodell auf einem PC (Personal Computer) ausgeführt wird.

- **Die maximale Kapazität** des Modells bezüglich des angewendeten Simulators muss auch berücksichtigt werden.

Die für das Bauwesen entworfenen Simulatoren sind meist für einen bestimmten Anwendungsfall mit allgemeinen, nicht bauspezifischen Umgebungen entwickelt [Wim-2014]. Aber bei der Fabrikplanung bestehen bereits weit verbreitete Simulatoren (*Enterprise Dynamik* oder *Plant Simulation*) für die Modellierung von Fertigungsabläufen. Darin existieren vorgefertigte Simulationsbausteine für den Einsatz in der intralogistischen Umgebung. Durch den derartigen bausteinbasierten Aufbau ist es möglich, einer Großteil des Modellierungs- und Implementierungsaufwands für die Simulationserstellung in eine projektabhängige Phase vorzuverlagern [Gün-2011]. Um die bauliche Produktion effizient zu modellieren, müssen Tools oder Bausteine verwendet werden. Sie erfordern aber nur eine niedrige Anpassung für die einzelnen Bauprojekte [Ber-2013]. Die bereits für die Intralogistik bestehenden Bausteinsysteme können bei der Erstellung des Simulationsmodells eine grafische Darstellung und Parametrierung mehrere Bausteine beinhalten, damit der Modellierungsaufwand für einzelne Simulationsprojekte erheblich sinkt. Aber basierend auf diesen Systemen ist die Analyse der Abläufe von Baustellenfertigungen eingeschränkt. Daher werden aktuell die für die Anforderung im Bauwesen abgestimmten Bausteine in der Forschung erst erstellt, wobei diese bislang noch nicht standardisiert in kommerzielle Systeme integriert sind, sodass keine allgemeine Nutzung zur Verfügung steht [Gün-2011].

2.1.4 Vorgehensweise bei der Simulation

Mit den zunehmenden Anforderungen der Simulation ist zwingend, eine systematische Vorgehensweise zur Durchführung erforderlich. Dafür wird ein Vorgehensmodell mit Verifikation und Validierung (V&V) nach Rabe et la. verwendet (s. Abbildung 2-4).

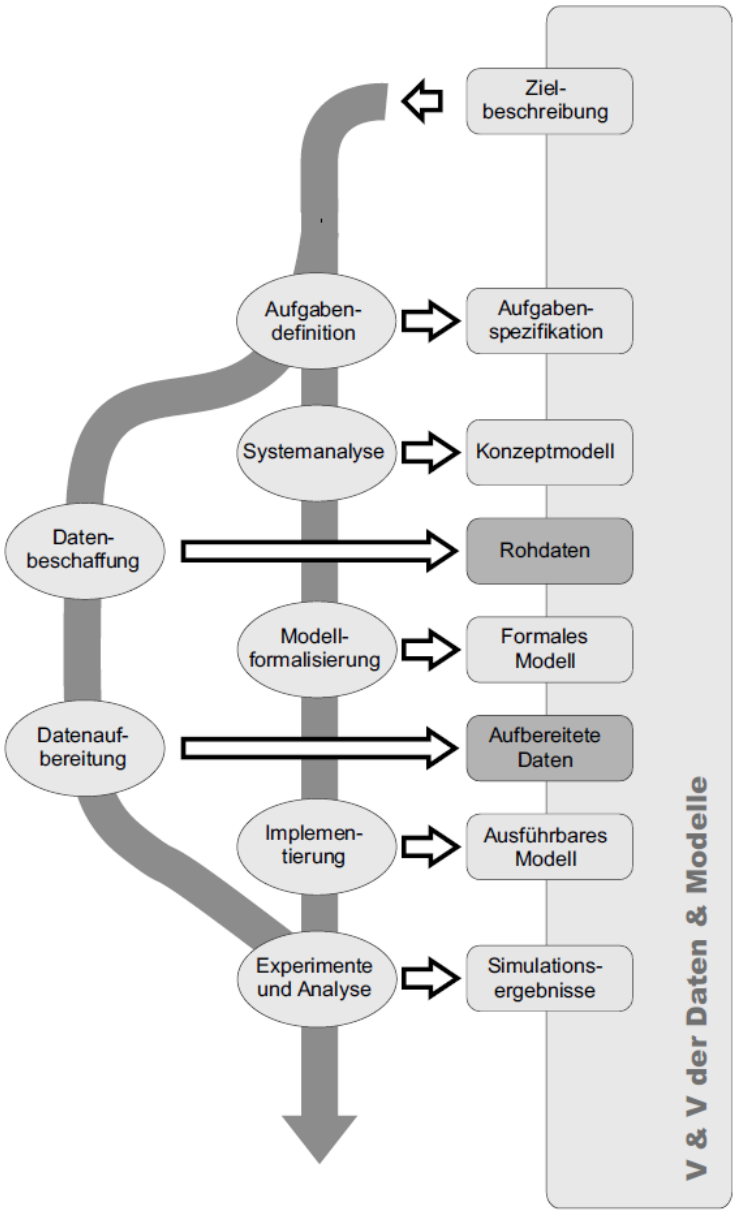


Abbildung 2-4: Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et la. [Rab-2008]

Im Vergleich zu anderen Vorgehensmodellen wie nach Balci [Bal-1989] und Sargent [Sar-1984] fokussiert dieses Simulationsvorgehensmodell noch die konsequente Einführung von Phasenergebnissen sowie die gesonderte Behandlung von Simulationsmodell und Daten [Rab-2008]. Darin gibt es zwei parallele Bearbeitungsbereiche. Einer

ist für die Datenverarbeitungen, und der zweite zielt auf die Modellbildung. Es gibt insgesamt fünf Phasen für die Definition der Modellierung: *Aufgabendefinition*, *Systemanalyse*, *Modellformalisierung*, *Implementierung* sowie *Experiment und Analyse*. Der Bereich der Datenverarbeitung wird in zwei Phasen gegliedert: *Datenbeschaffung* und *Datenaufbereitung*. Jede Phase liefert ein Phasenergebnis zur V&V. Weil Modelle zusätzlich selbst dokumentiert werden sollen, können die Phasenergebnisse Modelle und Dokumente oder eine Kombination von beiden sein. Die V&V ist hier nicht am Ende der Simulationsstudie implementiert, sondern begleitet sie während des ganzen Ablaufs.

Diese Vorgehensweise ist sinnvoll bei der ganzen Simulation. Eine sorgfältige Vorarbeit kann das Auftreten von Fehlern nicht vollständig verhindern. Wenn diese Fehler am Ende der Simulationsstudie häufen, kann das eine große Abweichung vom realen Ergebnis verursachen. Gleichzeitig ist es schwer, die Fehlerstellen zu positionieren. Wenn jedes Ergebnis während der Simulationsstudie überprüft werden kann, können nicht nur die Stellen der Fehler gekennzeichnet werden, sondern auch die gleichen Fehler in den nächsten Phasen innerhalb der Simulation vermieden werde.

2.2 Simulationsgestützte Bauablaufplanung

2.2.1 Aufbau des Simulationsmodells für den Bauablauf

Bauverfahren für gleiche Aufgaben sind immer gleich, werden aber an jeweiligen Randbedingungen anpasst, sodass standardisierte vorgefertigte Elemente im gleichen Bausystem für verschiedene Bauprojekte verwendet werden können. Diese Elemente werden häufig durch existierende Bausteine mit Attributen vom Simulator erstellt, die die wichtigen Funktionalitäten der bezeichneten Objekte besitzen und auch eine Visualisierung dafür präsentieren können. Zusammen definieren sie die Prozessketten eines Bauablaufs. Die wichtigen Elemente für einen Bauablauf werden im Folgende nach Eley [Ele-2012] detailliert erklärt.

Entität

Entitäten sind physikalische Objekte, die für einen Bauablauf verantwortlich sind. Eine Entität kann während eines Simulationslaufs immer bleiben gleich, z. B. eine Baustraßen oder eine öffentliche Straße. Dadurch werden verschiedene Baustellen verbunden. Im Gegensatz dazu können Entitäten, die während eines Simulationslaufs vom Simulationsprogramm erzeugt werden, beim Simulationslauf wieder vernichtet werden. Um die Ausführung des Bauprojekts anschaulich zu machen, ist es bei der Simulation möglich, nur die derzeit arbeitenden Baustellen zu zeigen. Dies könnte auch

durch die Änderung der Farbe oder der Form realisiert werden, die die Statusänderung der Entität darstellt.

Ressourcen

Ressourcen werden nach ihren Eigenschaften in zwei Gruppen, wiederverwendbare (z. B. Baugerät oder Betonmischer) und nicht wiederverwendbare Ressourcen (z. B. Beton), unterteilt. Der Unterschied dazwischen liegt darin, ob sie nach dem Anspruch von Entitäten noch existieren. Die Menge von Ressourcen innerhalb eines Bauprojekts sind meist beschränkt. Wenn es keine verfügbaren Ressourcen für den nächsten auszuführenden Prozess gibt, kann eine Verzögerung des Bauablaufs oder ein Wechsel der Reihenfolge der Prozesse eintreten.

Warteschlangen

Warteraum (z. B. Lager) handelt es sich um Warteschlangen, die eine besondere Art von Ressourcen darstellen. Alle vorhandenen und nicht bearbeiteten Ressourcen werden in Warteräume gelegt. Nach der Art von Ressourcen können verschiedene Warteräume in einem Projekt existieren. Nach vorgegebenen Regeln erfolgt die Abarbeitung der Warteschlangen; damit ermöglichen sie eine Umsortierung, d. h. eine Änderung der Reihenfolge [Ele-2012].

Zeitliste

In einer Zeitliste werden Prozesse, Ereignisse oder Aktivitäten mit ihren definierten Startzeitpunkten, Endzeitpunkten oder ihrer Dauer nach einer bestimmten Reihenfolge verwaltet, manchmal werden auch Nachfolger- oder Vorgänger-Beziehungen beigefügt. Diese Verwaltung wird bei der Ausführung als Randbedingung gekennzeichnet. Die Form für verschiedenen Bauprojekte kann gleich sein, damit ist ein Integriert gleichförmiges Datenformat zu verwenden. In der dynamischen diskreten Ablaufsimulation werden die in der Zeitliste aufgelisteten Prozessen chronologisch durchgeführt. Nur wenn alle Prozesse beenden oder das Ende des Simulationszeitraums erreicht ist, endet die Ablaufsimulation.

Variablen und Methoden

Variablen und Methoden sind wichtige Elemente zur Verbindung der verschiedenen Elemente. Variablen speichern die Informationen, die für einen Bauablauf erfordlich sind. Sie können universal sein, wenn sie für den ganzen Bauablauf zuständig sind. Planung und Steuerung von Prozessen innerhalb der Simulation sind durch Methoden

zu realisieren; dabei werden eine Anpassungsfähigkeit, die Darstellung paralleler Vorgänge, die Erfassung plötzlicher Störungen sowie stochastische bzw. unscharfe Parameter zugelassen. Die gleichen oder ähnliche Funktionalitäten wirken häufig durch gleiche Logik, somit wird viel Aufwand bei sich wiederholenden Arbeiten gespart.

Zufallszahlen

Die Zufallszahlen sind für die Abbildung der Zufallsprozesse wie beispielsweise des störungsbedingten Ausfalls einer Maschine oder der unbekannten Kundennachfrage verantwortlich. Diese Zahlen werden gemäß vorgegebenen statistischen Verteilungen erzeugt.

2.2.2 Verschiedene Modellierungsansätze für die Bauablaufplanung

2.2.2.1 Zyklische Ansätze für die Bauablaufplanung

Speziell im maschinenintensiven Bauablauf treten häufig zyklische Arbeiten auf. Beim Spezialtiefbau bspw., der in der vorliegenden Arbeit näher betrachtet wird, ist die Pfahlherstellung selbst iterierend. Um die zyklischen Bauarbeiten abzubilden, gibt es in der Literatur verschiedenen Ansätze, die im Folgende erläutert werden.

ACD-basierte Simulation

Activity Cycle Diagrams (ACD) repräsentiert das aktivitätsorientierte Paradigma der diskreten Simulation. ACD ist eine Art der Modellierung zur Interaktion von Entitäten des Systems und eignet sich besonders für Probleme mit einer starken Warteschlangenstruktur [Pau-1993]. Die Entitäten sind zusammen für die Ausführung von Aktivitäten verantwortlich. Nach einer Aktivität wird die Entität solange in eine Warteschlange gestellt, bis ein Anspruch der anderen oder der gleichen Aktivität erzwungen wird.

ACD bietet nur zwei Symbole, die zusammen den Lebenszyklus einer Entität beschreiben. Der Kreis repräsentiert die Warteschlangen, gleichzeitig repräsentiert das Rechteck die Aktivitäten. Die Abbildung 2-5 zeigt ein ACD für einen vereinfachte Erdbauprozess. Im realen Bauprojekt ist es nicht ausreichend, die komplexe Bauausführung durch zwei Symbole zu beschreiben. Wenn eine einzelne Aktivität einer Entität durch eine andere Entität vorzeitig beendet oder verzögert wird, dann erreicht die Modellierung in ACD ihre Grenzen [Wim-2014].

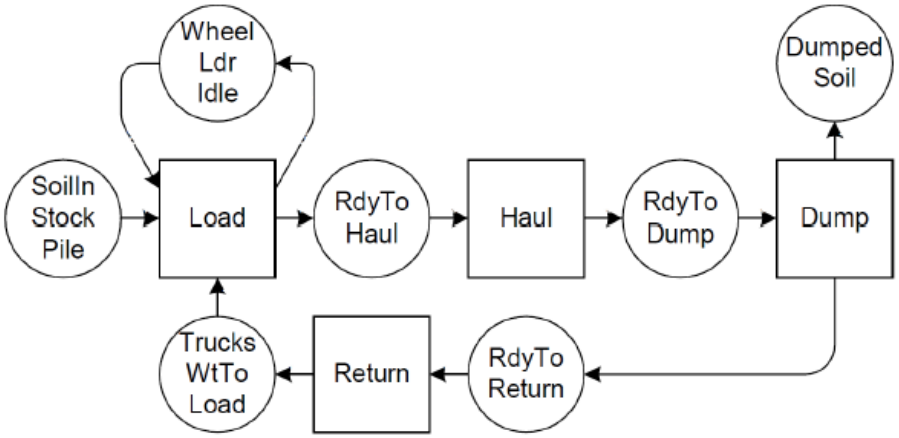


Abbildung 2-5: Einfaches Activity Cycle Diagram für einen Erdbauprozess [Wim-2014]

Petri-Netze-basierte Simulation

Die Modellierungstechnik „Petri-Netze“ hat die Fähigkeit, zyklische Bauarbeiten grafisch anschaulich abzubilden [Fra-1999]. Sie bestehen aus Zuständen (Plätze) und Übergängen (Transitionen), die durch gerichtete Kanten verknüpft werden [Bau-1996]. Der aktuelle Zustand des Modells wird durch Marken (engl. Token), die direkt auf den Plätzen liegen, dargestellt.

Die Ausführung einer Transition basiert auf der Verfügbarkeit von benötigten Marken. Wenn alle benötigten Marken verfügbar sind, werden sie zuerst auf den Plätzen gelöscht, dann auf den nachfolgenden Plätzen erzeugt. Jeder Übergang besitzt eine gewisse Dauer. Dies generiert den Fortschritt der Simulationsuhr. Auf diese Weise regt das die Zustandsänderung eines Systems in einem angepassten Simulationszeitraum an. Die Abbildung 2-6 zeigt ein einfaches Beispiel im Erdbau. Darin werden zwei Teilnetze abgebildet. Eins repräsentiert den Bagger, das andere den LKW. Beide sind durch die Transition Aufladen verknüpft. Der Bagger wird sich drehen, gleichzeitig wird der LKW seine Position zum Aufladen ändern.

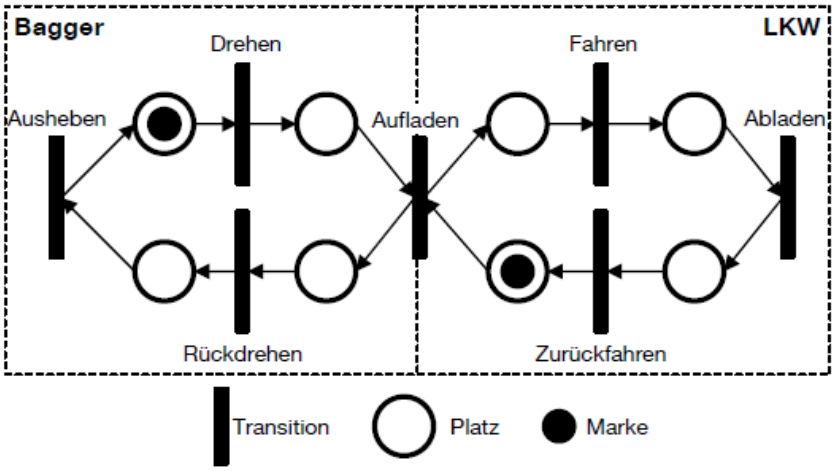


Abbildung 2-6: Beispiel eines einfachen Petri-Netzes [Gün-2011] .

Die Komplexität eines Bauprojekts erhöht den Schwierigkeitsgrad der manuellen Modellierung. Mit Petri-Netze ist diese Arbeit stark zu verringern, es wird jedoch eine grafische Abbildung des Systems dazu erstellt. Somit ist es sinnvoll, dass eine automatisierte Modellierung mit verschiedenen Teilnetzen zu höheren Petri-Netzen abgebildet wird.

2.2.2.2 Ereignisdiskrete Simulation (DES)

Seit Jahren dringt DES in der Simulationsstudie im Bauwesen weiter vor. Sie wird als Standardmethode für die Bausimulation angesehen [Al--2019]. Mit dem Einsatz von DES wird die Struktur des betrachteten Systems durch verschiedene Bausteine modelliert. Dies ist eine vereinfachte Visualisierung, dadurch werden verschiedene Szenarien untersucht. Der Grund dafür ist, dass die modellierten Entitäten und Ressourcen nicht in der Lage sind, selbst miteinander zu interagieren. Die Methoden kontrollieren die Änderung von verantwortlichen Variablen, somit generieren sie die Zustandsänderungen von Bausteinen. Die Informationen über Ereignisse werden in einer Datenbank gespeichert. Die Simulationsprogramme analysieren die Beziehung dazwischen und die Randbedingungen des Systems, daraus wird das zuerst ausgeführte Ereignis ausgesucht. Während der Prozess fortschreitet und sich die Randbedingungen ändern, werden die nachfolgenden Ereignisse ausgelöst.

Shou et la. [Sho-2019] hat die Vorteile der Anwendung von DES im Bauwesen systematisch zusammengefasst:

- Visualisierung des untergesuchten Systems
- Analyse und Bewertung der eingesetzten Produktionsstrategie

- Bewertung des Änderungsbedarfs basierend auf Experimenten mit verschiedenen Szenarien

- Testen und Bewerten von Auswirkungen und Leistungen von angewendeten Maßnahmen

- Validierung der Ergebnisse aus dem Live-Experiment

- Entscheidungsunterstützung

Trotz der oben genannten Vorteile bringt DES einige Einschränkungen. Jede Änderung innerhalb der Simulation wird durch eine zentrale Steuerung kontrolliert, deshalb werden das subjektive Verhalten und Änderungen nicht betrachtet. Aufgrund der Vereinfachung des Systems ist DES nicht fähig, die reale Situation vorbehaltlos zu repräsentieren. Daher ist es unvermeidlich, einige Faktoren zu ignorieren, die wenig Einfluss auf den Ablauf haben.

Bei Unsicherheiten werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Analyse verwendet. Solch ungenaue Eingabe hat meist eine nicht überzeugende Aussage. Bei der DES wird die statische Wahrscheinlichkeitsverteilung angewendet, die auf der Analyse von vergangenen ähnlichen Projekten unter der zugrundeliegenden Annahme basiert, dass die jeweiligen Arbeitsaufgaben innerhalb bestimmter Industriezweige gemeinsam und deshalb aus bisherigen Erfahrungen leicht auf das aktuelle Projekt übertragbar sind [Li-2021]. Die erfassten Daten basieren auf bestimmten Arten, Kapazitäten oder anderen Bedingungen von Baumaschinen. Wenn diese Voraussetzungen sich im betrachteten System ändern, gibt es Schwankungen von Parametern, folglich werden die Ergebnisse beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Annahme fraglich, weil sie nicht der Tatsache entspricht.

Aufgrund der Einschränkungen der DES werden häufig andere Simulationsmethoden, z. B. Agentenbasierte Modellierung (ABM) (s. Abschnitt 2.2.2.3) und Hybrid-Simulation (s. Abschnitt 2.2.2.5), als Unterstützung genommen, um Fehler und Schwankungen der Ergebnisse in DES zu kompensieren.

2.2.2.3 Agentenbasierte Modellierung (ABM)

Aufgrund der Einzigartigkeit jedes Bauprojekts ist die modulare Modellierung des realen Systems für die Simulationsstudie empfehlenswert, die eine hohe Flexibilität und einen niedrigen Entwicklungsaufwand bietet. Dynamische Bauprozesse und hohe In-

teraktion der Beteiligten generieren diverse Herangehensweisen bezüglich eines Einsatzes von Agenten im Bauwesen [Hor-2014]. Dieser Bottom-up-Modellierungsansatz repräsentiert eine dezentrale Darstellung für das untersuchte System. Das ABM-basierte Simulationsmodell besteht aus 3 grundlegenden Bausteinen [Rob-2014; Gal-2018]:

- Agenten: Einheiten zur Analyse; sie repräsentieren die Individuen, die miteinander oder mit ihrer Umgebung interagieren.

- Zustände: repräsentieren die Eigenschaften von Agenten, die die Aktion und Reaktion von Agenten definieren. Sie ändern sich nach gewissen Regeln oder der Zeit.

- Umgebung: räumliche und ggf. zeitliche Grenzen, innerhalb derer die Agenten agieren.

Nwana [Nwa-1996] fasst die drei Eigenschaften Autonomie, Kooperation und Lernen für Agenten zusammen, von denen mindestens zwei zu erfüllen sind. Autonomie von Agenten heißt, dass Agenten proaktiv sind, ihre internen Zustände und Ziele zu verfolgen. Kooperation ist obligatorisch, wenn das System mehrere Agenten besitzt. Dazu gibt es eine Möglichkeit zur Interaktion zwischen Agenten oder zwischen Agenten und Umgebung. Agenten können auch intelligent sein, wenn sie aus Reaktionen und / oder Interaktionen mit der Umgebung lernen, um in ähnlichen Situationen ideal zu handeln.

Wegen der dezentralen Struktur von ABM verteilt sich das Problem in Teilprobleme. So eine Problemlösungsstrategie ist für ein komplexes System vorteilhaft. Agenten zielen auf die Lösung von Teilproblemen durch ihr autonomes, zielorientiertes Verhalten ab, und ermöglichen auch eine Verbesserung des Gesamtsystems durch deren Kombination [Hor-2014]. Daher hilft ABM auch dem Simulationsforscher bei der Modellierung und Nacharbeit. Es ist möglich, die einzelnen Entitäten zu verändern, und es erscheint gleichzeitig eine gute Akzeptabilität der Umgebung. Ein derartiges offenes System ist kompatibel für eine spätere Optimierung, wenn ein neuer Bedarf kommt. Die neuen Funktionalitäten können basierend auf dem agentenbasierten System durch neue Agenten realisiert werden, damit fokussieren Simulationsforscher die Anpassungsmöglichkeit nur über die Interaktion mit anderen Agenten und der Umgebung.

ABM ist auch vorteilhaft für das dynamische System, indem der Verlauf der Zeit berücksichtigt wird. ABM-Modellen können diskret, kontinuierlich oder eine Mischung daraus implementiert werden, weil es keine spezifische Konvention über den zeitlichen Verlauf und den Übergang zwischen den Zuständen gibt. Die diskrete Simulation wird

in ABM als asynchroner Fall bezeichnet, wobei die Zeitverzögerung beim Eintritt eines neuen Zustandes jedes Mal neu berechnet wird. Basierend auf dieser Weise sind ABM-Modelle fähig, vielfältige Interventionen sowohl auf der individuellen Ebene als auch auf der Systemebene zu definieren, was zu einer leistungsstarken Simulationsplattform für die Untersuchung des Systemverhaltens führt. [Jab-2017; Mat-2018; Gal-2018]

2.2.2.4 Echtzeit-Simulation

In der Echtzeit-Simulation müssen die Prozesse an die gestellten Echtzeitanforderungen anpasst werden. Es wird auch die physikalische Umgebung eines Systems in das Modell einbezogen, um Umwelteinflüsse bezüglich des Ablaufs zu simulieren. Im Bereich der Verplanung von Prozessen wird Echtzeit vorrangig als diskrete Größe in zählbaren Einheiten einer wie auch immer definierten Bezugszeitspanne modelliert [Zöb-2020]. Die wichtigen Ziele bei einer Echtzeit-Simulation sind [TEA-2021]:

- Funktionsüberprüfung/Funktionsnachweis
- Auslastung des Gesamtsystems, der Teilsysteme, der Arbeitsbereiche
- Leistungsgrenzen/Leistungsengpässe
- Layoutoptimierungen
- Dynamisches Verhalten des Teil-/Gesamtsystems
- Auftragsdurchlaufzeiten (min, max, Ø)
- Konkrete Hinweise zur Layout-, Bestands- und Prozessoptimierung
- Überprüfung und Bewertung von Steuer- oder Lagerstrategien
- Auswirkungen der Auftragsstruktur und -mengen

Aufgrund der Komplexitäten von Bauarbeiten ist es schwer zu wissen, welche Kombination von Ressourcen die beste Option ist. Diese prozessorientierte Simulation ist nützlich vor der Ausführung eines Bauprojekts, somit werden die geplanten Abläufe mit verschiedenen Modi überprüft. Dadurch bekommt der Bauleiter die günstigste Variante. Ziel dafür ist, die Nutzungsrate von Ressourcen und Räumen unter Berücksichtigung von realen Situationen zu optimieren. Oder der Simulationsforscher untersucht

die verschiedenen Algorithmen in der gleichen Umgebung, Um zu einer Optimierung der Simulationsmodell zu bekommen, wobei die simulierten Ergebnisse an die Realität angepasst werden. Durch frühzeitige Erkennung von Fehlern bei der Simulation werden die kostenintensive Auslegungsfehler vermieden. Dies hilft auch, Ergebnisse mit höherer Genauigkeit zu erhalten. Eine wirtschaftliche Bauausführung wird bei der Überprüfung des zu erarbeitenden Betriebskonzepts folglich abgesichert.

2.2.2.5 Hybrid-Simulation

In Gegensatz zur vorgestellten Simulationsmethodik ist die Hybrid-Simulation nicht individuell, sondern eine Kombination von meist zwei grundlegenden Simulationsmethoden. Um eine genauere und umfassende Modellierung des betrachteten Systems zu untersuchen, ist die Möglichkeit der Hybrid- bzw. Multi-Mode-Modellierung einzubeziehen [Mat-2018]. Für die Simulation, die eine Abstraktion des realen Systems darstellt, werden drei Abstraktionsebenen definiert: die hohe Abstraktion (Makroebene), mittlere Abstraktion (Mesoebene) und niedrige Abstraktion (Mikroebene) [Al--2019]. Mithilfe der hybriden Simulation wird das zu untersuchende System bei einer Simulationsstudie sowohl auf der Makro- als auch auf der Mikroebene betrachtet, was zu einem umfassenden Verständnis des Systems führt [Xu-2018]. DES fokussiert auf der Simulation jedes Objekts; innerhalb durch eine individuelle Entität oder Ressource arbeitet sie mit einen niedrigen Abstraktionsniveau [Li-2021]. ABM gehört jedoch zu keinem bestimmten Abstraktionsniveau. Nach dem Ziel der Untersuchung kann ABM irgendein Abstraktionsniveau annehmen.

Abstraktionslevel	**Beispielanwendungen der Simulationsmodelle**	**Paradigmen**
Hohe Abstraktion/ Makro Level/ strategisches Level /niedriger Detailierungsgrad	• Bevölkerungsdynamik • Ökosysteme • Gesundheitsökonomie • Arbeitskräfte und Personal • Marktplatz und Wettbewerb	ABM & SD
Mittlere Abstraktion/ Meso Level/ taktisches Level/ mittlerer Detailierungsgrad	• R & D Projektmanagement • Lieferketten • Abfallsmanagement • Transport • Stromnetz • Call center • Notfallzentralen	ABM & DES
Niedrige Abstraktion/ Mikro Level/ operationelles Level/ Hoher Detailierungsgrad	• Fußgängerbewegung • Lagerhäuser • Fabriketagen • Kfz-Steuerungssystem • Computer-Hardware	ABM & DES

Abbildung 2-7: Abstraktionsniveau und Anwendungsbereiche der hybriden Simulation [Al--2019]

Die Mitte der Abbildung 2-7 zeigt, dass ein Paradigma der Hybrid-Simulation eine Kombination von ABM und DES ist, wenn sich der Anwendungsbereich der Simulationsstudie auf Materialfluss und Logistik ausrichtet. Das Bauprojektmanagement teilt

sich in das strategischen Baukontextmanagement und des operative Bauoperationsmanagement [Lee-2007]. Das strategische Baukontextmanagement zielt ab auf die Anpassung von Zeit und Kosten und die Organisation von Ressourcen, deshalb arbeitet es auf der Makroebene mit einem niedrigen Detaillierungsgrad. Der Baukontext interagiert mit der Bauoperation und ändert sich dynamisch aus der Rückkopplung zwischen Baukontext und Bauoperation, daher befindet sich der Baukontext meist auf der Organisationsebene, insbesondere bei großen Bauprojekten [Li-2021; Lee-2009]. Im Gegensatz dazu zielt das Bauoperationsmanagement auf die Operation des einzelnen Prozesses mit unterschiedlichen Aktivitäten, daher arbeitet es auf der Mikroebene mit einem höheren Detaillierungsgrad. Bei der hybriden ABM-DES-Simulation können individuelle Bauprojekte wie Organisation von Ressourcen und Räumen und die Optimierung der Planung durch ABM, und Aktivitäten, Prozesse und Projektumgebung durch DES modelliert werden; daraus resultierend ist eine Integration von beiden Simulationen auszurichten.

2.2.3 Interaktion zwischen den Simulationsmodellen

Die DES bietet eine Unterstützung für die Bauablaufplanung durch Vorhersagen des zukünftigen Zustands vom realen Konstruktionssystem, wofür Simulationsmodelle basierend auf realen Systemen mit realen Statistiken und Bauarbeiten entwickelt werden müssen [Al--2019]. Hier wird ein hierarchischer Ansatz verwendet, um die Ablaufplanung zu erleichtern und Bearbeitungszeit zu sparen. Auf der Makroebene wird der originale Zeitplan importiert, um die Reihenfolge des Bauablaufs bereitzustellen; dazu werden eine Einschränkung der Ressourcen und Räume und die Beziehungen zwischen den Prozessen berücksichtigt. In der Realität folgen die Bauarbeiten diesem geplanten Terminplan nicht. Ungesicherten Störungen während der Bauausführung führen dazu, dass viel Wert auf dem Import von relevanten Informationen über den aktuellen Fortschritt gelegt wird. Bei Bedarf ist es möglich, diesen Vorgang auf eine Ebene mit einem höheren Detaillierungsgrad zu verschieben. Auf der Mikroebene könnte der Prozess aus der Makroebene in Subprozessen untergeteilt werden; damit werden die ignorierten Informationen in der Makroebene hinzugefügt.

Die Abbildung 2-8 zeigt die Interaktionen zwischen den Simulationsmodellen, die zu unterschiedlichen Ebene gehören. Die Simulationsprogramme der Makrosimulation starten einen Prozess in Bezug auf seine Vorgänger oder ab einem festgelegten Datum. Wenn ein Prozess nicht weiter ins Detail geht, wird er als Zeitverbrauch modelliert. Der Zeitverbrauch kann durch die Monte-Carlo Simulation bestimmt werden[Hor-2012]. Damit werden die Informationen über die Verfügbarkeit von allen benötigen Ressourcen nachgeprüft. Falls alle Vorgänger fertig sind und die Voraussetzungen

erfüllt sind, ist der Prozess ausführbar. In der Mikrosimulation werden die verschiedenen grundlegenden Aktivitäten simuliert. Die Änderung von Aktivitäten generiert einen neuen Zustand. Am Ende der Mikrosimulation werden alle benötigten Simulationen zum Management ausgegeben, somit ist eine Anpassung an die Mikrosimulation auf der Makroebene erreicht.

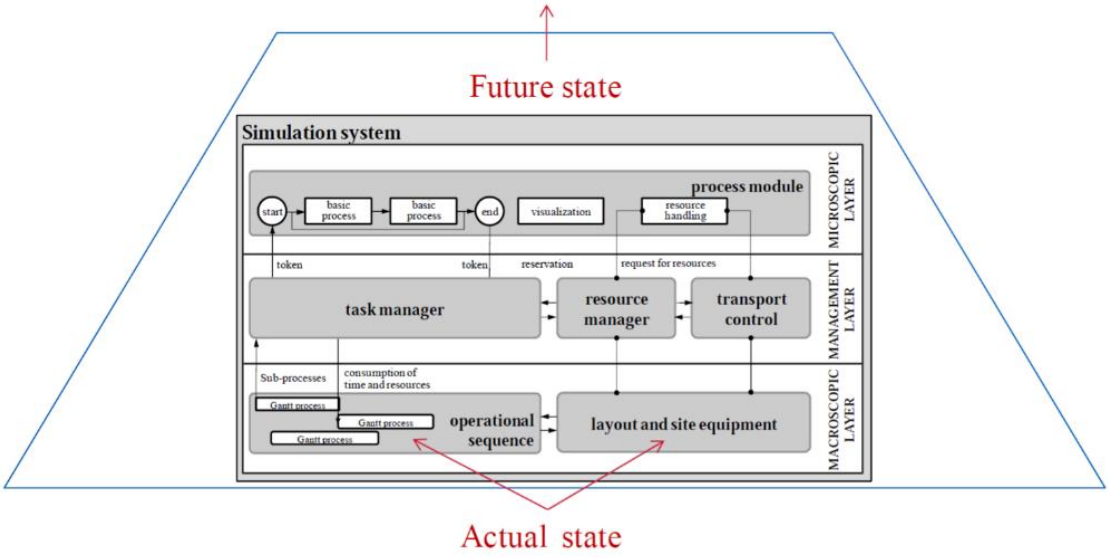


Abbildung 2-8: Interaktion zwischen den Modellen innerhalb der Simulation [Hor-2012]

2.3 Integration von Bauschrittdaten in die Simulation

2.3.1 Building Information Modelling (BIM)

Im Tiefbau hat die Anwendung von Simulationenen zur Unterstützung der Bauplanung in den letzten Jahren zugenommen. Aufgrund dieser Entwicklung wird Building Information Modelling (BIM) bei der Planung von Bauprozessen in Betracht gezogen. BIM ist ein intelligenter, auf dreidimensional(3D)-Modellen basierender Prozess, wobei die Informationen zu einem Bauprojekt über den gesamten Projektlebenszyklus verwaltet werden [Li-2021]. Das Bauprojekt wird durch das BIM mit digitalen Daten vollständig beschrieben, daraus erfolgen Einblicke und Werkzeuge für die Fachleute im Bauwesen, um effiziente Planung, Entwurf und Konstruktion des Bauprojekts zu verwalten. Wegen seiner Eigenschaften ermöglicht BIM auch den virtuellen Bau einer Anlage statt den physikalischen Bau in der Realität, um Unsicherheiten zu verringern, die Sicherheit zu verbessern, Probleme zu lösen sowie mögliche Auswirkungen zu simulieren und zu analysieren [Kon-2012].

Die Anwendungsvorteile der BIM-Technik im Vergleich zur herkömmlichen Technik werden nach Li et la. [Li-2017] in folgenden Sätzen zusammengefasst:

- **3D-Modellierung**: Die traditionelle Planverwaltung von Prozessen basiert auf den zweidimensionalen(2D) Zeichnungen für Analyse, Konstruktion und andere Arbeiten. Das BIM kann die 3D-Visualisierung des Projekts in der gegenwärtigen Phase anzeigen. Sie zeigt nicht nur das Projektmodell in 3D an, sondern zeigt auch, dass der Aufbau des Projektmanagements eine 3D-Anordnung des Stahleffekts darstellt.

- **Integration**: Beim traditionellen Fall wird das Kollisionsproblem zwischen den Bauteilen und jedem Fachmann innerhalb der Konstruktion oder nach der Konstruktion angezeigt, was sich direkt auf den reibungslosen Ablauf der Bauzeit auswirkt. Das 3D-Modell aus verschiedenen Fachleuten kann durch das BIM integriert werden, wobei die Kollisionsprüfung vor dem Bau durchgeführt und die Konstruktionsfehler ermittelt werden, die durch einen Teil des Kollisionsproblems verursacht werden.

- **Verknüpfung**: Beim herkömmlichen Fall werden nur die ausgewählten Prüfpunkte und der tatsächliche Baufortschritt im Zeitplan vermerkt. Im Gegensatz dazu listet BIM das zugehörige Modell, um einen Kapitalvergleich in Echtzeit zu erzielen sowie Ressourcen und Kosten zu überwachen.

- **Informationsmanagement**: Das BIM kann die Qualitäts- und Sicherheitsprobleme direkt mit der Bezeichnung im 3D-Modell verknüpfen. Im Vergleich dazu werden diese Probleme bei der traditionalen Verwaltung schriftlich aufgezeichnet.

Dies ermöglicht die Anwendung in der DES. DES kann die Daten von BIM wie Produkt- und Prozessinformation direkt annehmen, damit werden die Konstruktionsleistungen evaluiert oder Entscheidungen mit den Rückmeldungen unterstützt. Bei einem großen Bauprojekt treten Störungen wegen der großen Anzahl von Beteiligten und ungesicherten Umwelteinflüssen meist plötzlich auf. Allerdings bietet BIM die Möglichkeit, auf komplizierte Zusammenspiele und Unsicherheiten bei der Bauausführung besser zu reagieren, was für die Bauwirtschaft eine entscheidende Rolle spielt.

2.3.2 Tracking and Tracing (TaT)

Tracking and Tracing ist eine Methodik, die im Bereich Materialfluss und Logistik häufig angewendet wird, wobei der aktuelle und vorherigen Standort eines Gegenstands oder einer Eingeschalten mit anderen Informationen gekennzeichnet wird und gleichzeitig die Nachverfolgung des Ablaufs zur Verfügung gestellt wird. Dazu gibt es drei wichtige

betreffende Technologien: Barcode-Technologie, Radio Frequency Identification (RFID) und GPS-Technologie [Ji-2020].

Der Barcode besteht aus verschieden breiten, parallelen Strichen und Lücken. Er ist eine optische Identifikationstechnik, gehört zu den automatischen Identifikationssystemen (Auto-ID Systeme), um Material- und Informationsfluss zu verknüpfen. Das Lesen des Barcodes erfolgt dabei über Handgeräte. Aufgrund der Standardisierung wird die Barcode-Technologie als ein preiswerter Datenträger betrachtet.

RFID ist eine elektromagnetische Identifikationstechnik und gehört auch zu den Auto-ID Systemen. Im Wesentlichen zählen der Transponder, die Schreib-/ Leseeinheit mit Reader, Antennenkabel und Antenne sowie die steuernde Software-Applikation dazu. Zum Lesen sendet das Schreib-/ Lesegerät ein Signal über die Antenne zum Transponder. Dann nutzt der Transponder das Signal zum Betrieb. Endlich kommuniziert der Transponder mit dem Schreib-/ Lesegeräte und antwortet den angeforderten Daten. Im Vergleich zur Barcode-Technologie kann die RFID-Technologie die Informationsdaten automatisiert erfassen und unter rauen Bedingungen einwandfrei funktionieren [Li-2021], damit wird der Anwendungsbereich erweitert. In der Bauindustrie wird RFID eingesetzt, um die Informationen über die Baustelle in Echtzeiten zu erfassen und später die bezügliche Simulationsstudie anzuwenden [Alt-2018].

Global Position System (GPS) verfügt über die Positionsbestimmung durch das globale Navigationssatellitensystem. Die GPS-Technologie ist in vielen Bereichen im Bauwesen nützlich, z. B. für die Disposition von Baumaschinen, die mobile Arbeitszeiterfassung, Verwaltung oder Baudokumentation [Ji-2020].

Die Abbildung 2-9 zeigt ein Beispiel für die Lokalisierung von Maschinen mittels GPS-Daten. Hier eine Gate-basierte Anwendung für die Verarbeitung von GPS-Daten. Jedes Mal, wenn der GPS-Datenstrom ein virtuelles Gate passiert, wird er aufgeteilt und der Zeitpunkt gemerkt. Daher kann die Umlaufzeit von Transportfahrzeugen durch das Passieren gemessen werden. Wenn alle verfügbaren Transportfahrzeugen berücksichtigt werden, sind die Massenbewegungen der Baustelle berechenbar, somit kann direkt auf den Baufortschritt geschlossen werden [Hor-2012].

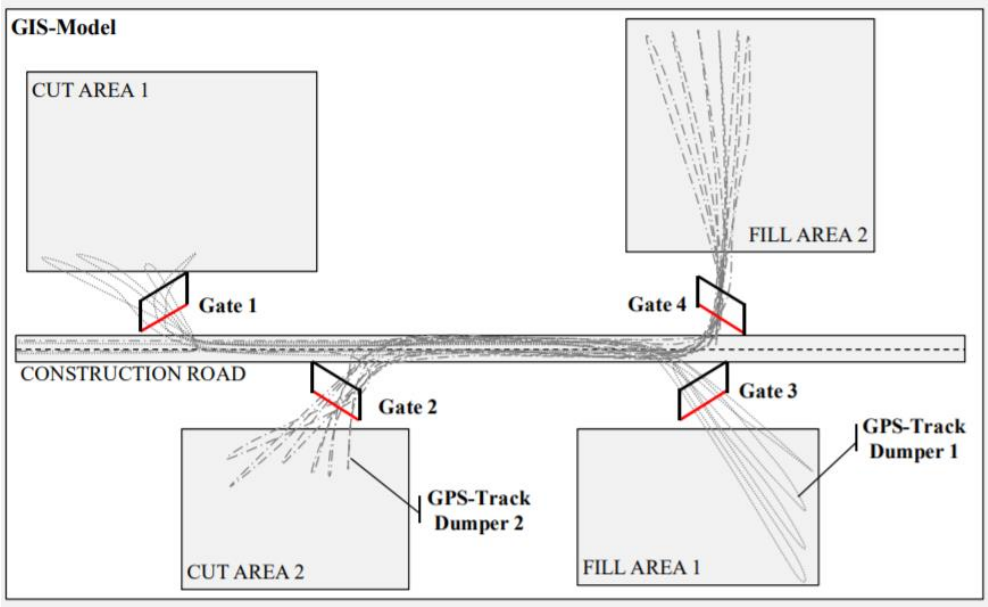


Abbildung 2-9: Konzept für GPS-Tracking von Fahrzeugen [Hor-2012]

2.3.3 Maschinendaten

Maschinendaten sind maschinengenerierte Daten oder maschinenlesbare codierte Informationen, die von einer Datenverarbeitungsanlage automatisch erzeugt und verarbeitet werden [Mül-2019]. Das können Prozess- oder Produktdaten sein. Prozessdaten sind die Informationen, die für den Betrieb der Maschine verantwortlich sind oder direkt durch den Betrieb erzeugt werden. Produktdaten umfassen die Informationen über das Produkt oder den Produktionsverlauf.

Maschinendaten ermöglicht, einen Überblick des aktuellen Stands auf der Maschine zu erhalten. Beispielsweise können die mit Sensoren ausgestatteten Drehbohrgeräte die Bohrparameter wie Vorschubkraft, Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl und Druck am Bohrantrieb in Abhängigkeit der Bohrtiefe erfassen [Sch-2019]. Die Verknüpfung zwischen Maschinendaten und der zentrale Datenplattform können durch Auto-ID-Technologie hergestellt, somit werden Informationen der Baustelle automatisch übermittelt [Gün-2010]. Daher ermöglicht dies die Kombination der Ist-Daten der Baustelle mit den Plandaten. Im Gegensatz zur papierbasierten Ausführungsphase stellt die digitalisierte Phase eine steigende Datenqualität und -aktualität zur Verfügung, sodass die Transparenz der Prozesse auf der Baustelle insgesamt erhöht wird [Gün-2010].

Um eine virtuelle Baustelle in der Simulationsumgebung sinnvoll abzubilden, müssen der Ablauf des Projekts und die Eigenschaften von Beteiligten an die aufgenommenen Maschinendaten angepasst werden, somit wird eine Steuerung von Bauaktivitäten ermöglicht. In erster Linie sind dies Steuerungsdaten. Darin zeigt sich, wie die Ausfüh-

rung der Bauarbeiten läuft. Basierend darauf wird ein Grundstein für die Simulationsstudie gelegt. Auch sind die Informationen über die Beteiligten nicht vernachlässigbar. Beispielsweise ist das Modell fähig, auf übermäßigen Kapazitäten zu reagieren, wenn die Auslastung der Maschine in Simulationssystem eingesetzt wird. Das bringt die Anwendung von Maschinendaten in der Simulationsstudie auf den Punkt.

2.4 Relevante Simulationsstudien

Die relevante Simulationsstudie kann eine Unterstützung von Modellierung und Implementierung bei der Untersuchung liefern. Um die Simulationsstudie dieser Arbeit zu unterstützen, werden die relevante Simulationsstudien mithilfe von Scopus gesucht.

Scales hat schon die Hybrid-Simulation mit DES zur Untersuchung der ressourcenbeschränkten Projektplanung eingesetzt [Sca-2019]. Alzraiee et la. nehmen auch die Hybrid-Simulation mit DES für die dynamische Planung von Bauaktivitäten an, um das komplexe Bauprojekt mit Rückkopplung zu verwalten [Alz-2015]. Um die erfordlichen Informationen aus einer Reihe von Daten zu greifen, benutzen Solihin et la. die SQL-Datenbank als Datenspeicher, wobei eine Nutzung und Abfrage von Daten effizient erleichtert wird [Sol-2017]. Rasys et la. benutzen die SQL-Datenbank, sodass Informationen der Tiefbauprojekte effizient gespeichert und abgerufen werden [Ras-2012]. Ahn et la. untersuchen die Verwaltung von Bauarbeiten mit der Analyse der aktuellen Daten aus der Baustelle [Ahn-2014]. Beim Tiefbauprojekt haben Xu et la. DES verwendet, um eine verbesserte Planung und Verwaltung des Projekts zu erreichen [Xu-2013].

2.5 Fazit

Diese Arbeit basiert auf der Vorarbeit in [Li-2020] weiter entwickelt. Ein Modell ist das Simulationsmodell für die Makrosimulation (s. Abschnitt 3.2), die ein ABM ist; das andere ist das Simulationsmodell der Prozesssimulation für die Mikrosimulation (s. Abschnitt 3.4). Dieses Modell wird nach Aktivitäten mit Echtzeiten abgebildet. Das Ziel ist, die vorhandenen Simulationsmodelle unter Berücksichtigung der Realität zyklisch zu kombinieren. Dafür werden die digitalen Maschinendaten aus der Baustelle verwendet. Um den Ablauf des ganzen Projekts zu untersuchen, wird noch ein Simulationsmodell für den Ablauf abgebildet. Es stellt, eine Simulation über den gesamten Ablauf des Bauprojekts zur Verfügung, damit werden die grundsätzlichen Projektdaten vor der Ausführung des Bauprojekts zusammengefasst. Nach der Analyse der vorhan-

denen Modellierungsansätze für die Bauablaufplanung wird DES mit Petri-Netzen ausgewählt. Darüber hinaus werden alle erforderlichen Daten in der MySQL-Datenbank gespeichert, um eine automatische Verbindung zwischen den Modellen und den Daten zu realisieren.

Aus der gesucht relevanten Simulationsstudien ist zu sehen, dass die dynamische Planung durch die Simulation im Bauwesen vorgedrungen ist. Aber die Terminplanung unter Berücksichtigung des Ist-Zustands in die Simulation umzusetzen, wird kaum untersucht. Auf der Webseite von Scopus unter Search Keywords („Bauwesen“ OR „Construction“ OR „Earthwork“) AND („Terminplanung“ OR „Schedule Planning“) AND („Soll-Ist-Vergleich“ OR „Nominal/Actual Data Comparison“ OR „Target/Actual Analysis“) ergab kein Dokumentergebnis (Stand: 30.04.2021). Damit bietet der Ansatz in dieser Arbeit ein dreiteiliges Konzept (s. Abschnitt 3.1), dadurch wird eine baubegleitende Terminplanung unter Berücksichtigung der digitalen Daten verwirklicht. Jedes vorher genannte Simulationsmodell ist ein Teil der entwickelten Hybrid-Simulation. Die Interaktionen dazwischen ermöglichen den ständigen Soll-Ist-Vergleich, sodass die Plandaten an den Ist-Zustand anpassen.

3 Modellierung

3.1 Dreiteiliges Konzept

Zur Modellierung werden drei Simulationsmodelle für die Makrosimulation, Ablaufsimulation und Prozesssimulation (s. Abschnitte 3.2, 3.3 und 3.4) als Ausgangsmodelle zur Planoptimierung in dieser Arbeit betrachtet, dabei werden halbautomatische Mitwirkungen dazwischen entwickelt, um eine Hybrid-Simulation des ganzen Systems herzustellen. Neben der Prozesssimulation gehört die Ablaufsimulation auch zur Mikrosimulation des Systems. Allerdings liegt keine Kommunikation miteinander vor. Beide werden nur mit der Makrosimulation verbunden. Die Makrosimulation ist der Kern der Untersuchung. Mit der Nutzung von ständig aktualisierten Ist-Daten muss sie immer einen optimalen Terminplan, der der aktuellen Situation entspricht, für das Projekt vorschlagen. Die Simulationsmodelle in der Mikrosimulation werden verwendet, um die Eingangsdaten der Makrosimulation bereitzustellen.

Infolgedessen wird ein dreiteiliges Konzept (s. Abbildung 3-1) dieser drei Simulation zur Verwendung erstellt. Der Bauleiter gibt den Wusch des Bauherrn als Projektdaten zur Ablaufsimulation ab. Nach der Ablaufsimulation werden die Projektplanungsdaten erstellt und könnte weiter zur Makrosimulation gegeben werden. Die andere Variante ist, dass der Bauleiter die Projektplanungsdaten bei verschiedenen Modi aus der Ablaufsimulation zusammenfasst. Bei den gesamten Informationen handelt es sich um Eingangsdaten für die Makrosimulation, damit wird ein optimaler Terminplan aus den verschiedenen Varianten ausgewählt. Die erstellten Soll-Daten und die vorherigen Projektplanungsdaten werden zur Prozesssimulation transportiert, und der Bauleiter benutzt den Terminplan, um Bauarbeiten auszuführen. Die resutierenden Ergebnisse (Maschinendaten und Aktivitätsdaten) von Bauarbeiten werden als Eingangsdaten für die Prozesssimulation importiert. Darüber hinaus beginnt die Prozesssimulation und das Modell berechnet die aktuellen Fortschritte aller Prozesse. Basierend auf dem aktuellen Zeitaufwand bekommen die noch nicht ausgeführten Prozesse eine neue Zeitdauer beim gleichen Modus. Die zwei Daten (aktualisierte Fortschnitte und Projektplanungsdaten) werden wieder in die Makrosimulation eingeladen; daraus ergibt sich eine neue Projektplanung, die den aktuellen Zustand berücksichtigt. Die simulierten Ergebnisse werden noch mal an den Bauleiter und die Prozesssimulation übergeben. Der vorherige Vorgang wird bis zum Ende der Bauausführung zyklisch behandelt. Auf diese Weise kann die Abweichung zwischen Planung und Implementierung stetig vermieden werden, und kann gleichzeitig ein optimaler Terminplan basierend auf den Tatsachen jederzeit vorliegen.

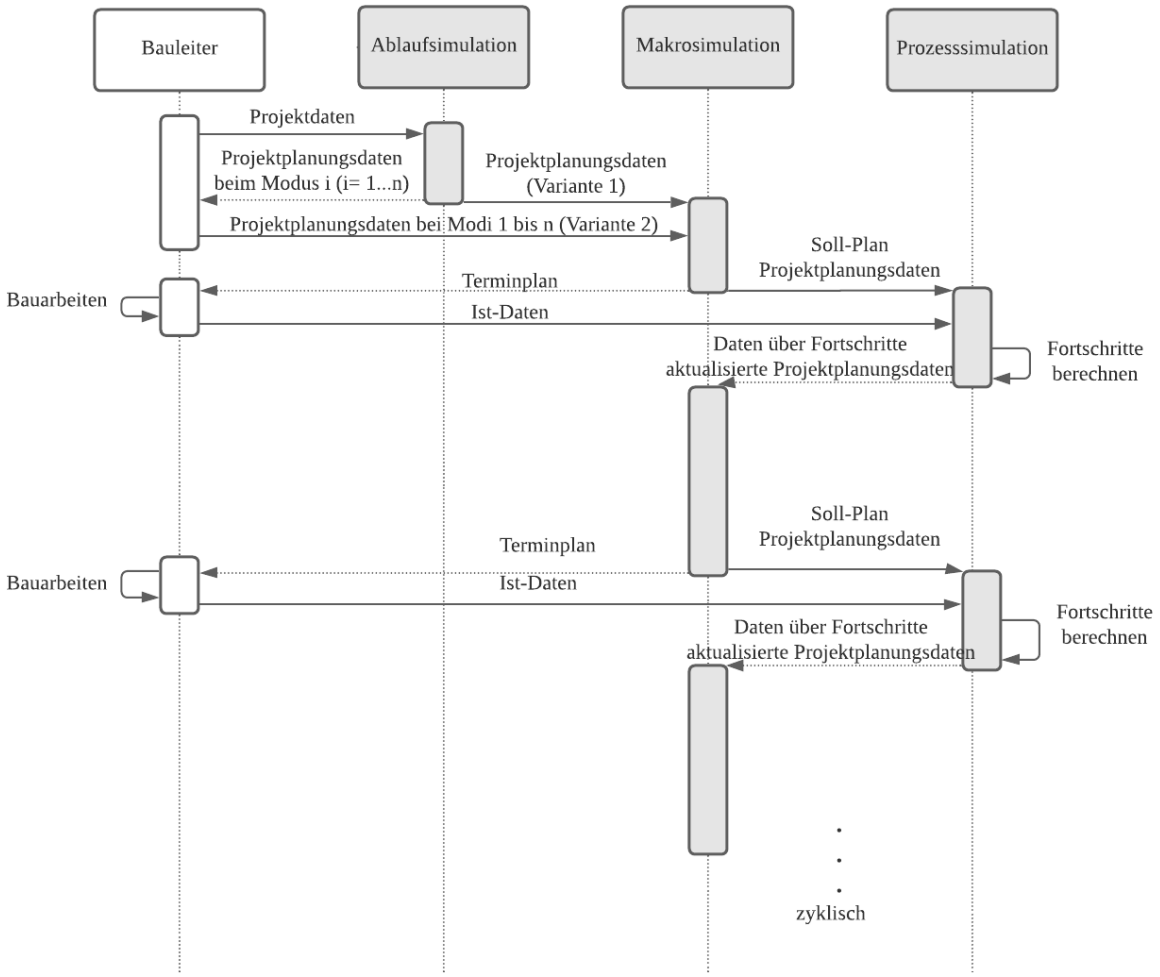


Abbildung 3-1: Sequenzdiagramm des dreiteiligen Konzepts

3.2 Simulationsmodell der Makrosimulation

Das Simulationsmodell der Makrosimulation ist eine ABM mit einem Multi-Agenten-System. Es ist auf eine optimale Planung von Prozessen ausgerichtet, jeder davon mit verschiedenen Modi aufgelistet ist. Dieses Modell zielt darauf, ein Projektplan durch Berechnungen und Anordnungen von vorhandenen Informationen basierend auf Restriktionen nach MRCPSP zu berechnen. Es ermöglicht auch, die Soll-Daten mit den Ist-Daten abzugleichen, um den Projektplan basierend auf dem aktuellen Stand zu aktualisieren.

Die Abbildung 3-2 zeigt den Hauptnetzwerk *Prozesslauf* des Modells. Es beinhaltet fünf Arbeitsbereiche, die durch farbliche Bereiche markiert sind: *Steuerung* (gelb), *Eingangsdaten und Parametrierung* (orange), *Übersicht der Prozesse und Ressourcen* (grün), *Netzwerke* (blau), sowie *Ausgabe* (rot). Außerdem stehen darunter eine Le-

gende über die verfügbaren Prioritätsregeln und ein 2D-Koordinatensystem. Der ausgeführte Projektplan wird als ein Gantt-Diagramm in diesem Koordinatensystem dargestellt.

Abbildung 3-2: *Hauptnetzwerk* Prozessablauf

Im diesem Unterkapitel wird die Funktionsweise der vier Bereiche Theorie, Konzept, Eingangsdaten und Optimierungsansätze vorgestellt. Das Modell baut auf den Vorarbeiten von Wenzler [Wen-2016] und Li [Li-2020] auf.

3.2.1 Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP)

Die klassische ressourcenbeschränkte Projektplanung (engl. Resource Constrained Project Scheduling, kurz RCPSP) beschreibt, dass die Prozesse unter Berücksichtigung der Anordnungsbeziehung und beschränkten Ressourcen konfliktfrei organisiert werden. Ziel ist, die Zeitdauer des Projekts ohne Verletzung von Randbedingen zu minimieren.

Im Vergleich zum RCPSP ist MRCPSP komplizierter, weil jeden Prozess mindestens zwei Modi bei diesem fall zur Verfügung stehen. Die erforderlichen Ressourcen sind in verschiedenen Modi unterschiedlich. Dies lässt sich in folgenden Formeln nach Lova et la. [Lov-2006] formalisieren:

- Anzahl von Prozessen J
- Prozess $j \in \{1, \dots, J\}$
- Periode des einzelnen Prozesses t

- Anzahl der Modi M
- Modus $m \in \{1, \dots, M\}$
- Spätestmöglicher Endzeitpunkt LFT (engl. Last Finish Time)
- Frühestmöglicher Endzeitpunkt EFT (engl. Early Finish Time)
- gesamte Zeit Z
- binäre Variable x_{Jmt}
- Dauer d_{jm} des Prozesses j in Modus m.
- Set an Vorgänger P_j des Prozesses j
- erneuerbare Ressource k
- Menge an Ressourcen R
- Angenommener spätestzulässiger Endtermin T des letzten Prozesses J

Das MRCPSP kann durch die Gleichung:

$$Minimise\ Z = \sum_{m=1}^{M_J} \sum_{t=EFT_J}^{LFT_J} t\ x_{Jmt} \tag{3-1}$$

mathematisch beschreibt werden. Die Gl. (3-1) ist auf die Minimierung der Zykluszeit Z ausgerichtet.

Weiterhin gibt es dazu noch die folgenden vier Randbedingungen. Diese sollen gleichzeitig erfüllt werden.

Die erste Bedingung Gl. (3-2) garantiert, dass nur ein Modus des einzelnen Prozesses ausgeführt werden soll.

$$\sum_{m=1}^{M_J} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} x_{jmt} = 1, \quad j = 1, \dots, J \tag{3-2}$$

Die Ungleichung (3-3) zeigt, dass der Anfangstermin des Prozesses j nicht früher als der Endtermin seines Vorgängers i ist. Damit wird die Prioritätsregel bei der Ausführung eingehalten.

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=EFT_I}^{LFT_i} t\, x_{imt} \leq \sum_{m=1}^{M_J} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} (t - d_{jm})\, x_{jm}, \qquad j = 2, \dots, J, \qquad i \in P_j \tag{3-3}$$

Die folgende Ungleichung (3-4) stellt sicher, dass die Kapazität von erneuerbaren Ressourcen nicht überschritten wird, wenn der Prozess j im Modus m eine Menge von r_{jmk} der erneuerbaren Ressource k braucht.

$$\sum_{j=2}^{J-1} \sum_{m=1}^{M_J} r_{jmk} \sum_{\tau=t}^{t+d_{jm}-1} x_{jm\tau} \leq R_k, \qquad k \in R, \qquad t = 1, \dots, T \tag{3-4}$$

Die letzte Bedingung in Gl. (3-5) besagt, wenn die binäre Variable x_{Jmt} gleich 1 ist, wird der Prozess j im Modus m in einer Periode t durchgeführt. Im Gegensatz dazu, bedeutet 0 keine Ausführung für solche Bedingungen.

$$x_{jmt} \in \{0, 1\}, \qquad j = 1, \dots, J, \qquad m = 1, \dots, M, \qquad t = EFT_j, \dots, LFT_j \tag{3-5}$$

3.2.2 Konzept des Multi-Agenten-Systems

Das entwickelte Multi-Agenten-System von Wenzler und Günther [Wen-2016] ist eine zweckmäßige Lösung des MRCPSP. In diesem System sind Prozesse, erneuerbare und nicht erneuerbare Ressourcen als individuelle Agenten modelliert, die alle durch *Börse* verwaltet werden [Wen-2016]. Die Struktur des Systems wird in der Abbildung 3-3 dargestellt.

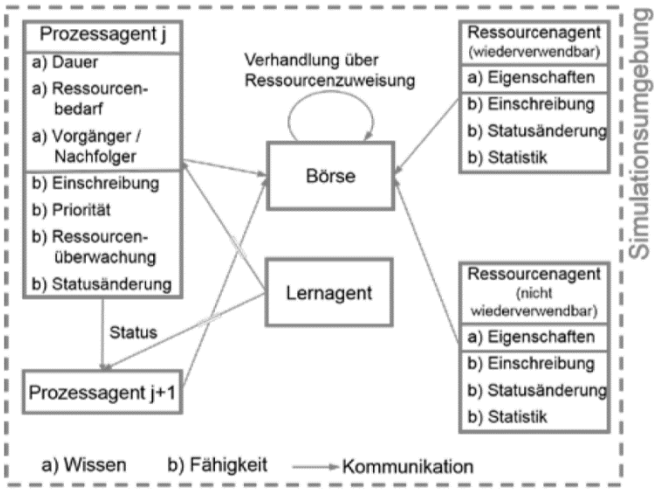


Abbildung 3-3: Struktur des Agentensystems [Wen-2016]

Börse

Der Agent *Börse* übernimmt die Rolle des Verwalters für das ganze System. Hier wird die Reihenfolge der Prozesse entschieden und welchem Prozess die geforderten Ressourcen zuerst zuzuweisen werden. Wenn sich der Status des Agenten ändert, bekommt *Börse* die Rückkopplung und schreibt sie in ihren Datenspeicher. Darin gibt es zwei entscheidenden Listen *Kundenkartei* und *Gelbeseiten*. Wenn alle Vorgänger eines Prozesses schon beendet sind, wird dieser in die *Kundenkartei* eingetragen. Falls dieser Prozess schon geschlossen ist, werden alle Daten darüber aus der *Kundenkartei* gelöscht. In *Gelbeseiten* sind alle Ressourcen aufgelistet, die für das aktuelle Projekt verantwortlich sind. Durch die Algorithmen der Priorität wird eine optimierte Einordnung von Ressourcen und Prozessen erreicht.

Prozessagent

Der *Prozessagen*t erhält die Eigenschaften wie Vorgänger, Zeitaufwand und Ressourcenbedarf eines Prozesses. Jeder repräsentiert einen Prozess und wird als ein Balken auf der Zeit-Achse chronologisch dargestellt. Die Balkenlänge kennzeichnet als die Dauer. Die verschiedenen Farben des Prozessagenten repräsentieren verschiedene Zustände des Prozesses (s. Tabelle 3-1). Diese visuellen Einstellungen helfen dem Nutzer, einen Überblick über den gesamten Projektplan zu erhalten.

Tabelle 3-1: Zustände des Prozessagenten [Hor-2014]

Status	Beschreibung	Farbe
blockiert	Vorbedingungen nicht erfüllt	rot
zugelassen	Vorbedingungen erfüllt	orange
akzeptiert	Ressourcen erfolgreich zugewiesen	orange
aktiv	Ressourcen zugewiesen & arbeitend	grün
abgeschlossen	Aktivität erfolgreich beendet	schwarz

Das Ziel jedes *Prozessagenten* ist eine möglichst frühe Ausführung jedes Prozesses, somit wird die gesamte Zeitdauer des Projekts gespart. Aber vor Beginn des Prozesses müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt werden:

- Der definierte Startzeitpunkt ist erreicht.
- Alle Vorgänger sind schon beendet.
- Alle erfordlichen Ressourcen sind verfügbar.
- Der Prozess hat die Priorität, die verfügbaren Ressourcen anzunehmen.

Am Ende des Prozesses werden die besetzten Ressourcen freigegeben, und der *Prozessagent* kontaktiert mit dem Agent *Börse,* um den nächsten Prozess auszulösen. Sein Start- und Endzeitpunkt, Modus sowie zeitlicher Fortschritt werden eingeschrieben. Die gesamten Daten aus allen Prozessen bezeichneten als einen grundlegenden Zustand des Projektplans, weiter können diese Daten mit Ist-Zustand nach dem Beginn der Bauausführung interagieren.

Ressourcenagent

Der *Ressourcenagent* kann sich in zwei Teile dividieren. Einer ist der *Arbeitsmittelagent*, der die erneuerbaren Ressourcen repräsentiert, der andere der *Materialagent*, der die nicht erneuerbaren Ressourcen repräsentiert.

Nach den Eigenschaften der erneuerbaren Ressourcen verfolgt der *Arbeitsmittelagent* das Ziel, eine möglichst hohe Auslastung über die Projektlaufzeit zu erreichen [Hor-2014]. Daher muss die Zuweisungsmöglichkeit erhöht werden. Der *Arbeitsmittelangent* hat insgesamt drei Zustände *frei, reserviert* und *aktiv* (s. Abbildung 3-4) Die freigegebenen Ressourcen (*frei*) werden *reserviert*, wenn der ausgeschriebene Prozess

die entsprechenden Arbeitsmittel zur Arbeit benötigt, obwohl er nicht ausführbar ist. Die Reservierung kann die Projektzeit verlängern, weil diese Handlung die anderen Prozesse verhindert. Daher gibt *Börse* die reservierten Ressourcen zum nächsten Entscheidungszeitpunkt frei, um sie anderen ausgeschriebenen Prozessen zuzuweisen, um die Auslastung von Arbeitsmitteln zu maximieren

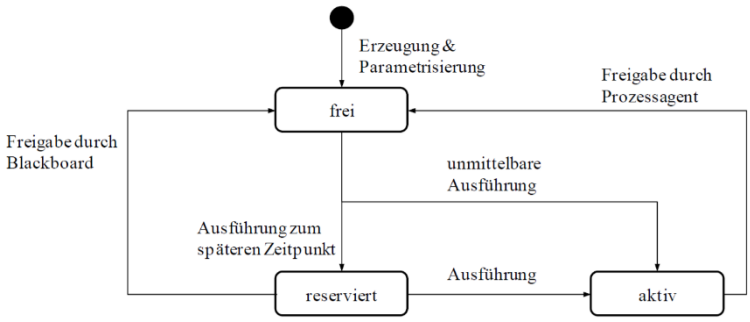


Abbildung 3-4: Zustandsdiagramm des Arbeitsmittelagenten [Hor-2014]

Im Gegensatz zum *Arbeitsmittelagent* wandert der *Materialagent* zwischen den zwei Zustände *vorhanden* und *verbraucht*. Sein wichtiges Ziel ist der vollständige, zeitnahe Verbrauch bei möglichst geringen Lagerzeiten [Hor-2014]. Wenn die Verfügbarkeit von Material der erforderlichen Menge entspricht, erfolgt die Ausschreibung des *Prozessagenten*.

3.2.3 Eingangsdaten

Für die Dateneingabe im Simulationsmodell der Makrosimulation steht ein Dialog mit den drei Blättern, *Grundeinstellung*, *Plan Wählen* und *Ressourcen*, zur Verfügung (s. Abbildung 3-5).

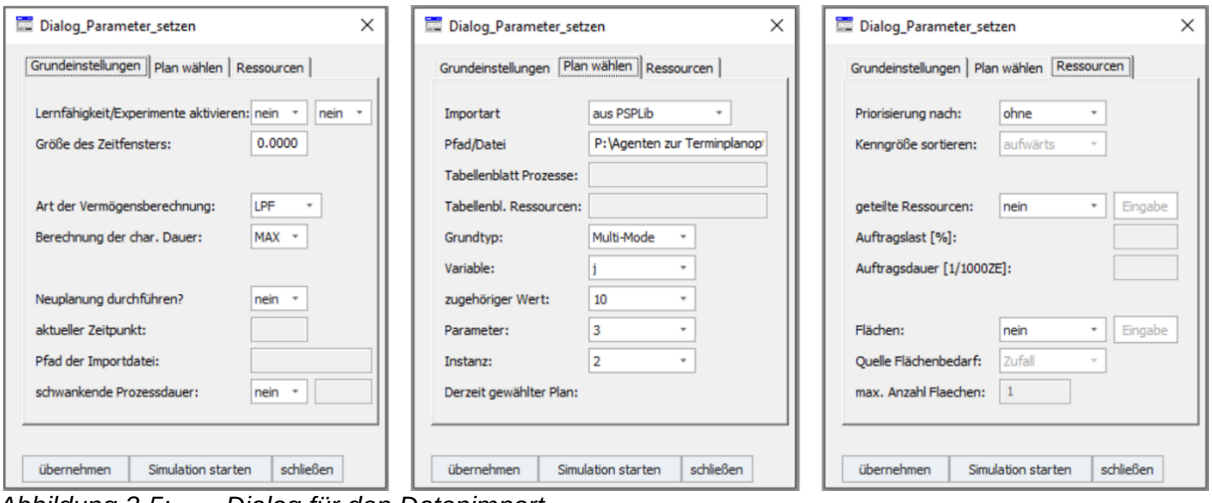


Abbildung 3-5: Dialog für den Datenimport

Durch das Blatt *Grundeinstellungen* werden die grundsätzlichen Elemente für die Projektplanung eingestellt, z. B. die Auswahl von Prioritätsregeln und die Planung mit Ist-Daten. Weiterhin wird die Option eines *Lernagenten* zur zusätzlichen Unterstützung eines optimalen Terminplans gegeben [Wen-2015]. Das Blatt *Plan Wählen* verfügt über drei verschiedene Datentypen, PSPLib, Excel-Datei und XML-Datei zum Datenimport. Das Einlesen aus der XML-Datei wurde in dieser Arbeit nicht entwickelt. Diese Funktion liegt somit nicht vollständig implementiert und evaluiert vor. Das dritte Blatt zielt darauf, die Bedingungen und Einschränkungen von Ressourcen und Räumen einzustellen [Wil-2016].

Aus der Vorarbeit von Li [Li-2020] wurde Excel-Datei zum Soll-Ist-Vergleich verwendet. Für die Kombination von Makro- und Mikrosimulation bezüglich der digitalen Daten ist die vorherige Austauschformat von Interesse. Um die vorliegenden Prioritätsregeln zu überprüfen, soll verschiedene Nachfolger-Beziehungen innerhalb eines Projekts zur Verfügung stehen. PSPLib verfügt über zahlreiche Variante zur Unterstützung der Untersuchung. Infolgedessen wird die beide Importarten im Folgende erläutert.

PSPLib

Project Scheduling Problem Library, kurz PSPLib ist eine Projektplanbibliothek nach Kolisch et al. [Kol-1997]. Diese Bibliothek verfügt über verschiedene Problemstellungen für verschiedene Arten bei der Projektplanung mit eingeschränkten Ressourcen sowie optimale und heuristische Lösungen. Die Daten aus PSPLib können direkt als .mm-Datei aus dem Internet heruntergeladen werden. Die Datensätze können zur Bewertung von Lösungsverfahren für ressourcenbeschränkte Projektplanungsprobleme im Einzel- und Multi-Mode verwendet werden. Forscher können die Benchmark-Sets herunterladen, um die Algorithmen ihres Programms zu bewerten, und sie können auch ihre Ergebnisse der Bibliothek hinzufügen. [Wit-2020]

Excel-Datei

Für die praktische Anwendung wird der Excel-Datentyp einbezogen, worin die Problemstellungen des Projektplans nach ihren Arten mit bestimmten Formen gespeichert werden. Daher ist diese Excel-Datei eine Tabellenkalkulation, worin die Informationen nach einer bestimmten Weise klassifiziert und als Tabellen auf verschiedenen Blättern gespeichert werden.

Das Hauptblatt wird meist mit dem Namen des Projekts benannt, darin werden alle Prozesse mit ID und Informationen, z. B. Ressourcenverbrauch und Zeitverbrauch, aufgelistet. Hier kann der Nutzer auch die verschiedenen Modi für einen Prozess sowie

die Vorgänger- und Nachfolger-Beziehungen zwischen den Prozessen definieren. Um die Flexibilität der Eingabe zu gewährleisten, werden die benutzten Ressourcen mit der Nummerierung im Hauptblatt eingeschrieben und die detaillierten Informationen darüber im Blatt *Ressourcenliste* gespeichert. Der Name, die Anzahl des maximalen Bedarfs usw. von Ressourcen werden darin bewahrt. Außer der Dauer und den Beziehungen zwischen den Prozessen verfügt der Import bei Excel noch über eine Funktion, den Startzeitpunkt von Prozessen nach Wunsch festzulegen. Dies wird im Blatt *Startzeitpunkte* gespeichert. Außer den Prozessen aus dem Projekt werden Start- und Endprozess, die keinen Zeitaufwand besitzen, bei der Planung in der Makrosimulation hinzugefügt, um Kennzeichen über Start und Ende des Projekts darzustellen. Daher wird der Startprozess als erster Prozess im *Startzeitpunkte* mit *Prozess-ID* 0 gekennzeichnet (s. Abbildung 3-6). Während der zunehmenden Einschränkungen lässt die Flexibilität der Planung nach, damit kann der simulierte Projektplan sich den grundlegenden Anforderungen anpassen.

Prozess-ID	zeitl. Fortschritt	Startzeit	Endzeit	Mode
0	**1**	**0**	**0**	**1**
1	0			
2	0			
3	0			
4	0			
5	0			

Abbildung 3-6: Ein Beispiel für Startzeitpunkte

Falls das Projekt schon gestartet ist, gibt es in der Makrosimulation die Möglichkeit, die reale Dauer und Organisation von vergangenen Prozessen anzunehmen, wobei das Einlesen von Ist-Daten notwendig ist. Die Ist-Daten häufen sich im Blatt *Prozesse* an, das die gleiche Tabellenform wie *Startzeitpunkte* hat. Der zeitliche Fortschritt des fertigen Prozesses wird als 1 registriert. Für den laufenden Prozess wird er anhand des Verhältnisses von der verstrichenen zur geplanten Zeit berechnet.

3.2.4 Optimierungsansätze

Zur Optimierung des Projektplan werden in drei Teilen Bietvorgang, Prioritätsregeln und Ist-Daten-Integration vorgestellt. Die Funktionalität jedes Teils ist auf verschiedenen Aspekten der Planoptimierung ausgerichtet.

Bietvorgang

Der Bietvorgang übernimmt die zentrale Rolle des Netzwerks *Börse*. Er begleitet den Projektplan vom Beginn bis zum Ende. Während der Ende-Ausführung jedes Prozes-

ses wird die Methode *HBVG* (Hauptbietvorgang) aufgerufen, um die besetzten Ressourcen wieder auf *frei* zu setzen. Damit verteilt die Methode erforderlichen Ressourcen an die zugelassenen Prozesse, die ausführbar zu werden.

Die Abbildung 3-7 zeigt den Ablauf eines Bietvorgangs, der zyklisch bei der Projektplanung abläuft. Hier wird der Bietvorgang von erneuerbaren Ressourcen vorgestellt. Die Vorgänge für Materialen (nicht erneuerbare Ressourcen) und Flächen sind ähnlich.

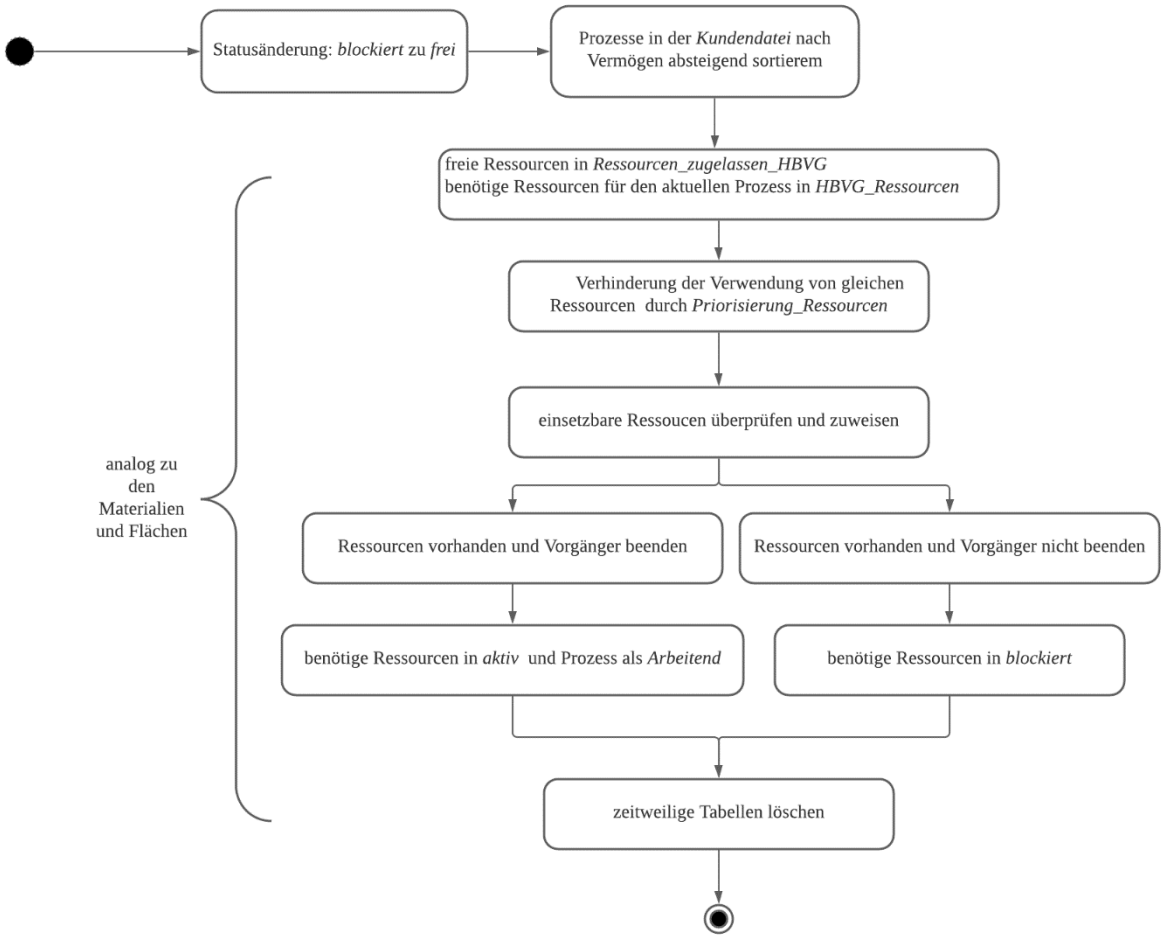


Abbildung 3-7: Bietvorgang [Li-2020]

Am Anfang des Bietvorgangs werden die besetzen erneuerbaren Ressourcen von *blockiert* zu *frei* eingesetzt. Dann wird das Vermögen von ausgeschriebenen Prozessen nach der ausgewählten Prioritätsregel berechnet, dabei werden diese Prozesse nach Größe absteigend in die *Kundenkartei* sortiert. Freie Ressourcen werden in die Liste *Ressourcen_zugelassen_HBVG* kopiert, und die erforderlichen Ressourcen für den aktuellen Prozess werden in die Liste *HBVG_Ressourcen* eingetragen. Um die immer gleichen Ressourcen zu verwenden, wird die Methode *Delta_t_Berechnung* aufgerufen, die die vergangene Zeit jeder verwendbaren Ressourcen seit dem letzten Einsatz

berechnet. Die Ressource mit der längsten Zeit wird zuerst durch die Methode *Priorisierung_Ressourcen* in der nächsten Verwendung gebraucht. Danach werden die Voraussetzungen für die Prozessausführung überprüft. Falls eine genügende Menge von Ressourcen zur Verfügung steht und gleichzeitig alle Vorgänger abgeschlossen sind, werden die erforderlichen Ressourcen dem aktuellen Prozess zugeteilt. Der Status dieser Ressourcen wird auf *aktiv* gesetzt und der entsprechende Prozessagent als *arbeitend* (grün) markiert. Falls alle Ressourcen vorhanden und die Vorgänger nicht alle geschlossen sind, werden die erforderlichen Ressourcen *blockiert.* Zum Schluss werden die Inhalte der genutzten Listen gelöscht, um den nächsten Bietvorgang vorzubereiten.

Prioritätsregeln

Zu den optimalen Anordnungen von Prozessen wird die Prioritätsberechnung verwendet, um den als nächsten auszuführenden Prozess aus einem Set zu jeder Zeit auszuwählen. Jede Terminplanung (Simulation) kann nur einer Prioritätsregel folgen, dadurch wird bestimmt, welcher Prozess zuerst die verfügbaren Ressourcen bekommt. Bei jede Entscheidungszeitpunkt t_n werden Prioritäten $v(j)$ für die Prozesse im Entscheidungsset D_n bestimmt [Hor-2014]. Nach den berechneten Ergebnissen wird der Prozess mit maximalem Vermögen zugewiesen. Wenn zwei Prozesse gleiche Vermögen haben, wird der Prozess mit niedrigerer ID bevorzugt.

Die Makrosimulation verfügt über 34 verschiedenen Prioritätsregeln zum Versuch. Die für die vorliegende Arbeit relevanten Prioritätsregeln werden im Folgende nach Hörenburg [Hor-2014] erläutert.

$$j^* = min\{\, j \in D_n \mid v(j) = extremum\{\, v(i) \mid i \in D_n \,\}\,\} \tag{3-6}$$

Longest Path Following – Diese Prioritätsregel wird häufig verwendet. Hier wird die Dauer p_i aller direkten und indirekten Nachfolger F^* nach den vordefinierten Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen addiert. Indirekt heißt Nachfolger, die wiederum Nachfolger der Nachfolger sind. Der längste Pfad ist jedoch für die Ermittlung der Prioritätskennzahl verantwortlich.

$$v(j) = p_j + max\left\{\sum_{i \in F^*} p_i\right\} \tag{3-7}$$

Greatest Rank Position Weight All – Analog zum Longest Path Following wird auch die Dauer der nachfolgenden Prozesse addiert, aber werden alle Varianten wirken mit.

$$v(j) = p_j + \sum_{i \in F^*} p_i \tag{3-8}$$

Minimum Slack – Vor der Berechnung von Prioritäten wird eine Rückwärtsterminierung ohne Ressourcenbeschränkung durchgeführt, damit werden die spätesten Anfangszeitpunkte (SAZ) aller Prozesse ermittelt.

$$v(j) = SAZ_j - t_n \tag{3-9}$$

Latest Finish Time – Diese Prioritätsregel ist auf den spätesten Endzeitpunkt (SEZ) ausgerichtet und bedient sich ebenfalls der üblichen Rückwärtsrechnung.

$$v(j) = SEZ_j \tag{3-10}$$

Worst/Average Case Slack – Die Priorität wird aus dem spätesten Endzeitpunkt der klassischen Rückwärtsterminierung sowie dem frühesten Startzeitpunkt einer Aktivität j zum aktuellen Entscheidungspunkt t_n bestimmt.

$$v(j) = SEZ_j - max\{0, E_{(i,j)} \mid (i,j) \in AP_n\} \tag{3-11}$$

$E_{(i,j)}$ entspricht hierbei dem frühesten Zeitpunkt, zu dem die Aktivität j gestartet werden kann, sofern die Aktivität i zum Zeitpunkt t_n gestartet wird. AP_n entspricht dem Set zugelassener Aktivitätenpaare.

Ist-Daten-Integration

In der Praxis spielt die bausynchrone Planung eine entscheidende Rolle für Bauprojekte. Dabei werden die aktuellen Baufortschrittsdaten mit den Projektplanungsdaten zusammen verarbeitet, um eine neue optimierte Planung basierend auf Ist-Daten nachzubilden.

Die Makrosimulation verfügt über diese Funktionalität. Die aktuellen Fortschrittdaten sollen gleichzeitig mit den Projektplanungsdaten in der Makrosimulation geladen werden. Nach der Verarbeitung von Importdaten werden Prozessagenten für alle Prozesse initialisiert. Vor dem Simulationsstart sollen alle entsprechenden *Prozessagenten* nicht nur die Positionen, sondern auch die Farbe an die Ist-Daten anpassen. Hierfür werden diese zuständigen Prozesse in zwei Gruppen unterteilt. Bei den abge-

schlossenen Prozessen sind Start- und Endzeitpunkt bekannt. Die betreffenden *Prozessagenten* ändern die Balkenform in die richtige Länge und die Farbe in schwarz (geschlossen). Gleichzeitig werden diese am richtigen Ort platziert. Für aktive Prozesse sind zeitlicher Fortschritt und Startzeitpunkt vorhanden. Dafür werden Status und Ort aktualisiert. Die Balkenlänge reicht bis zum definierten Simulationsstart entlang. Außerdem werden die entsprechenden Ressourcen zugewiesen. Die Simulationsuhr wird auch mit dem vorgegebenen Simulationsstart aktualisiert. Der nächste Schritt ist eine Überprüfung der Prozessinformation aus deren Validität [Hor-2014]:

- Alle Vorgänger eines abgeschlossenen oder aktiven Prozesses müssen abgeschlossen sein. Sonst wird eine entsprechende Warnung angezeigt.

- Die erforderlichen Ressourcen eines aktiven Prozesses müssen vorhanden sein. Andernfalls gibt es auch eine Warnung über die Verfügbarkeit von Ressourcen.

- Wenn alle Voraussetzungen zur Ausführung eines Prozesses erfüllt sind, obwohl keine Fortschrittsdaten darüber vorliegen, wird der korrespondierende Prozessagent zu den Handlungen im Blackboard eingeschrieben (Status *zugelassen*).

Bis hier ist die Vorbereitung der Planung fertig. Die Nachbildung von restlichen Prozessen und aktiven Prozessen ist gleich wie eine allgemeine Optimierung des Projektplans.

3.3 Simulationsmodell der Ablaufsimulation in der Mikrosimulation

Das Bauprojekt wird meist nur einmal durchgeführt und ändern sich die räumlichen Randbedingungen und die Umweltflüsse mit jeder Baustelle [Gün-2010]. Daher wird ein bauspezifische Baukastensystem [Gün-2010] verwendet, sodass die Ablaufsimulation für das betrachtete Bauvorhaben rasch erstellt werden kann. Die Ablaufsimulation dient die Visualisierung aller (Sub-) Prozesse eines bestimmten Bauprojekts und ermöglicht die Berechnung der Bauzeit, damit wird ein grober Überblick über das ganze Bauprojekt erhaltet.

3.3.1 System

Mit dem vorliegenden Simulationsmodell ist es möglich, das betrachtete Bauprojekt entsprechend anzupassen und flexibel auf die unterschiedlichen Anforderungen der jeweiligen Baustelle zu reagieren. Im Folgende werden das System und der allgemeine Bearbeitungsbereich des Modells detailliert erläutert.

Hierarchie-System

Das Bauprojekt bei der Anwendung wird in drei Ebenen verteilt (s. Abbildung 3-8). Aufgaben werden alle nach der Datenverarbeitung in der Tabelle *Tasks* des Netzwerks *TaskScheduler* aufgelistet. Hier kann der Status davon bei der Ausführung jeder Zeit überprüft werden. Am Anfang wird das Projekt als *processing* eingestellt. Dann wird der zuerst ausgeführte Prozess als *processing* eingestellt. Danach beginnt der erste Subprozess. Allerdings erfolgt die Ausführung nach dem Bottom-Up-Prinzip befolgt, d. h., der Baustein von Subprozessen wird zuerst erstellt. Wenn alle Subprozesse eines Prozesses abgeschlossen sind, wird eine Meldung ausgegeben, den entsprechenden Baustein des aktuellen Prozesses zu erzeugen. Anschließend wird er vor der Ausführung des nächsten Subprozesses gelöscht. Wenn alle Prozesse abgeschlossen sind, ruft die Simulationsprogramme den Baustein des Projekts auf. Aber die Bausteine bezüglich der Prozesse und des Projekts verursachen keinen Zeitaufwand, damit wird die Echtheit der Simulationszeit gewährleistet.

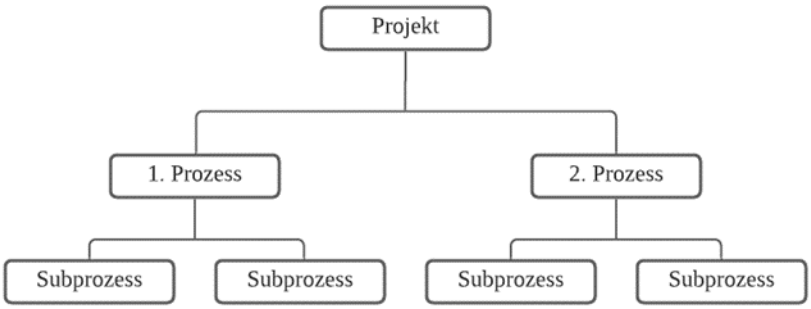


Abbildung 3-8: Hierarchie-System der Ablaufsimulation

Allgemeiner Bearbeitungsbereich

Zur Anwendung sind viele standardisierte Bausteine auf dem Modell schon erzeugt worden. Beispielsweise bietet dieses Modell den Betonmischer, das Baugerät, den Bagger, den Kran usw. für den Bereich Bewegungselement (BE). Der Nutzer kann die benötigten Bausteine auswählen, direkt ins Modell ziehen und die entsprechenden Attribute nach den Anforderungen verändern; damit lässt das entwickelte Modell an das aktuelle Projekt anpassen.

Zur Modellierung existiert eine Vorlage über die Einordnung des Bearbeitungsbereichs (s. Abbildung 3-9), die alle Drahtzieher bezüglich der Simulationsausführung enthält. Wenn der Ablauf beginnt, wird ein Fördergut *Entity* auf dem Netzwerk *Simulate* erzeugt. Es verbleibt dort bis zum Ende der Simulation. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigen Netzwerke vorgestellt.

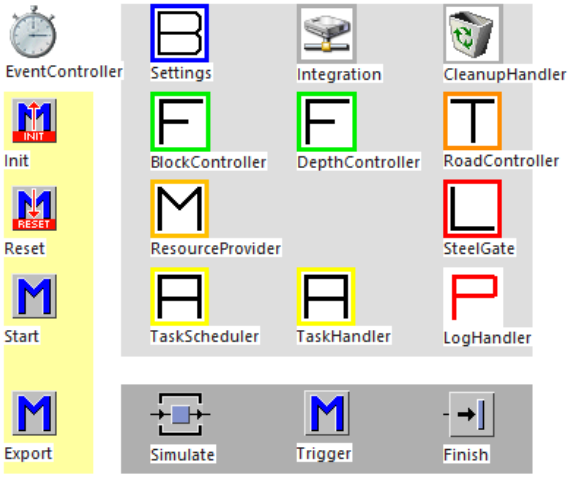


Abbildung 3-9: Vorlage vom Bearbeitungsbereich der Ablaufsimulation

In ***Settings*** gibt es zwei Unterteile *Inputs* und *Entities*. In *Inputs* werden die Standarddaten speziell für das aktuelle Projekt gespeichert. Beispielsweise können in der Tabelle *PileWalls* die Position, die Länge, die Anzahl von zugehörige Bahrpfählen und sein Diameter eines Bohrpfahlwands zugegriffen werden. In *Entities* werden die aus *Inputs* verarbeiteten Daten gespeichert. Zum Beispiel werden die Information über jeden Bohrpfahl in der Tabelle *Piles* gespeichert.

Das Netzwerk ***Integration*** ist eine Brücke, die die Daten und die Simulation verbindet. Der Unterteil *Setup* zielt darauf, dass auf Basis der Standarddaten die detaillierten Daten jeder Entität (wie Bohrpfahl) berechnet werden. Die Unterteile *Read* und *Write* haben mit der Datenbank zu tun. Wie die Namen zeigen, können durch *Read* die Daten aus der Datenbank zum Modell importiert und durch *Write* das Simulationsergebnis in die Datenbank eingeschrieben werden können.

Das Netzwerk ***RoadController*** hilft bei der Zuordnung der Route der Bewegungselementen. Es wird zuerst die Position mit dem kürzesten Abstand zwischen dem Bohrpfahl und die Straßen bestimmt, und dann wird ein Sensor danebengelegt. Wenn ein BE, dessen Ziel der aktuelle Bohrpfahl ist, diesen Sensor erreicht, bewegt sich das aktuelle BE in das Netzwerk des Bohrpfahls. Das gilt auch, wenn das BE den Bohrpfahl verlässt, d. h. das BE bewegt sich vom Netzwerk zur Sensor-Position.

ResourceProvider ist ein Netzwerk, das die benötigten Ressourcen für den aktuellen Vorgang auflistet und die Ressourcen für den nächsten Vorgang markiert.

Das Netzwerk ***TaskScheduler*** hilft dem Modell, den einzelnen Vorgang zu starten. Wenn dieser Vorgang abgeschlossen ist, wird das entsprechende Netzwerk aus dem Hauptnetzwerk oder *Taskhandle*r gelöscht. Alle Aufgaben werden aus der Vorarbeit erneut sortiert und in der Tabelle *Tasks* gespeichert. Es ist möglich, jeder Zeit während der Simulation auf alle Daten zuzugreifen, um die abgeschlossenen Prozesse, den arbeitenden Prozess und die noch nicht angefangenen Prozesse zu erkennen.

3.3.2 Eingangsdaten

Zur Anwendung müssen ausführliche Projektdaten ins Modell geladen werden. Alle Eingangsdaten werden im Schema *constructionds* der MySQL-Datenbank gespeichert. In der Tabelle *task* werden alle Prozesse mit Namen, Nachfolger-Beziehungen und anderen Informationen aufgelistet. Diese müssen alle mit einer einzigen Projekt-ID markiert sein, um die richtigen Daten für das aktuelle Projekt einzulesen. Die Prozesse werden nach den Zugehörigkeiten auf drei Ebenen verteilt. Beispielsweise liegt ein Tiefbauprojekt für die Herstellung von Bohrpfählen vor. Zur ersten Ebene gehört das Projekt. Die Bohrpfahlwände stehen auf der zweiten Ebene. Die Bohrpfähle liegen darunter. Die Bohrpfähle, die zur gleichen Bohrpfahlwand gehören, haben gleiche Basisdaten bezüglich der Wahrscheinlichkeitsverteilung und unterscheiden sich durch Positionen und Namen. Die Ausführungszeit jeder Aktivität wird nach den statistischen Daten der Wahrscheinlichkeitsverteilung in der Ablaufsimulation bestimmt. Die erfahrungsmäßigen Daten wie Mean-Wert, Maximum und Minimum jeder Aktivität werden in der Tabelle *task_statistics* gespeichert. Hierfür sind fünf Aktivitäten aufgelistet: Bohren, Bewehrung, Betonieren, Graben und Leerlauf. Bei keiner Eingabe werden die definierten Standard-Daten bei der Ablaufausführung eingezogen. Sonst ist es möglich, die Wartezeit für Betonmischer und Kipper mit der Tabelle *supplier* aufzustellen.

Die eingelesenen Daten sind für eine Ablaufsimulation nicht ausreichend. Die detaillierten Informationen zu den Prozessen können durch das Netzwerk *Inputs*, das sich in *Settings* befindet, manuell eingegeben werden. Beispielsweise ist es für die Bohrpfahlwand ist möglich, die Koordinaten von Start- und Endpunkt, die Länge usw. selbst zu definieren. Hier bietet sich auch an, die Stardard-Daten für jede Aktivität und die Information zum Eintritt in der Datenbank einzutragen.

3.3.3 Bohrpfahlherstellung durch das Simulationsmodell

Dieser Arbeit fokussiert den Spezialtiefbau. Daher wird im Folgende die Herstellung eines Bohrpfahls erläutert.

Die Abbildung 3-10 zeigt den Verlauf eines Bohrpfahls in der Ablaufsimulation. Wenn der Vorgänger beendet ist, wird der nachfolgende Bohrpfahl in der entsprechenden Position erzeugt. Die erforderlichen Attribute werden aus der Tabelle *Tasks* vervielfältigt, um die Zeitdauer für Bohren, Betonieren und Leerlauf zu bestimmen und das erforderte Volumen des gebaggerten Bodens zu berechnen. Allerdings werden auch die benötigen Ressourcen vom entsprechenden Lager (*EquipmentGate, ConcreteGate* und *SteelGate)* angerufen. Falls das Bohrgerät ankommt, beginnt sofort der Vorgang Bohren, danach kommt Bewehrung. Nach dem Beginn der Bewehrung verfolgen zwei Vorgänge dahinter. Einer ist Baggern. Nur wenn der ganze erforderte Boden ausgebaggert ist, endet dieser Vorgang. Der anderer ist die Überprüfung der Verfügbarkeit vom Stahl. Wird die Antwort Ja zurückgegeben, führt das Programm den Vorgang Bewehrung aus. Nach der Bewehrung ist die Verfügbarkeit von Betonmischern zu prüfen. Wenn diese Ressource schon vorhanden ist, beginnt der Vorgang Betonieren. Der nächste Vorgang ist Leerlauf, der auf die Wartezeit während der Ausführung eines Bohrpfahls ausgerichtet ist. Danach kommt eine Überprüfung des ausgebaggerten Bodenvolumens. Wenn dieser Vorgang noch nicht beendet ist, tritt ein Fehler im Ablaufsimulationsmodell auf, weil ein Konflikt zwischen der definierten Kapazität eines Baggers und der berechneten Zeitdauer für den Vorgang Baggern existiert. Vor dem Ende des aktuellen Bohrpfahls werden alle noch besetzten Ressourcen in den Lagern freigegeben; somit wird die Ausführung der nachfolgenden Bohrpfähle nicht beeinflusst.

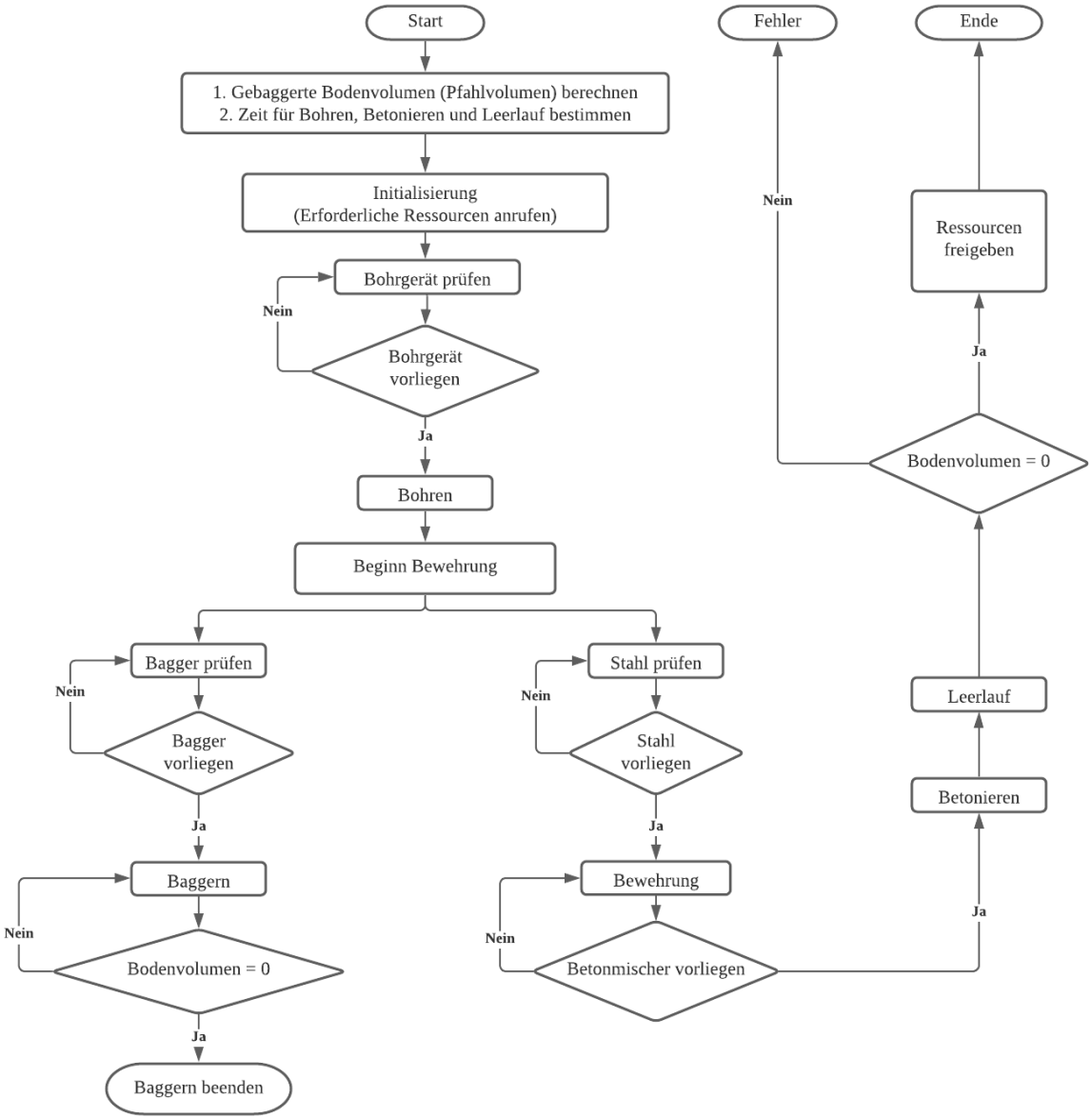


Abbildung 3-10: Flussdiagramm eines Bohrpfahls

Das System verfügt über verschiedene Lager, die für unterschiedlichen Ressourcen ausgerichtet sind (s. Abbildung 3-11). Nach den Anforderungen bewegen sich diese Ressourcen zum derzeitig ausgeführten Bohrpfahl. Am Anfang bietet *EquipmentGate* die erforderlichen Bohrgerät und Bagger. Bei der Bewehrung liefert der Transporter den Stahl vom *SteelGate* zum Bohrpfahl. Gleichzeitig wird die Anzahl von Betonmischern durch seine Kapazität und die ausgebaggerten Bodenvolumen bestimmt. Alle angeforderten Betonmischer nehmen Beton mit und fahren hintereinander vom *ConcreteGate* auf die Straßen. Wenn der Bagger ankommt, transportiert er nach dem Bohren sofort den Boden zum Abfalllager *DumpGate_P*, dann fährt er wieder zurück. Dieser Vorgang endet erst, wenn der gesamte ausgebohrte Boden zum *DumpGate_P* geliefert wurde. Das Ende der Ausführung des aktuellen Bohrpfahls ist der Anfang

seines Nachfolgers, deshalb werden die besetzten Ressourcen am Ende zum nächsten Bohrpfahl bewegt.

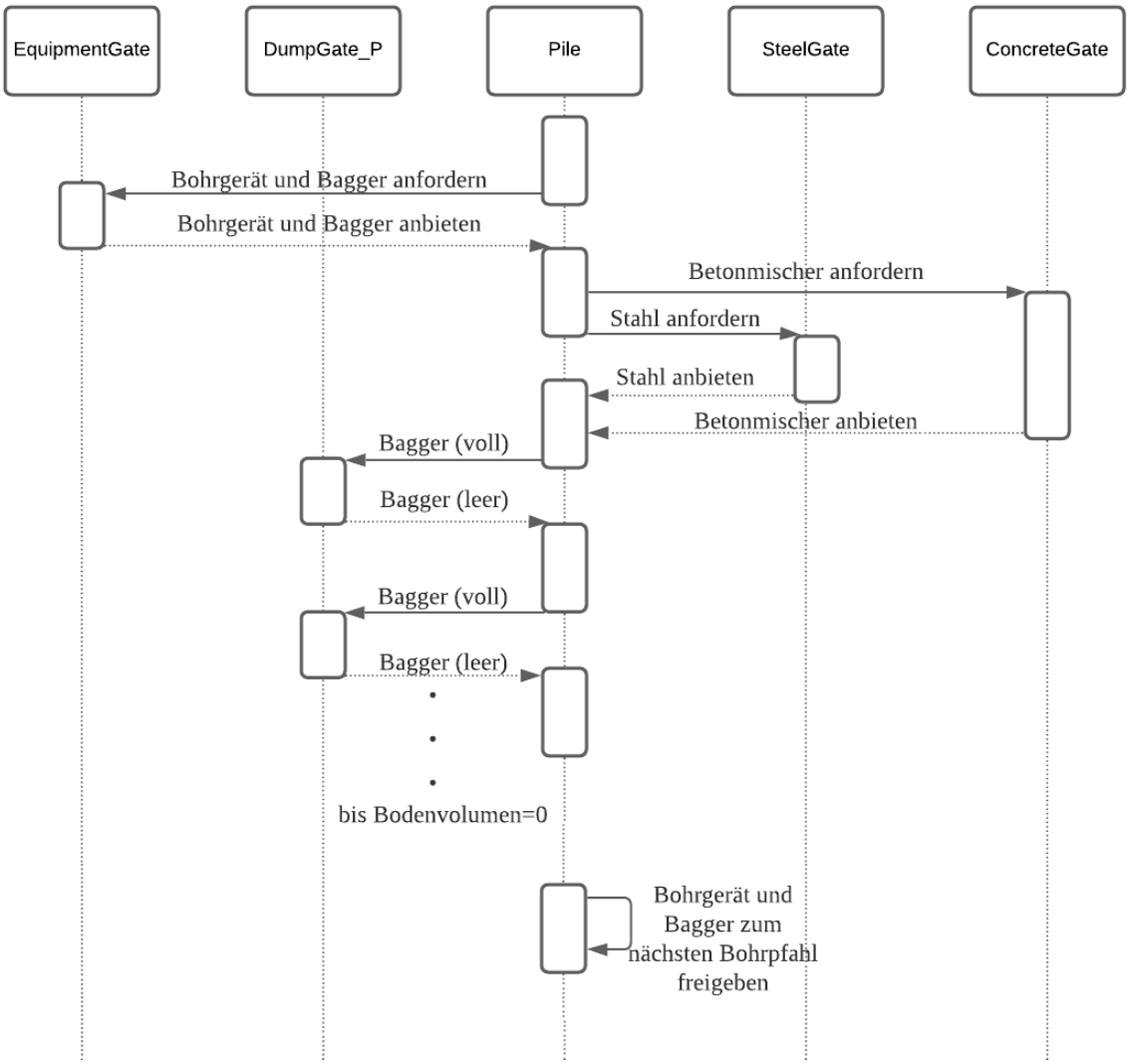


Abbildung 3-11: Interaktion zwischen Bohrpfählen und Lagern von Ressourcen

3.3.4 Optimierungsansatz

Die Dauer jedes Subprozesses wird durch die ausgewählte Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt. Damit die Ergebnisse der Simulation realitätsnah sind, sollen die Eingangsdaten aus Erfahrungen stammen. Außerdem bietet das Simulationsmodell fünf Arten von Wahrscheinlichkeitsfunktionen. Somit kann der Nutzer das Modell mit verschiedenen Wahrscheinlichkeitsfunktionen testen, um die beste Variante auszusuchen und die Robustheit zu überprüfen.

Normalverteilung

Mit dem Erwartungswert u und der Standardabweichung σ stellt die Normalverteilung eine Glockenkurve dar, diese kann durch die Formel [Wol-2021]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-u}{\sigma})^2} \tag{3-12}$$

beschrieben werden.

Dreiecksverteilung

Wie der Name sagt, repräsentiert die Dreiecksverteilung eine dreieckige Form. a, b sind die X-Werte der unteren Punkte, und c ist der X-Wert des Scheitelpunktes. Die Formel [Wol-2021] dazu ist:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & c < x \leq b \end{cases} \tag{3-13}$$

Gammaverteilung

Die Gammaverteilung ist auf den positiven Zahlenbereich beschränkt, sie kann durch die Formel [Wol-2021]

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta-\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e - \frac{x}{\beta} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \tag{3-14}$$

mit den Parametern α und β beschrieben werden.

Lognormalverteilung

Die Lognormalverteilung beschreibt die positiven Werte der Normalverteilung, deswegen ist die Formel [Wol-2021]:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e - \frac{(ln\, x - u)^2}{2\sigma^2} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (3\text{-}15)$$

Weibullverteilung

Die Weibullverteilung, die durch Parameter α und β definiert wird, ist auch positiv. Aber die Formel [Wol-2021]

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (3\text{-}16)$$

sieht ganz anders als die Gammaverteilung aus.

3.4 Simulationsmodell der Prozesssimulation in der Mikrosimulation

Dieses Simulationsmodell für die Prozesssimulation ist speziell für die Prozesse des Brückenbauprojekts Westtangente Rosenheim (WTRO) (s. Abschnitt 5.1.1) entwickelt worden. Das wichtige Ziel ist. dass die Ist-Daten zur Terminplanoptimierung für die Makrosimulation zur Verfügung stehen.

3.4.1 System

Die Prozesssimulation ist eine aktivitätsorientierte Simulation mit Echtzeiten, die eine Bohrpfahlherstellung des Projektplans beschreibt. Sie bildet eine Visualisierung über die Aktivitäten bezüglich des derzeitigen Tiefenstands des Baugerätes, damit kann der Nutzer die realen Aktivitäten mit Tiefdaten verfolgen.

3.4.2 Eingangsdaten

Für die Prozesssimulation müssen drei Excel-Dateien gleichzeitig ins Modell eingeladen werden. Die erste beinhaltet das Hauptblatt (s. Abschnitt 3.2.3) und das aus der Makrosimulation resultierende Blatt *Soll-Plan* des Projektplans. Die beide Blätter sind für die Aktualisierung der Fortschritte und eine Prognose über die Dauer der restlichen Prozesse verantwortlich. Die zweite Datei ist eine Tabelle mit einer Reihe von realen Aktivitäten der Bauarbeiten mit ihren Echtzeitpunkten des Auftretens. Die dritte enthält die Maschinendaten des Baugerätes mit einem sekündlichen Zeitintervall. Die letzten beiden Tabellen müssen mit einem gleichen Zeitraum innerhalb des Projekts gekennzeichnet werden. D. h., sie zum gleichen Bohrpfahl gehören.

3.4.3 Optimierungsansatz

Eine wichtige Funktion der Prozesssimulation ist die Fortschrittsberechnung und Protokollierung dieser Ergebnisse in der Excel-Datei des Projektplans. Bei der Makrosimulation wird die Prozessdauer in Tagen gekennzeichnet, aber das Programm der Prozesssimulation berechnet in Sekunden. Aufgrund dieses Unterschieds muss die simulierte Zeit bei der Endausführung der Simulation zunächst zu Tagen verwechselt werden. Nachdem der Start-Prozess sicher als geschlossen gesetzt ist, suchen die Simulationsprogramme den nicht begonnenen Prozess mit dem frühesten Startzeitpunkt. Dieser Prozess wird als den Maschinendaten beschriebenen Prozess gekennzeichnet. Sein zeitlicher Fortschritt wird auf 1 verändert, gleichzeitig wird der neue Endzeitpunkt des aktuellen Prozesses eingetragen. Dabei bietet es eine Prognose über die Dauer des gleichen Modus der nicht ausführenden Prozesse und schreibt diese Prognose im Hauptblatt des Projektplans ein. Somit wird eine halbautomatische Kombination mit der Makrosimulation realisiert.

3.5 Zyklischer Ansatz zur Kombination der Makro- und Mikrosimulation

3.5.1 Allgemeine Bauablaufplanung

In der Bauindustrie werden Störungen während des Bauablaufs immer durch unplanmäßige Verzögerungen oder Unterbrechungen des Bauvorhabens verursacht. Basierend auf Änderungen muss die Bauablaufplanung rechtzeitig reagieren und aktualisiert werden, um sie an die Realität anzupassen. Daher steht ein Regelkreis (s. Abbildung 3-12) über die Bauablaufplanung.

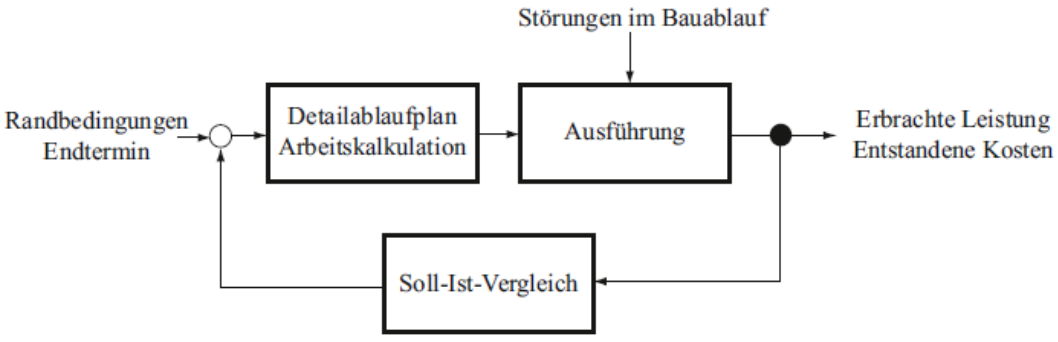


Abbildung 3-12: Ablaufplanung als Regelkreis [Gün-2011]

Vor dem Beginn eines Bauprojekts fasst der Leistungsträger den unternehmerischen Entschluss zur Planung und Ausführung eines Werkes und übernimmt die Pflichten und Rechte, die sich aus einem derartigen Entschluss ergeben [Bau-2007]. Nach dem

Ausschreibungsplan des Bauherrn wird der erste Detailablaufplan und die Arbeitskalkulation erstellt [Gün-2011]. Der realistische Ausführungszeitraum wird durch die Umwelt unplanmäßig beeinflusst, daher ist die praktische Ausführungszeit anders als die vorher geplante Zeit. Je mehr Störungen vorhanden oder stärker ausgeprägt sind, desto größer ist die Abweichung zwischen den Ist- und Soll-Daten. Diese Unsicherheit verursacht den Soll-Ist-Vergleich während der Ausführungsphase. Der originale Terminplan wird als Soll-Plan gekennzeichnet, und der praktische Terminplan als Ist-Zustand betrachtet. Derartige Vergleiche können regelmäßig nach eine definierten Zeitplan durchgeführt werden oder werden durch unvorhersehbare Ergebnisse angeregt [Gün-2011]. Nach der Anpassung wird ein neuer Terminplan für das Bauprojekt erstellt. Er ist der neue Soll-Plan für die nächste zyklische Anwendung.

3.5.2 Datenaustausch

In dieser Arbeit wird der Soll-Ist-Vergleich durch den Datenaustausch zwischen Makro- und Mikrosimulation realisiert, um die Projektplanung immer dem aktuellen Zustand der Bauausführung anzupassen. Die erfolgreiche Kombination der Makro- und Mikrosimulation basiert nicht nur auf den realitätsnahen Simulationsergebnissen, sondern auch auf dem übereingestimmten Austauschformat der Daten.

Die neue Kombination wird basierend auf den digitalen Daten aus der praktischen Baustelle untersucht. Um diese Daten im Bereich Planoptimierung tiefer erforschen zu können, wird ein Simulationsmodell (s. Abschnitt 3.3) für den Bauablauf in der Mikrosimulation hinzugefügt. Dieses Modell bietet die Möglichkeit, einen Projektplan bezüglich der Erfahrungswerte mit theoretischen Berechnungen zur Verfügung zu stellen statt in herkömmlicher Weise manuell herzustellen. Das Ablaufsimulationsmodell wird mit Hilfe der vorliegenden Bausteine entwickelt, deshalb wird die MySQL-Datenbank als Datenspeicher erstellt. Zu einer erfolgreichen Interaktion zwischen den Modellen für die Kombination werden die Eingangsdaten der anderen zwei Modelle auch in die MySQL-Datenbank übertragen. Mit dieser Nutzung kann sich das Modell direkt mit der Datenbank verbinden, um die benötigen Daten zu greifen; dabei wird der Importdaten-Schritt vor der Simulation weggelassen.

Datenaustausch zwischen Makrosimulation und Ablaufsimulation

Die Ablaufsimulation simuliert den Ablauf des untersuchten Projekts. Die Zeitdauer jedes Prozesses wird nach Erfahrungswerten berechnet. Obwohl die Ergebnisse nicht die tatsächlichen Werte sind, können sie als grundsätzliche Projektplanungsdaten für die Makrosimulation verwendet werden.

Für die Kombination werden Start- und Endzeitpunkt bei jedem Ende des Subprozesses protokolliert, daraus ergebt sich die Zeitdauer jedes Subprozesses. Außerdem muss die Zeitdifferenz zwischen den nebeneinander ausgeführten Subprozessen bestimmt werden. Die Eingangsdaten der Ablaufsimulation beschreiben nur Nachfolger-Beziehungen, deswegen ist es schwer, den Vorgänger des aktuellen Subprozesses während der Ausführung zu erkennen. Um solche Schwierigkeiten zu vermeiden, berechnen die Simulationsprogramme am Ende der Ablaufsimulation. Die oben genannten Ergebnisse mit anderer Information werden als ein Modus für den Projektplan gespeichert, die als Eingangsdaten der Makrosimulation zuständig sind.

Datenaustausch zwischen Makrosimulation und Prozesssimulation

Das neu hinzugefügte Ablaufsimulationsmodell macht die Modellverknüpfung zwischen Makro- und Prozesssimulation erforderlich, zwei Situationen in der praktischen Anwendung sind zu berücksichtigen. Eine ist, dass die Projektplandaten vom Bauherrn beschafft werden. Die andere ist, dass diese Daten die simulierten Daten aus der Ablaufsimulation bekommen. Die Unterschiede dazwischen sind, dass die Daten vom Bauherrn über mindestens zwei Modi jedes Prozesses verfügen, die Daten aus der Simulation jedoch nur einen Modus jedes Subprozesses beschreiben.

Bei den Projektplanungsdaten vom Bauherrn ist der wichtige Punkt zur Verbindung die Übereinstimmung der Definition des Prozesses. In der Vorarbeit [Li-2020] werden die Prozesse aus Makrosimulation und Prozesssimulation gleich betrachtet. In der Praxis ist die Planoptimierung der Makrosimulation auf die Prozesse ausgerichtet. Im Gegensatz dazu simuliert das Prozesssimulationsmodell einen ganzen Subprozess. Mit der Annahme der Anzahl von Subprozessen und der Anzahl von nicht abgeschlossenen Subprozessen jedes Prozesses ist dieses Problem lösbar. Allerdings müssen die Informationen über den aktuellen Prozess und Ressourcen beigefügt werden, um die Aktualisierung an die reale Situation anzupassen. Hierbei werden die nicht dem Ist-Zustand angepasste Modi des aktuellen Prozesses gelöscht, damit die Planoptimierung in der Makrosimulation nicht mit den Ist-Daten in Konflikt zu gerät.

Bei dem Projektplanungsdaten aus der Ablaufsimulation ist die Kombination einfacher, weil die betrachteten Vorgänge der Ablauf- und Prozesssimulation gleich sind. Daher kann der in der Prozesssimulation simulierte Subprozess mit einer Daueraktualisierung als geschlossen gesetzt werden, wenn der Name des Subprozesses schon bekannt ist.

3.5.3 Fortschrittsberechnung

Bei der Makrosimulation wird ein Terminplan mit Start- und Endzeitpunkt für jeden Prozess erstellt, deswegen kann die erwartete Dauer berechnet werden. Für den aktuellen betrachteten Prozess wird sein Startzeitpunkt aus dem Terminplan einfach angenommen. Der Endzeitpunkt der Prozesssimulation wird als den aktuellen Zeitpunkt betrachtet. Damit kann über die Formel

$$zeitl.\ Fortschritt = \frac{aktueller\ Zeitpunkt - Startzeitpunkt}{Endzeitpunkt - Startzeitpunkt} \tag{3-17}$$

der aktuelle Fortschritt einfach berechnet werden.

Dies kann zu einer Verformungsformel

$$zeitl.\ Fortschritt = \frac{aktuelle\ Zeitdauer}{Gesamtdauer} \tag{3-18}$$

transformiert werden.

In dieser Arbeit wird eine funktionale Verbindung untersucht, wenn alle Subprozesse eines Prozesses gleich betrachtet werden, d. h. die Zeitdauer jedes Subprozesses identisch ist. Darüber hinaus beschreiben die Eingangsdaten der Prozesssimulation immer einen ganzen Subprozess. Daher ist die Verformungsformel weiter verformbar. Folglich wird die neue Formel

$$zeitl.\ Fortschritt = \frac{Anzahl\ von\ geschlossenen\ Subprozessen}{Anzahl\ von\ Subprozessen} \tag{3-19}$$

so ausgesehen.

In der Praxis ändert sich der erwartete Endzeitpunkt, wenn die tatsächliche Bauzeit nicht mit der geplanten Bauzeit übereinstimmt. Diese Formel vermeidet, dass instabile Werte zur Berechnung verwendet werden.

4 Implementierung

4.1 Erweiterung der Makrosimulation

Auf Basis der vorliegenden Makrosimulation ist es möglich, einen optimalen Terminplan für die Projektplanung zu liefern. Allerdings ist die Implementierung des dreiteiligen Konzepts (s. Abschnitt 3.1) dieser Arbeit sinnvoll, wenn eine übereinstimmte Austauschformat jedes Datentyps eingesetzt wird. Dazu muss die Makrosimulation noch erweitert werden.

Die Modellierung der Makrosimulation erfolgte in der Simulationssoftware Plant Simulation Version 15.1.

4.1.1 Ziel und Anforderung

Aufgrund der fehlenden Datenzugang und -ausgang für die SQL-Datenbank erfordern neue Import- und Exportart in das Simulationsmodell der Makrosimulation. Damit soll das erweiterte Modell die folgenden Anforderungen gleichzeitig erfüllen. Außerdem soll die Funktion für den Soll-Ist-Vergleich an die SQL-Datenbank anpassen.

Keine Verhinderung von vorhandenem Datenabruf und -einschreibung

Der neue Datenzugang und -ausgang sind nur erweiterte Funktionen der bisherigen Verwendbarkeit. Diese sollen die vorhandenen Varianten nicht beeinflussen.

Keine Schädigung der Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung ist für die Optimierungsergebnisse verantwortlich, deswegen darf diese nicht gestört werden.

Einordnung von neuen Bausteinen und Funktionen im entsprechenden Bereich

Die Makrosimulation ist ein komplexes Simulationsmodell. Um es intuitiv zu bedienen, ist es besser, dass die hinzugefügten Bausteine und Funktionen nach dem originalen Teilungsprinzip eingeordnet werden.

Keine Änderungen oder nur Ergänzung der existierenden Funktionen und Bausteine

Die vorliegenden Funktionen und Bausteine werden durch die Simulationsprogramme interaktiv beeinflusst. Eine Änderung kann zu Fehlern führen.

Automatische Verbindung mit der Datenbank

Aufgrund der halbautomatischen Kombination zwischen den Makro- und Mikrosimulation kann durch eine automatische Verbindung mit der Datenbank viele Bedienung gespart werden.

Annahme der vorliegenden Austauschformate

Die Makrosimulation ist schon durch die Excel-Datei mit der Prozesssimulation verbunden. Darüber hinaus ist es empfehlenswert, das Format direkt anzunehmen.

4.1.2 Neue Bausteine und Funktionen

Die Verbindung zwischen der Datenbank und der Makrosimulation wird durch das Netzwerk *ODBC* erstellt. Mit der entsprechenden Eingabe ist es möglich, die benötigten Daten aus der Datenbank zu greifen.

Der neue Bearbeitungsbereich für MySQL wird im Netzwerk *Import_Projekt_Multi-Mode* eingesetzt (s. Abbildung 4-1), der unter dem Bereich für Excel steht. Die Methode *Import_MySQL* steuert den Import-Vorgang am Anfang der Simulation. Die Projektplanungsdaten werden in der Tabelle *Importtabelle_MySQL* gespeichert. Die anderen zwei Tabellen können jederzeit besucht werden, um die entsprechenden Informationen über das aktuelle Projekt selbst zu definieren und zu überprüfen. Oben rechts stehen drei Variablen, die für die Verbindung durch das Netzwerk *ODBC* verantwortlich sind. Die eingelesenen Daten werden in die Tabelle *Importtabelle_Excel* transportiert. Wegen des gleichen Formats von Excel-Datei und MySQL-Datei werden die Methoden für die Excel-Datei genutzt, damit entstehen weniger Änderungen der Makrosimulation bei der Erweiterung.

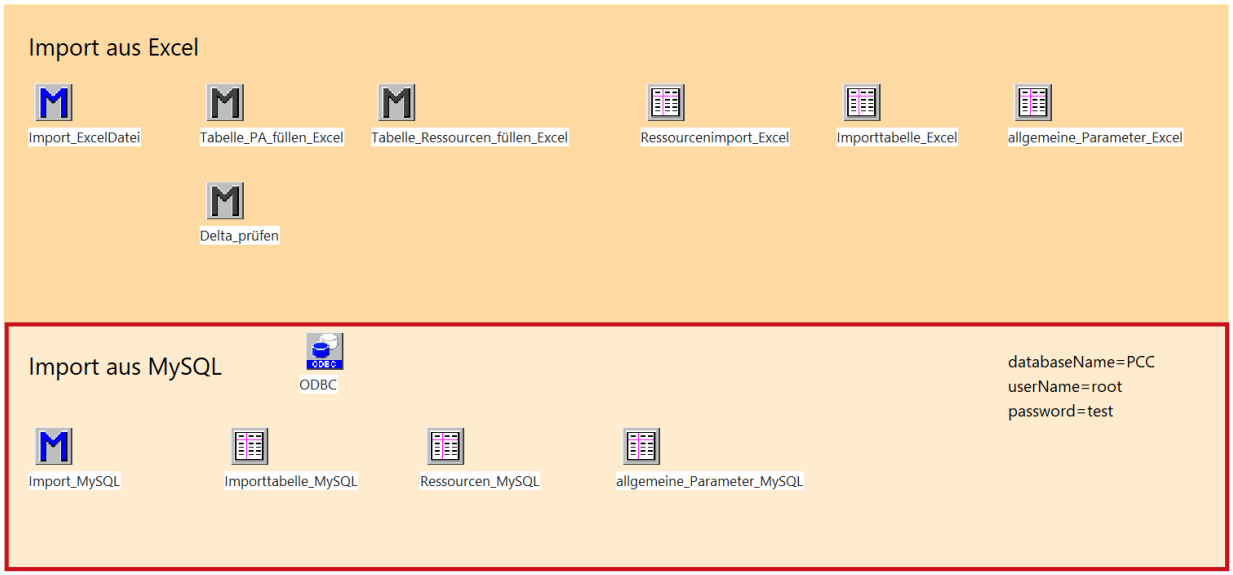


Abbildung 4-1: Neuer Bereich für MySQL im Import_Projekt_MultiMode

Die Eingabe der neuen Importart wird als eine Option auf dem Eingabe-Dialog hinzugefügt (s. Abbildung 4-2 links). Wenn die Option *aus MySQL* ausgewählt wird, werden die anderen vorliegenden Texteingabebereiche auf dem Blatt *Plan Wählen* blockiert, um falsche Eingaben zu verhindern. Außer der Eingabe der neuen Importart wird darunter ein Dropdownlistenfeld, auf dem die Quelle des aktuellen Projektplans ausgewählt wird, im Blatt *Plan Wählen* hinzugefügt (s. Abbildung 4-2 rechts). Dies ist schon im Abschnitt 3.5 erklärt, werden zwei Quellen der Projektplanungsdaten in dieser Arbeit untersucht. Bei *aus Terminplan* wird der Plan aus dem Projektplan direkt angenommen, darin besitzt jeder Prozess mindestens zwei Modi. Bei *aus Ablaufsimulation* heißt, dass der Plan das Ergebnis aus der Ablaufsimulation ist, daher werden einzelne Subprozesse darin aufgelistet.

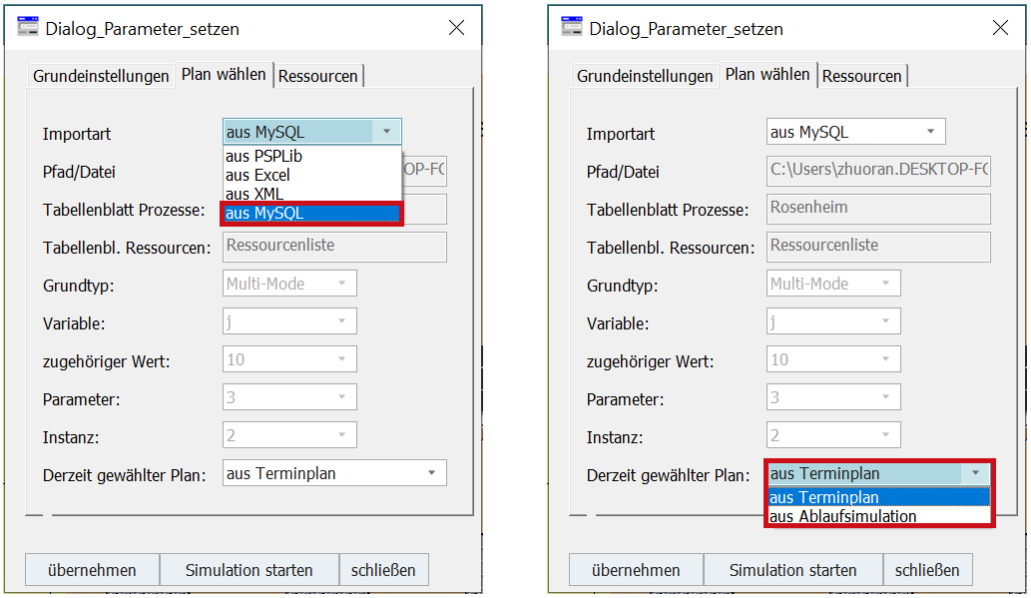


Abbildung 4-2: Erweiterter Eingabe-Dialog für die Makrosimulation

Bei jedem Ende eines einzelnen Prozesses der Makrosimulation werden Start- und Endzeitpunkt sowie sein Modus protokolliert. Diese Informationen über alle Prozesse werden zusammen als Soll-Plan der Prozesssimulation betrachtet. Daher wird in der Methode *Ende_Ausführung* des Netzwerks *Prozessagent_MultiMode* eine neue Funktion, die die Einschreibung des Soll-Plans bei Ende der Makrosimulation in der MySQL-Datenbank ausrichtet, hinzugefügt. Um den Soll-Ist-Vergleich bezüglich der SQL-Datenbank in der Makrosimulation zu funktionieren, werden auch die Methode *aktueller_Zustand_importieren* und *Tabelle_PA_Liste_befüllen* im Netzwerk *Ist_Daten* erweitert, somit können Ist-Daten eingelesen und zum Soll-Plan übermittelt werden.

4.2 Erweiterung der Prozesssimulation

Nicht nur das Austauschformat, sondern auch die neue Strategie zur Fortschrittsberechnung erfordern die Erweiterung der Prozesssimulation, damit werden die digitalen Daten aus der Baustelle in die Untersuchung einbezogen. Dies ist sinnvoll für die praktische Anwendung mit dem entwickelten Simulationssystem.

Die Modellierung der Prozesssimulation erfolgte in der Simulationssoftware Plant Simulation Version 15.1.

4.2.1 Ziel und Anforderungen

Außer der Anpassung der Datenbank sind die Informationen, die aus den digitalen Daten geliefert werden, zu berücksichtigen. Der simulierte Vorgang der Prozesssimulation ist ein Subprozess; er kann zu jedem Prozess in der Makrosimulation gehören. Daher kann der zeitliche Fortschritt nicht mehr einfach als 1 angenommen werden, sondern berechnet dieser wird durch die Information aus den bereitgestellten digitalen Daten. Es ist noch wichtig, Prognosen für die nachfolgenden Prozesse basierend auf dem aktuellen Zustand zu treffen. Dafür sprechen die folgenden Anforderungen.

Automatische Verbindung mit der Datenbank

Analog zur Makrosimulation wird die Bedienung vor dem Simulationsbeginn erleichtert, wenn das Modell automatisch mit der Datenbank verbunden ist.

Keine Verhinderung der bestehenden Datenzu- und -ausgänge

Um die vorige Verwendbarkeit nicht zu schädigen, sollen vorliegende Datenzu- und -ausgänge verbleiben.

Keine Schädigung der Simulation von Aktivitäten

Die Simulation der realen Aktivitäten legt die Grundlage für die nachfolgenden Fortschrittsberechnung, deshalb soll dieser Simulationsvorgang während der Prozesssimulation nicht gestört werden.

Erhöhte Genauigkeit der Zahlen

Mit der Berücksichtigung der digitalen Daten sind die zeitlichen Fortschritte jedes Prozesses nicht mehr eine binäre Zahl, sondern eine positive reelle Zahl von 0 bis 1. Die höhere Genauigkeit garantiert die Richtigkeit während der Berechnungen.

4.2.2 Neue Bausteine und Funktionen

Zur Ausführung der Prozesssimulation werden die digitalen Daten mit dem aus der Makrosimulation resultierenden Soll-Plan zusammen eingelesen, deshalb ist es nötig, dass die Option *aus MySQL* bei Eingabe auch in der Prozesssimulation hinzugefügt wird. Nach der Simulation von Aktivitäten ist zuerst die Zugehörigkeit des aktuellen Subprozesses zu kennen, dann kann die Fortschrittsberechnung ausgeführt werden. Um den aktuellen Subprozess zu kennzeichnen, wird der Eingabe-Dialog erweitert (s. Abbildung 4-3). Der Name des Subprozesses beinhaltet die Zugehörigkeit, deswegen wird ein Eingabebereich dazu eingefügt. Um die fehlenden Informationen über Ressourcen der vorherigen Version der Prozesssimulation [Li-2020; Fis-2021] auszugleichen, wird noch eine Dropdown-Liste darunter eingefügt. Analog zur Makrosimulation steht auch ein Auswahlbereich für die Quelle in der Prozesssimulation zur Verfügung.

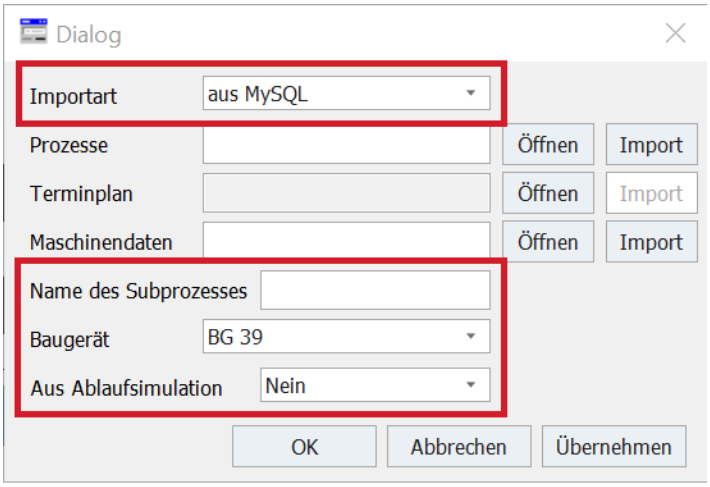


Abbildung 4-3: Erweiterter Eingabe-Dialog für die Prozesssimulation

Die Abbildung 4-4 zeigt die neue Einordnung des Netzwerks *Excel_Impot*. Hier werden alle Methoden und Tabellen für die Datenverarbeitungen dargestellt. Oben rechts steht

den Arbeitsbereich für die Verbindung mit der Datenbank. Der Bereich ist ähnlich wie in der Makrosimulation geordnet, darin stehen die Methode zur Steuerung, das Netzwerk zur Verbindung und Variablen für den Zugang zur Datenbank. Das untere rote Rechteck markiert den Bereich für Fortschrittsberechnung und Export. Die Methode *Fortschritt_Berechnen* wird nach der Quelle von Daten um zwei Variante erweitert. Dazu wird noch eine Tabelle *Subprozesse* hinzugefügt, die die Informationen über die Anzahl von Subprozessen jedes Prozesses und die Anzahl von noch nicht abgeschlossenen Subprozessen jedes Prozesses darstellt. Die Tabelle *Fortschritt* speichert zuerst den eingelesenen Soll-Plan. Nach der Fortschrittsberechnung wird diese Tabelle aktualisiert. Sie beinhaltet damals Ist-Daten für die Makrosimulation. In der Tabelle *Rosenheim* stehen den eingelesenen Terminplan. Die Dauer des aktuellen Prozesses oder Subprozesses (abhängig von Quellen) wird auch aktualisiert.

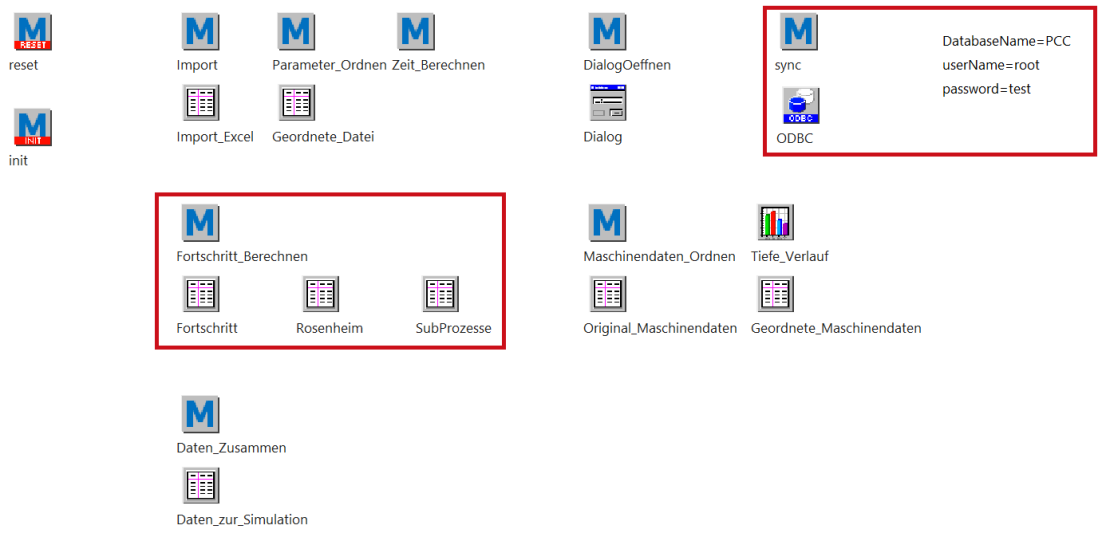


Abbildung 4-4: Erweitertes Netzwerk für die Datenverarbeitung

Daten aus Ablaufsimulation

Bei dieser Variante wird kennzeichnet der eingegebene Name den Subprozess, deshalb wird nur die Dauer des gekennzeichneten Subprozesses aktualisiert. Die Subprozesse vor dem aktuellen Subprozess werden alle als geschlossen (zeitlicher Fortschritt gleich 1) gekennzeichnet. Falls die aktuell verwendete Ressource nicht mit der Eingabe kompatibel ist, ändert sich, um den Plan den Ist-Zustand anzupassen. Die Information über die restlichen Subprozesse wird gelöscht. Diese zusammen werden als Ist-Daten wieder zur Makrosimulation übergeben, damit wird eine zyklische Kombination realisiert.

Daten aus Terminplan

Bei den allgemeinen Terminplan wird der aktuelle Prozess aus dem Namen herausgenommen, dann suchen die Simulationsprogramme diesen Prozess im eingelesenen Soll-Plan, um den aktuellen Prozess zu bestimmen. Wenn Prozesse, die vor dem aktuellen Prozess ausgeführt werden sollen, nicht abgeschlossen (zeitlicher Fortschritt nicht gleich 1) sind, ändern sich diese zugehörigen Fortschritte auf 1. Der derzeitige Fortschritt wird nach der Formel (3-19) berechnet, und wird das Ergebnis in die Tabelle *Fortschritt* übergeben. Am Ende werden neue Schätzungen zur Dauer, die zu allen nicht ausgeführten Prozesse bezüglich des gleichen Modus gehören, basierend auf den derzeitigen Informationen ausgegeben. Auch werden die nicht angepassten Modi des aktuellen Prozesses aus der Tabelle *Rosenheim* gelöscht.

4.3 Modellbildung für die Ablaufsimulation

Die Modellbildung basiert auf dem vorliegenden Simulationsmodell (s. Abschnitt 3.3). Mit Hilfe der vorliegenden Bausteine wird eine Simulationsumgebung bezüglich des Brückenbauprojekts Westtangente Rosenheim (s. Abschnitt 5.1.1) aufgebaut, um den Ablauf des Projekts in der Simulation zu untersuchen und zu testen.

Die Modellierung der Ablaufsimulation erfolgte in der Simulationssoftware Plant Simulation Version 15.1.

4.3.1 Unterschiede zwischen Bohrpfahlwänden und dem Brückenfundament des Brückenbauprojekts

Das vorliegende Ablaufsimulationsmodell bietet die Möglichkeit, die Herstellung von Bohrpfahlwänden zu simulieren. Es bedeutet, dass Bohrpfähle in einer Reihe mit dem gleichen Abstand hergestellt werden. Nach verschiedenen Abständen werden Bohrpfahlwände in drei Gruppe unterteilt: tangierende, überschnittene, und aufgelöste Bohrpfahlwände (s. Abbildung 4-5).

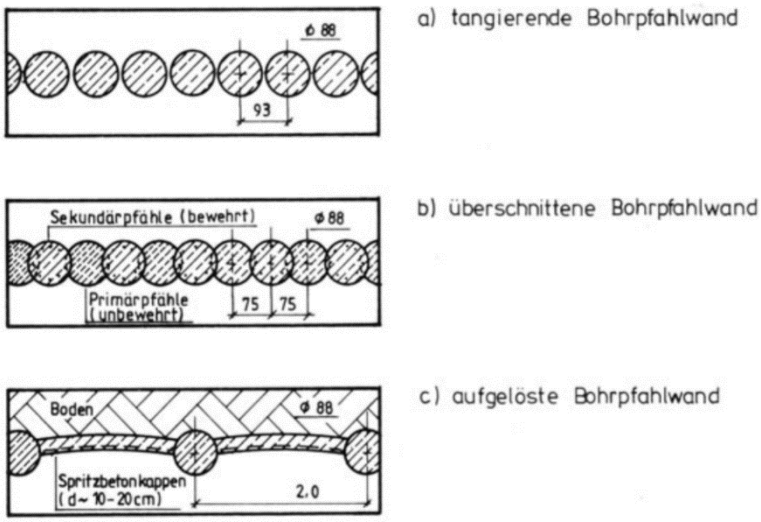


Abbildung 4-5: Beispiele für Grundrisse von verschiedenen Bohrpfahlwänden [Sch-1995]

Bohrpfähle eines Brückenfundaments des Bauprojekts ordnen sich jedoch in mindestens zwei Reihen. Die Abbildung 4-6 zeigt den Grundriss der Achse 10 des Brückenbauprojekts WTRO. Zehn Bohrpfähle (schwarz mit Kreuz) sind in zwei Reihen gleichmäßig angeordnet. Vertikaldrains (blau) und Verdrängersäulen (rot) sind um die Bohrpfähle angeordnet.

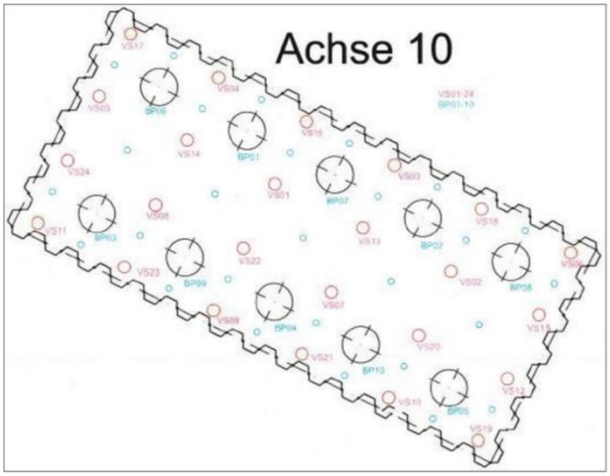


Abbildung 4-6: Grundriss der Achse 10 von WTRO [TUM-2018]

Dieser Unterschied lässt Algorithmen zur Bestimmung der Positionen von Bohrpfählen unannehmbar sein, deshalb wird sie in der Simulation dieser Arbeit nicht angewendet.

4.3.2 Lösungskonzept zur Anpassung

Um das Brückenbauprojekt in das Ablaufsimulationsmodell, das für das allgemeinen Tiefbauprojekt entwickelt wird, einzubeziehen, wird jede Pfahlgründung statt der Pfahlwand als ein Prozess in der Ablaufsimulation bezeichnet. Weil das Netzwerk für die Pfahlwand keinen Zeitaufwand besitzt, wird dieses direkt für die Pfahlgründung des

Brückenbauprojekts bei der Modellierung angenommen, dabei können die vorliegenden Bausteine genutzt werden.

Im Vergleich zu den Abständen der Pfahlgründungen sind die Abstände zwischen den Bohrpfählen innerhalb einer Pfahlgründung sehr klein. Daher werden diese Abstände bei der Modellierung vernachlässigt, d. h., die Positionen von Bohrpfählen aus einer Pfahlgründung werden gleich betrachtet.

Der Hintergrund des entwickelten Simulationsmodells ist der Grundriss des Bauvorhabens WTRO (s. Abbildung A-1). Einerseits ist die Darstellung von Bauarbeiten intuitiv, andererseits ermöglicht sie einen Überblick über die Positionen der Bohrpfählen. Die Zugehörigkeit jedes Bohrpfahls ist auch durch diese Einstellung erkennbar.

4.3.3 Aufbau des Modells

Das Ablaufsimulationsmodell stammt aus einem Bearbeitungsbereich (unten) und einem Abbildungsbereich(oben) (s. Abbildung 4-7). Der Bearbeitungsbereich ist gleich wie die Vorlage aus dem Modell angeordnet (s. Abschnitt 3.3.1).

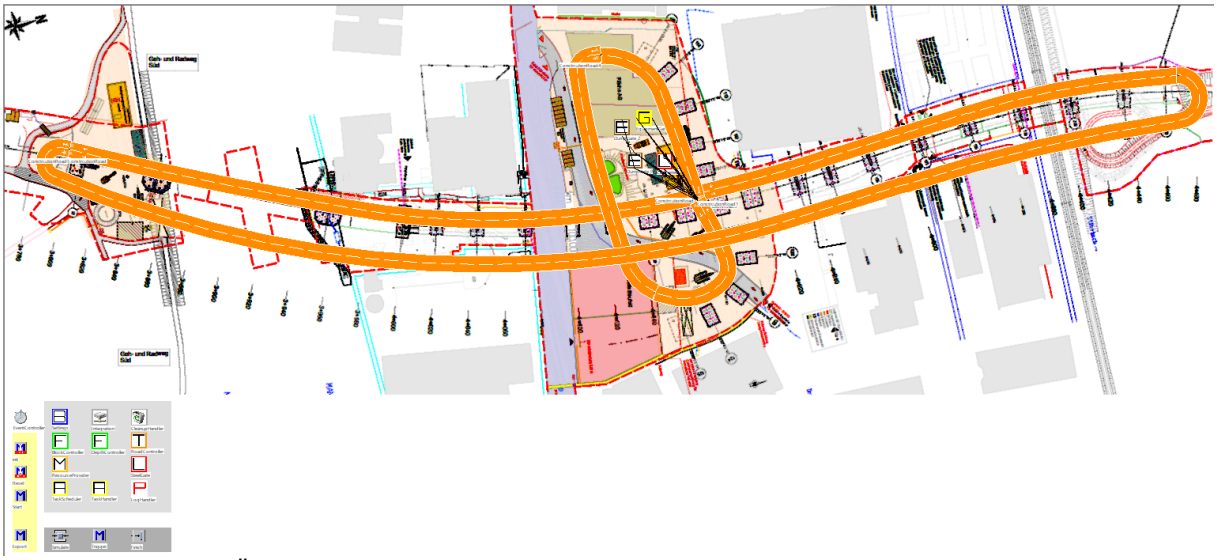


Abbildung 4-7: Übersicht des Ablaufsimulationsmodells

Im Abbildungsbereich werden zwei Baustraßen im Kreis längs der Positionen von Pfahlgründungen abgebildet, damit können die Ressourcen jeden Bohrpfahl erreichen. Außer dem *SteelGate*, der im Bearbeitungsbereich steht, befinden sich die Lager für die anderen Ressourcen zusammen in der Mitte der Baustelle. Alle werden mit jeder Straße verbunden, somit gibt es keine Einschränkungen beim Fahren. Das Lager *DumpGate_Z* wird bei der Ausführung der Bohrpfähle nicht angewendet, aber muss aufgrund der Einschränkung der Simulationsprogrammen vorhanden sein.

4.3.4 Erweiterung zur Verbindung mit der Makrosimulation

Das wichtige Ziel der Ablaufsimulation ist, dass die Eingangsdaten der Makrosimulation zur Verfügung stehen. Einerseits sollen die Zeitdauer jedes Bohrpfahls und die Zeitdifferenz zwischen den nacheinander ausgeführten Bohrpfählen protokolliert werden. Andererseits sollen diese Informationen in einer richtigen Form in der MySQL-Datenbank gespeichert werden, um diese Daten direkt für die Makrosimulation anzunehmen.

Dazu werden zwei neue Tabelle im Netzwerk erstellt: *PG_Dauer* und *Rosenheim* (s. Abbildung 4-8). Bei jedem Ende des Bohrpfahls schreiben die Simulationsprogramme seinen Start- und Endzeitpunkt in der Tabelle *PG_Dauer*. Die Zeiteinheit der Makrosimulation ist der Tag, aber der Ablauf ist in Sekunden dargestellt. Vor dem Eintrag der Dauer soll zuerst die Zeiteinheit zum Tag umgeformt werden. Durch das Netzwerk *ShiftCalendar* im Netzwerk *Settings* werden 12 Arbeitsstunden als ein Arbeitstag definiert. Daher werden 12 Stunden als ein Tag bei der Berechnung bestimmt. Vor der Endausführung der Simulation wird die Zeitdifferenz zwischen den hintereinander ausgeführten Bohrpfählen berechnet. Auch lesen die Programme das vorgespeicherte Format in die Datenbank ein, das gleich wie das Format der Projektplanungsdaten für die Makrosimulation ist, dann werden diese in der Tabelle „Rosenheim“ vervielfältigt. Die berechneten Ergebnisse (Dauer und Zeitdifferenz) werden danach in die Tabelle „Rosenheim“ eingetragen. Zum Schluss deckt diese neue Tabelle mit Dauer und Zeitdifferenz direkt das vorgespeicherte Format in der Datenbank ab, sodass die Eingangsdaten für die Makrosimulation vorbereitet sind.

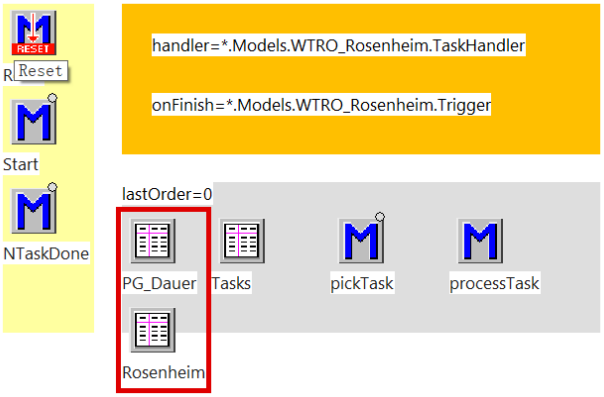


Abbildung 4-8: Erweitertes Netzwerk TaskScheduler

5 Verifikation und Validierung

5.1 Simulationsstudie

Die Simulationsstudie dieser Arbeit wird durch die realen Daten aus dem Brückenbauprojekt Westtangente Rosenheim untersucht. Um das zur baubegleitenden Terminplanung entwickelte Simulationssystem anzuwenden, werden Datenbeschaffungen und -aufbereitungen vor der Ausführung von Modellen ausführlich beschrieben.

5.1.1 Das Brückenbauprojekt Westtangente Rosenheim

Für die Validierung des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Simulationsmodells dienen Daten der Baustelle Westtangente Rosenheim, kurz WTRO. Im Rahmen des Neubaus der Bundesstraße B15, Westtangente Rosenheim, entstehen zwei Brückenbauwerke mit einer Gesamtlänge von 650 m.

Die Brücke gliedert sich in zwei Teilbauwerke (s. Abbildung 5-1). Teilbauwerk 1 ist die Brücke über den Renkenweg, die Mangfall und den Mangfallkanal. Teilbauwerk 2 ist die Brücke über den Aicherpark und die DB-Linie.

Abbildung 5-1: Übersichtsplan des Neubaus der Bundesstraße B15, Westtangente Rosenheim, mit zwei Brückenbauwerken [Zim-2019]

Die Brücke ist in 32 Achsen unterteilt, die von Süden nach Norden von 10 bis 220 dokumentiert sind. Jede Achse entspricht einem Brückenfundament. Jedes Fundament ist auf einem Spundwandkasten gegründet, darin liegen mehrere Bohrpfähle,

Vertikaldrains und Verdrängersäulen. In einem Spundkasten gibt es immer zwischen 5 und 17 gleichartige Bohrpfähle, die von 26 bis 50 m lang sind [Wac-2020]. In dieser Arbeit wird nur die Herstellung der Bohrpfähle verfolgt.

Aufgrund der geologischen Gegebenheiten werden die Lasten der Brückenstützen über Fundamente mit anschließenden Bohrpfählen in den Untergrund eingeleitet (s. Abbildung 5-2). Die Pfahlkonstruktion wird auch schwimmende Gründung genannt, da die Pfähle nicht auf festem Felsen gründen und somit hauptsächlich über die Mantelhaftung tragen. Hier wird jedes Brückenfundament oder jeder Bohrpfahl als ein Vorgang im Terminplan betrachtet.

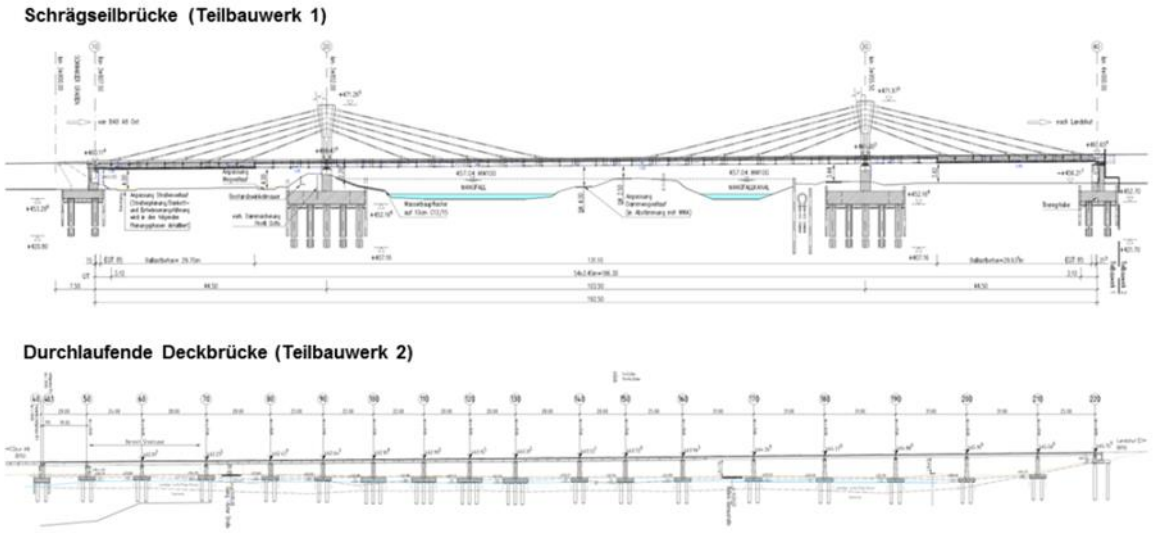


Abbildung 5-2: Schnittbilder der zwei Brückenbauwerke, aufgeteilt in Teilbauwerk 1 und Teilbauwerk 2, für den Neubau [Zim-2019]

5.1.2 Aufbau der Simulationsstudie

Aufgrund der Steigerung des Digitalisierungsgrads wird erwartet, dass Bauen in der Zukunft digitaler, modularer und stärker automatisiert wird, somit werden auch effizientere Bauarbeiten verwirklicht. Der Unikatcharakter von Bauprojekten und die Komplexität von großen Bauvorhaben führen dazu, dass die praktischen Bauarbeiten nicht nach dem vorherigen Terminplan durchgeführt werden. Die rechtzeitige Aktualisierung des Terminplans bietet die Möglichkeit, die Nutzung von Baumaschinen bezüglich des derzeitigen Projektzustands effizienter zu machen.

Mit diesem Wunsch verdient die Entwicklung eines Simulationssystem, das für die Kombination von Soll- und Ist-Daten zuständig ist, die Aufmerksamkeit. Aufgrund der Einzigartigkeit jeder Baustelle wird das Bauvorhaben WTRO als ein Beispiel in dieser Arbeit untersucht.

Die vorliegenden digitalen Daten werden in die entwickelte Hybrid-Simulation hereingebracht. Die Ablaufsimulation fokussiert auf den Vorgang jedes Bohrpfahls, sodass das ganze Bauprojekt basierend auf Erfahrungswerten simuliert wird. Die resultierenden Ergebnisse liefern die Grundlage für die Formulierung des Terminplans. Für das Simulationsmodell der Makrosimulation ist der Terminplan der Spezialtiefbauarbeiten unter Berücksichtigung von MRCPSP von Interesse. Das Modell ist in der Lage, die optimale Projektplanung aus den vorgegebenen Varianten herauszufinden. Nach den Eingangsdaten kann der Terminplan mit verschiedenen Detaillierungsgraden (Brückenfundament oder Bohrpfahl) ausgerichtet werden. Die Funktionalität der Prozesssimulation ist, den aus der Makrosimulation resultierenden Terminplan nach Ist-Zustand zu aktualisieren, somit wird eine neuer Terminplan unter Berücksichtigung der Ist-Daten in der Makrosimulation erhalten. Die Ist-Daten sind die Maschinen- und Aktivitätsdaten eines Bohrpfahls.

5.1.3 Datenbeschaffungen und -aufbereitungen

Wegen der Eigenschaften und Funktionalitäten sind die Datenanforderungen jedes Simulationsmodells innerhalb des Systems unterschiedlich. Dadurch werden Datenbeschaffungen und -aufbereitungen nach der Simulation in drei Teilen separat vorgestellt.

Ablaufsimulation

Um die Bauarbeiten eines Bohrpfahls zu simulieren, müssen die Parameter bekannt sein. Dafür sind die Pfahllänge und der Pfahldurchmesser zuständig. Mit diesen ist das Volumen eines Bohrpfahls berechenbar. In der Herstelldokumentation (s. Abbildung 5-3) werden angeforderte Parameter gelistet.

Herstelldokumentation – Bohren

BAUER

Bauvorhaben (BV): Westtangente Rosenheim (WTRO)	**Auftragsnummer:** A21112320	**Bohrgerät:** BG39	**Datum:** 18.-20.03.2019

Pfahldaten

Bohrpfahl Nr.:	BP.A10.1		(a) Bohransatzpunkt:	455,50	müNN	(a)-(b) Leerbohrung:	2,15 m
BW-Achse:	10		(b) Pfahloberkante:	453,35	müNN	(b)-(c) Pfahllänge:	32,55 m
gem. Plan Nr.	---		(c) Pfahlunterkante:	420,80	müNN	(a)-(d) Bohrtiefe ges.:	35,20 m
Pfahl-Ø D_s:	1200	mm	(d) UK Bohrung:	420,30	müNN	Zielwert UK Bohrrohr:	417,90 müNN

Einstellung MESSPUNKT mit Laser

Bezugspunkt (BP)	KG Rohr 1		Höhe Bezugspunkt	456,00 müNN
Höhe Messpunkt UNTER Bezugspunkt	0,50	muBP	Höhe Messpunkt (MP)	455,50 müNN

Einzuhaltende Vorgaben

			Voreilmaß UK Bohrrohr ≥ (2D)	2,40	m	Mindestwasserstand im Bohrrohr	2,50 muGOK
Dicke Kiespolster am Pfahlfuß	0,50	m	Voreilmaß UK Bohrrohr ≤ (5D)	6,00	m	Mindestwasserstand im Bohrrohr	453,00 müNN
Zul. Toleranz OK Kiespolster	0,10	m	Minimale OK Kiespolster	420,70	müNN	Maximale OK Kiespolster	420,90 müNN

Abbildung 5-3: Auszug der Hellstelldokumentation bei Bohrpfahl A10.1

Über den Projektplan steht eine Excel-Datei zur Verfügung. Die erste Teilmenge ist ein Bauzeitplan (s. Abbildung 5-4). Darin stehen die Angaben über jede Pfahlgründung (Brückenfundament), z. B. die Ausführungsreihenfolge, die Anzahl von Bohrpfählen jeder Achse, das genutzte Bohrgerät und ihre Zeitdauer. Die zweite Teilmenge ist eine detaillierte Dokumentation über jedes Bohrpfahls (s. Abbildung 5-5). Jeder Bohrpfahl erhält eine einzigartige Bezeichnung, z. B. die Bezeichnung „BP.A10.2“ in der erste Reihe. „BP“ ist eine Abkürzung des Bohrpfahls. „A10“ heißt, dass der aktuelle Bohrpfahl zur Achse 10 gehört. Die letzte Nummer „2“ ist die Bezeichnungsnummer bezüglich der Achse 10. Die zweite Spalte dieser Tabelle ist die Ausführungsreihenfolge der Bohrpfähle. Durch den Vergleich der beiden Tabellen ist zu folgen, dass es nicht darum geht, eine Pfahlgründung abzuschließen, bevor mit der nächsten Pfahlgründung fortgefahren wird. Es bedeutet, dass der Anfang einer Pfahlgründung nicht das Ende ihres Vorgängers ist.

ID (Reienfolge)	Bezeichnung	Achse	pro Achse	Bohrgerät	Start	Ende	Dauer [Tage]
1	A10 - Gründungspfähle	A10	10	BG 39	Mittwoch, 6. März 2019	Freitag, 29. März 2019	18
2	A115 - Gründungspfähle	A115	5	BG 46	Montag, 11. März 2019	Donnerstag, 14. März 2019	3,9
3	A114 - Gründungspfähle	A114	6	BG 46	Freitag, 15. März 2019	Donnerstag, 21. März 2019	4
4	A113 - Gründungspfähle	A113	6	BG 46	Donnerstag, 21. März 2019	Donnerstag, 28. März 2019	4,6
5	A112 - Gründungspfähle	A112	6	BG 46	Freitag, 29. März 2019	Mittwoch, 3. April 2019	4
6	A111 - Gründungspfähle	A111	8	BG 46	Donnerstag, 4. April 2019	Donnerstag, 11. April 2019	5,4
7	A120 - Gründungspfähle	A120	10	BG 46	Freitag, 12. April 2019	Montag, 29. April 2019	9,3
8	A110 - Gründungspfähle	A110	10	BG 46	Dienstag, 30. April 2019	Mittwoch, 15. Mai 2019	10,3
9	A20 - Gründungspfähle	A20	17	BG 39	Mittwoch, 8. Mai 2019	Freitag, 12. Juli 2019	42
10	A100 - Gründungspfähle	A100	10	BG 46	Donnerstag, 16. Mai 2019	Montag, 27. Mai 2019	7,8
11	A90 - Gründungspfähle	A90	8	BG 46	Dienstag, 28. Mai 2019	Freitag, 7. Juni 2019	6,4
12	A80 - Gründungspfähle	A80	8	BG 46	Dienstag, 11. Juni 2019	Mittwoch, 19. Juni 2019	6
13	A125 - Gründungspfähle	A125	5	BG 46	Mittwoch, 19. Juni 2019	Donnerstag, 27. Juni 2019	4,2
14	A124 - Gründungspfähle	A124	6	BG 46	Freitag, 28. Juni 2019	Donnerstag, 4. Juli 2019	4
15	A123 - Gründungspfähle	A123	6	BG 46	Donnerstag, 4. Juli 2019	Donnerstag, 11. Juli 2019	4,6

Abbildung 5-4: Auszug aus dem Bauzeitplan

ID (Reihenfolge)	eihenfolge sortier	Bezeichnung	Achse	Anzahl Bohrpfahl pro Achse
1	1	BP.A10.2	A10	10
11	2	BP.A115.2	A115	5
2	3	BP.A10.4	A10	10
12	4	BP.A115.4	A115	5
3	5	BP.A10.10	A10	10
13	6	BP.A115.5	A115	5
14	7	BP.A115.1	A115	5
16	8	BP.A114.5	114	6
4	9	BP.A10.8	A10	10
15	10	BP.A115.3	A115	5
17	11	BP.A114.1	114	6
5	12	BP.A10.6	A10	10

Abbildung 5-5: Auszug aus der Übersicht aller Bohrpfähle

Durch die vorher erwähnten Daten kann die Tabelle *PileWalls* im Ablaufsimulationsmodell erfüllt werden (s. Abbildung 5-6). Aus den horizontalen Koordinaten *X1* und *Y1* mit Multiplum sind die Positionen jedes Gründungspfahl bezüglich des Hintergrunds des Modells zu bestimmen. Daraus ist die Position jedes Bohrpfahls direkt durch die Position der zugehörigen Pfahlgründung anzunehmen. Parameter *StartZ* und *EndZ*

beschreiben die Pfahllänge. Die Grundebene wird als eine horizontale Ebene behandelt, deshalb werden alle *StartZ* als 0 eingesetzt, wobei der Endpunkt jedes Bohrpfahls im Koordinatensystem eine negative Zahl ist.

string 0	string 1	string 2	real 3	real 4	real 5	real 6	real 7	real 8	integer 9	real 10	integer 11	list 12	boolean 13
ID	Name	ShortName	X1	Y1	X2	Y2	StartZ	EndZ	PileCount	PileDiameter	StartNum	AnchType_IDs	StartRein...
1	Pilegroup_A10	p10	18.00	40.00			0.00	-32.55	10	1.20	1	none	false
2	Pilegroup_A115	p115	162.00	12.00			0.00	-30.05	5	1.20	11	none	false
3	Pilegroup_A114	p114	168.00	18.00			0.00	-25.05	6	1.20	16	none	false
4	Pilegroup_A113	p113	172.00	26.00			0.00	-29.05	6	1.20	22	none	false
5	Pilegroup_A112	p112	174.00	34.00			0.00	-25.05	6	1.20	28	none	false
6	Pilegroup_A111	p111	176.00	42.00			0.00	-25.05	8	1.20	34	none	false
7	Pilegroup_A120	p120	180.00	50.00			0.00	-35.05	10	1.20	42	none	false
8	Pilegroup_A110	p110	172.00	52.00			0.00	-39.05	10	1.20	52	none	false
9	Pilegroup_A20	p20	38.00	44.00			0.00	-45.05	17	1.20	62	none	false
10	Pilegroup_A100	p100	163.00	53.00			0.00	-29.05	10	1.20	79	none	false
11	Pilegroup_A90	p90	154.00	54.00			0.00	-30.05	8	1.20	89	none	false
12	Pilegroup_A80	p80	144.00	55.00			0.00	-28.05	8	1.20	97	none	false
13	Pilegroup_A130	p130	188.00	48.00			0.00	-43.10	10	1.20	105	none	false
14	Pilegroup_A121	p121	186.00	56.00			0.00	-26.10	8	1.20	115	none	false
15	Pilegroup_A122	p122	188.00	64.00			0.00	-27.05	6	1.20	123	none	false

Abbildung 5-6: Auszug aus der Tabelle PileWalls

ID	WBS	COMPLETED_PROGRESS	doSimulation	NAME	PARENT_TASK_ID	PRED_TASK_ID	PROJECT_ID	STATISTICS_ID
843	1	0.00	1	WTRO_Rosenheim			5	
844	1.1	0.00	1	Pilegroup_A10	843		5	16
845	1.1.1	0.00	1	2	844		5	
846	1.2	0.00	1	Pilegroup_A115	843		5	17
847	1.2.1	0.00	1	12	846	845	5	
848	1.1.2	0.00	1	4	844	847	5	
849	1.2.2	0.00	1	14	846	848	5	
850	1.1.3	0.00	1	10	844	849	5	
851	1.2.3	0.00	1	15	846	850	5	
852	1.2.4	0.00	1	11	846	851	5	
853	1.3	0.00	1	Pilegroup_A114	843		5	18
854	1.3.1	0.00	1	20	853	852	5	
855	1.1.4	0.00	1	8	844	854	5	
856	1.2.5	0.00	1	13	846	855	5	

Abbildung 5-7: Auszug aus der Tabelle task

Um die Ablaufsimulation auszuführen, sollen die Vorgänger-Beziehungen zwischen den Bohrpfählen, die Zugehörigkeiten zwischen Bohrpfählen und Pfahlgründungen und die anderen erforderlichen Informationen in der Tabelle *task* der Datenbank gespeichert werden. Die Abbildung 5-7 zeigt nur die einzulesenden Informationen aus der Tabelle. Das Bauprojekt WTRO wird mit einer Projekt-ID 5 in der Tabelle bezeichnet, um es von anderen Projekten zu unterscheiden. Seine Anfangs-ID ist 843. WBS (Work Breakdown Structure) beschreibt das Hierarchie-System (s. Abschnitt 3.3.1) der Ablaufsimulation. Die erste Zahl repräsentiert das Projekt, die zweite den Prozess und die dritte den Subprozess. Hier werden insgesamt 29 Pfahlgründung von 232 Bohrpfählen untersucht. Um alle aufgezeichneten Bohrpfähle im Modell zu simulieren, werden *COMPLETED_PROGRESS* als 0 und *doSimulation* als 1 eingesetzt. Die Nummern in der Spalte *PARENT_TASK_ID* sind mit ID-Nummern verknüpft, wodurch die Zugehörigkeiten repräsentiert werden. Analog weisen die Nummern in der Spalte *PRED-TASK-ID* auf Vorgänger-Beziehungen hin. Die Statistik-ID funktioniert mit den Angaben in der Tabelle *task_statistics* in der Datenbank, die Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilung in Bezug auf Vorgänge der Bauarbeiten beinhaltet. Aufgrund der gleichartigen Bohrpfähle einer Pfahlgründung werden sie in 29 Gruppen aufgeteilt.

Die ID-Nummern dafür sind von 16 bis 44. Jede repräsentiert eine Pfahlgründung des Brückenbauprojekts WTRO.

Aus der Baustelle stehen Daten von 232 Bohrpfählen in Bezug auf verschiedene Vorgänge zur statistischen Analyse (s. Abbildung 5-8). Allerdings werden nur die Vorgänge Bohren, Betonieren und ein Leerlauf in der Tabelle *task_statistics* berücksichtigt. Dafür werden statistische Daten für Bohren, Betonieren und längstes Warten (waiting1_1.00) aus den verfügbaren Daten genommen. Der Mittelwert vor dem Betonieren (waiting3_1.00) wird als die Wartezeit des Netzwerks *ConcreteGate* übergeben, d. h., bevor die erforderlichen Betonmischer angeboten werden, soll die angegebene Zeit nach dem Anruf des aktuell betrachteten Bohrpfahls abgelaufen sein.

Spalte1	n	mean	std	min	max
drilling_1.00	232	21087,4138	9938,3033	6000	70380
waiting1_1.00	232	7476,1039	13472,3309	480	94320
reinforcing_1.00	232	1329,8701	767,0529	120	4620
waiting2_1.00	232	867,5455	1473,056	60	19500
installing_contractor_1.00	232	10208,3784	25905,9617	240	89580
waiting3_1.00	232	3455,5656	2840,2212	60	19800
concreting_1.00	232	16953,1034	22686,8679	6600	104400

Abbildung 5-8: Auszug von statistischen Daten von Bohrpfählen

Die Wartezeit wird durch die Tabelle *Supplier* in der Datenbank eingetragen (s. Abbildung 5-9). Der Wert bezüglich der Spalte *DISTANCE* repräsentiert die Wartezeit des entsprechenden Lagers. Der Zielort der verschiedenen Werte innerhalb des Modells unterscheidet sich durch eingegebene *NAME* und *PROJECT_ID.*

ID	ADDRESS	DISTANCE	LATITUDE	LONGITUDE	NAME	PROJECT_ID
1	zamilastraße 9, 81677	585	48.137491	11.636307	Concrete	1
2	Gautinger Straße 114, 82234	2724	48.066186	11.290860	Dump	1
3	Am Ostkai 26, Stuttgart	636	48.764402	9.261894	Concrete	3
4	NULL	3456	NULL	NULL	Concrete	5
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Abbildung 5-9: Tabelle supplier *in der Datenbank*

Makrosimulation

Für die Makrosimulation werden Projektplanungsdaten aus zwei verschiedenen Quellen in dieser Arbeit berücksichtigt. Eine ist die Ablaufsimulation. Die andere ist der Bauzeitplan Der wichtige Unterschied liegt darin, dass die Daten von den Bauleitern mindestens zwei Modi für jeden Prozess besitzen, nur einen Modus bei der Ablaufsimulation durchgeführt werden kann. Darüber hinaus werden die Daten aus dem Bauzeitplan nicht über die Bohrpfähle beschrieben, sondern über die Pfahlgründungen.

Bei dem Bau vorhaben WTRO stehen zwei Typen von Bohrgeräten: BG39 und BG46. Um das Simulationsmodell zu überprüfen, resultieren die Projektplanungsdaten aus Bauzeitplan folglich in zwei Modi. Der erste Modus ist bei BG39 und der zweite bei BG46. Aus den Erfahrungen ist bekannt, dass die Zeitdauer bei BG46 meist die Hälfte der Zeitdauer bei BG46 beträgt. Daraus resultiert ein Terminplan (s. Abbildung 5-10). Das Format wird nach Li [Li-2020] übernommen. Die Nummer „211“ bezeichnet BG39 und „212“ BG46. Diese Bezeichnungen und die verfügbare Menge werden durch die Tabelle *Ressourcen_MySQL* im Makrosimulationsmodell selbst definiert (s. Abbildung 5-11).

NR	Prozess	Anzahl Modi	Maschinen	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	Dauer	Vorgänger	Nachfolger 1	Verknüpfung 1	Zeitdifferenz 1
1	A10 · Gründungspfähle	2												1										18		2	Ende-Anfang	
															1									9				
2	A115 · Gründungspfähle	2												1										7.8		3	Ende-Anfang	
															1									3.9				
3	A114 · Gründungspfähle	2												1										8		4	Ende-Anfang	
															1									4				
4	A113 · Gründungspfähle	2												1										9.2		5	Ende-Anfang	
															1									4.6				
5	A112 · Gründungspfähle	2												1										8		6	Ende-Anfang	
															1									4				
6	A111 · Gründungspfähle	2												1										10.8		7	Ende-Anfang	
															1									5.4				
7	A120 · Gründungspfähle	2												1										18.6		8	Ende-Anfang	
															1									9.3				
8	A110 · Gründungspfähle	2												1										20.6		9	Ende-Anfang	
															1									10.3				
9	A20 · Gründungspfähle	2												1										42		10	Ende-Anfang	
															1									21				
10	A100 · Gründungspfähle	2												1										7.8		11	Ende-Anfang	
															1									3.9				
11	A90 · Gründungspfähle	2												1										6.4		12	Ende-Anfang	
															1									3.2				
12	A80 · Gründungspfähle	2												1										6		13	Ende-Anfang	
															1									3				
13	A130 · Gründungspfähle	2												1										22.5		14	Ende-Anfang	
															1									11.25				
14	A121 · Gründungspfähle	2												1										11.5		15	Ende-Anfang	
															1									5.75				
15	A122 · Gründungspfähle	2												1										8.6		16	Ende-Anfang	
															1									4.3				

Abbildung 5-10: Auszug aus den Projektplanungsdaten von WTRO

ID	Beschreibung	max. Bedarf	Pool
201	Bagger	3	5
202	LKW	6	10
203	Betonmischer	5	8
204	Radlader	3	5
205	Betonpumpe	2	4
206	Tiefbohrgerät	1	2
207	Abrisszange	3	5
208	Pfahlkopffräse	3	5
209	Hochdruckreiniger	3	5
210	Kettensäge	3	5
211	BG39	5	5
212	BG36	5	5

Abbildung 5-11: Auszug aus der Tabelle Ressourcen_MySQL

Prozesssimulation

Die digitalen Daten, die vor und während der Bauausführung des Bauvorhabens WTRO gesammelt werden, liegen in unterschiedlichen Formaten vor. Für die vorliegende Arbeit sind zwei Dateien für die Prozesssimulation interessant. Beide liegen in Form von Excel-Dateien vor.

- Prozessbegleitende Dokumentationsdaten
- Maschinendaten

Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13 zeigen exemplarisch Ausschnitte der vorliegenden Daten basierend auf der Herstellung eines Bohrpfahls (BP.A150.5) am 21.10.2019.

Name	Datum	Kommentar	Maschine
Ausfallzeit - Feierabend	21.10.2019 16:35	In achse 160 umsetzen und dann Feierabend	03I45900163
Nebenprozesszeit - Sonstiges	21.10.2019 16:21	Umzug auf nächste achse vorbereiten	03I45900163
Nebenprozesszeit - Sonstiges	21.10.2019 16:20		03I45900163
Hauptzeit - Verrohrung abnehmen	21.10.2019 16:20	Anfänger	03I45900163
Hauptzeit - Verrohrung abnehmen	21.10.2019 16:19		03I45900163
Hauptzeit - Standrohr ziehen	21.10.2019 16:18	Problem mit muffe	03I45900163
Hauptzeit - Standrohr ziehen	21.10.2019 16:18	Problem mit muffe	03I45900163
Hauptzeit - Standrohr ziehen	21.10.2019 16:17		03I45900163
Hauptzeit - Schüttrohr - Entfernen	21.10.2019 16:13	2	03I45900163
Hauptzeit - Schüttrohr - Entfernen	21.10.2019 16:11	Jetzb1	03I45900163
Hauptzeit - Schüttrohr - Entfernen	21.10.2019 16:11	Nein... Trichter	03I45900163

Abbildung 5-12: Aktivitäten bezüglich ihres Startzeitpunkts am 21.10.2019

Depth [m]	Torque [%	Rope Force	Rope Force	Speed of R	Crowd Dep	Pressure P	Pressure P	Pressure P
3,09	0	7,1	0	0	0,54	2	2	0
3,09	0	7,1	0	0	0,54	2	2	0
3,09	0	7,1	0	0	0,54	2	2	0
3,09	0	7,1	0	0	0,54	2	2	0
3,09	0	7,1	0	0	0,54	2	2	0
3,09	0	7,1	0	0	0,54	2	2	0
3,09	0	7,1	0	0	0,54	2	2	36
3,07	0	8,2	0	0	0,54	2	2	100
3,04	0	12,9	0	0	0,54	2	2	134
3,02	0	13,6	0	0	0,54	2	2	113
2,98	0	13,5	0	0	0,54	2	2	114
2,98	0	13,3	0	0	0,54	2	2	112

Abbildung 5-13: Maschinendaten am 21.10.2019

Die prozessbegleitende Dokumentation wird händisch bei der Bauausführung protokolliert. Diese repräsentiert die ereignisbasierten Aktivitäten des Tiefbohrgeräts in Bezug auf den Startzeitpunkt während der Ausführung des einzelnen Bohrpfahls. Die Maschinendaten werden automatisch in einem Zeitinkrement von 1 Sekunde erzeugt. Darin liegen Informationen über die Bohrtiefe, das Drehmoment etc. vor. Vor der Prozesssimulation sollen die zwei Daten bezüglich eines gleichen Bohrpfahls importiert werden. Auch sollen die Bezeichnung des aktuellen Bohrpfahls und das benutzte Tiefbohrgerät an die Eingangsdaten angepasst werden.

5.2 Bauablauf in der Ablaufsimulation

Um die Funktionalität der Ablaufsimulation zu testen, wird eine Parameterstudie über das entwickelte Modell mit realen Daten aus dem Brückenbauprojekt Westtangente Rosenheim durchgeführt. Dadurch ist eine Beschränktheit bei der Nutzung herausgekommen. Im Folgenden wird die Fallstudie ausführlich beschrieben. Darüber hinaus werden der Versuchsaufbau und die Ergebnisse verschiedener Versuche vorgestellt.

5.2.1 Bauablauf mit der Parameterstudie von Ressourcen

Zur Untersuchung wird zunächst eine allgemeine Einstellung der Parameter jedes zuständigen Bewegungselements vorbereitet (s. Tabelle 5-1). Nach den Anforderungen kann der Bedarf von Bohrgerät Bagger für einen Bohrpfahl selbst eingestellt. Die Anzahl von Betonmischern ist durch das Verhältnis von Pfahlvolumen und seiner Kapazität während der Simulation zu bestimmen. Aus dem Simulationsmodell werden die Parameter der Ressourcen bereits vordefiniert. Die Kapazität für einen Mini-Bagger ist 3 m^3, für einen Bagger 6 m^3, für einen Betonmischer 5,5 m^3. Diese werden nach den Anforderungen bei der Untersuchung variiert. Die Fahrgeschwindigkeit eines Bohrgerät ist ca. 1 km/h. Der Bagger fährt meist mit einer Geschwindigkeit von ca. 20 km/h. An der Baustelle gibt es häufig ein Tempolimit von 30 km/h. Daher wird die Fahrgeschwindigkeit für das Bohrgerät auf 0,31 m/s, Bagger und Mini-Bagger auf 5 m/s werden, Betonmischer 8 m/s eingestellt. Ergebnisse werden durch die Normalverteilung untersucht.

Tabelle 5-1: Allgemeine Parameter von entsprechenden Bewegungselementen

Ressource	Kapazität [m^3]	Geschwindigkeit [m/s]	Zugehöriger Vorgang
Bohrgerät	-	0,31	Bohren
Mini-Bagger	3	5	Baggern
Bagger	6	5	Baggern
Betonmischer	5,5	8	Betonieren

Parameterstudie von Baggern

Die reduzierte Menge von Bodenvolumen soll jedes Mal mit Bedarf und Kapazität verbunden sein. Dazu wird der Bedarf oder Typ für den einzelnen Bohrpfahl variiert, somit ist die reduzierte Menge zu überprüfen. Hier wird auch die Bauzeit des ersten Bohrpfahls (BP.A10.2) berücksichtigt.

Im Modell stehen zwei Typen von Baggern zur Verfügung. Der wichtigste Unterschied ist die Kapazität, d. h., dass die Kapazität eines Baggers doppelt so groß wie die eines Mini-Baggers ist. Aus der Tabelle 5-2 ist offensichtlich, dass die reduzierte Menge das Produkt aus Bedarf und Kapazität ist, dies hat jedoch keinen Einfluss auf die gesamte Bauzeit.

Tabelle 5-2: Änderung der reduzierten Menge durch die Variation vom Bedarf oder Typ

	Ressource	Bedarf	Kapazität [m^3]	Reduzierte Menge [m^3]
Experiment 1	Mini-Bagger	1	3	3
Experiment 2	Mini-Bagger	2	3	6
Experiment 3	Bagger	1	6	6
Experiment 4	Bagger	2	6	12

Um den Einfluss der Kapazität von Baggern auf die Bauzeit zu analysieren, wird die Kapazität des Mini-Baggers um das Zehnfache verringert, bis eine Änderung oder ein Fehler an der Bauzeit auftritt.

Aus den Ergebnissen in der Tabelle 5-3 ist zu sehen, dass die Bauzeit mit einer Kapazität von 3 m^3 und 0,3 m^3 gleichbleibt. Wenn die Kapazität auf 0,03 m^3 eingestellt wird, kommt ein Fehler bei der Simulation. Obwohl die Bauzeit des ersten Bohrpfahls im Modell gleich protokolliert wird, wird die weitere Bauausführung nicht durchgeführt.

Tabelle 5-3: Änderung der reduzierten Menge durch die Variation der Kapazität

	Ressource	Bedarf	Kapazität [m^3]	Reduzierte Menge [m^3]	Bauzeit [s]
Experiment 1	Mini-Bagger	1	3	3	12:01:29.5890
Experiment 2	Mini-Bagger	1	0,3	0,3	12:01:29.5890
Experiment 3	Mini-Bagger	1	0,03	0,03	Fehler!

Der Grund dafür ist, dass die Steuerung der Bauzeit hauptsächlich von Ergebnissen der Wahrscheinlichkeitsverteilung abhängig ist. Die Abbildung 3-10 zeigt: Wenn alle Vorgänge abgeschlossen sind, gibt es im Modell eine Prüfung zum restlichen Bodenvolumen. Falls noch nicht zum Abfalllager gelieferte Böden verbleiben, wird ein Konflikt zwischen der berechneten Bauzeit und der simulierten Bauzeit auftreten, somit sind die nachfolgenden Bohrpfähle in der Ablaufsimulation nicht ausführbar.

Parameterstudie von Betonmischern

In der Ablaufsimulation werden die angeforderten Betonmischer gleichzeitig im *ConcreteGate* erzeugt. Ihre Anzahl wird durch das Verhältnis von Pfahlvolumen zu Kapazität bestimmt, d. h., es gibt keine Limitation der Menge beim Aufruf. Um diese Funktionalität zu überprüfen und auch die Limitation des Modells zu begreifen, wird eine Parameterstudie über die Kapazität durchgeführt. Die Tabelle 5-4 zeigt die exemplari-

schen Ergebnisse des ersten Bohrpfahls (BP.A10.2) mit einer Einstellung der Kapazität unter Berücksichtigung der Limitation der realen Kapazität um 11 m^3, 5,5 m^3, 0,55 m^3 und 0,055 m^3. Das berücksichtigte Pfahlvolumen (BP.A10.2) ist 36,82 m^3. Aus den ersten drei Ergebnissen ist zu sehen, dass sich die angeforderte Anzahl an die entsprechende Kapazität anpasst. Der Fehler erscheint, wenn die Kapazität eines Betonmischers um 0,055 m^3 eingesetzt wird. Der Grund dafür ist die beschränkte Kapazität an Lager für den Bohrpfahl. Im Rahmen der Arbeit wird diese Kapazität mit 100 vordefiniert wird, deshalb kommt ein Fehler im Modell, wenn die Anzahl von allen besetzten Ressourcen über 100 liegt.

Tabelle 5-4: Parameterstudie durch die Variation der Kapazität beim Betonmischer

	Kapazität [m^3]	Anzahl
Experiment 1	11	4
Experiment 2	5.5	7
Experiment 3	0.55	67
Experiment 4	0.055	Fehler!

In der Simulation werden alle angeforderten Betonmischer gleichzeitig am Befüllort erzeugt. Allerdings gibt es einen Abstand dazwischen auf der Baustraße während der Simulation. Darüber hinaus erscheint keine Angabe oder Anweisung über den Abstand im Modell. Daher wird durch die Änderung der Fahrgeschwindigkeit untersucht, ob dieser Abstand verändert wird.

Die Einstellung der Fahrgeschwindigkeit liegt zwischen 2 m/s bis 10 m/s mit einem Inkrement von 2 m/s. Allerdings ändert sich der Abstand nicht, wird die Zeitdifferenz nach der Variation verändert wird (s. Tabelle 5-5). Gelichzeitig sind dieser Abstand und die definierte Länge vom Betonmischer gleich. Daher folgt eine Parameterstudie über die Länge beim Betonmischer.

Tabelle 5-5: Parameterstudie durch die Variation der Fahrgeschwindigkeit beim Betonmischer

	Kapazität [m^3]	Fahrgeschwindigkeit [m/s]	Zeitdifferenz [s]	Abstand [m]
Experiment 1	5.5	10	0.6	6
Experiment 2	5.5	8	0.75	6
Experiment 3	5.5	6	1	6
Experiment 4	5.5	4	1.5	6
Experiment 5	5.5	2	3	6

Nach der Tabelle 5-6 ist bekannt, dass der Abstand zwischen den hintereinanderfahrenden Betonmischern von der definierten Länge abhängig ist. Daher ist die Einstellung der Zeitdifferenz durch die Änderung der Fahrgeschwindigkeit einzusetzen, und die Einstellung des Abstands durch die Variation der Länge zu realisieren.

Tabelle 5-6: Parameterstudie durch die Variation der Länge beim Betonmischer

	Länge [m]	Abstand [m]
Experiment 1	8	8
Experiment 2	6	6
Experiment 3	4	4

Wartezeit des Befüllortes vom Beton

Für den Befüllvorgang kann eine Wartezeit durch die Tabelle „supplier“ der Datenbank eingegeben werden. Hier wird durch die Änderung der Wartezeit untersucht, wie diese Einstellung die Bauzeit beeinflusst. Hier werden drei Bohrpfähle aus den Achsen A10, A115 und A114 als Beispiele ausgewählt. Aus den Ergebnissen ist in der Abbildung 5-14 ersichtlich: Wenn eine Wartezeit von 10000 s (2,8 h) eingesetzt wird, könnte dies die gesamte Bauzeit eines Bohrpfahls beeinflussen.

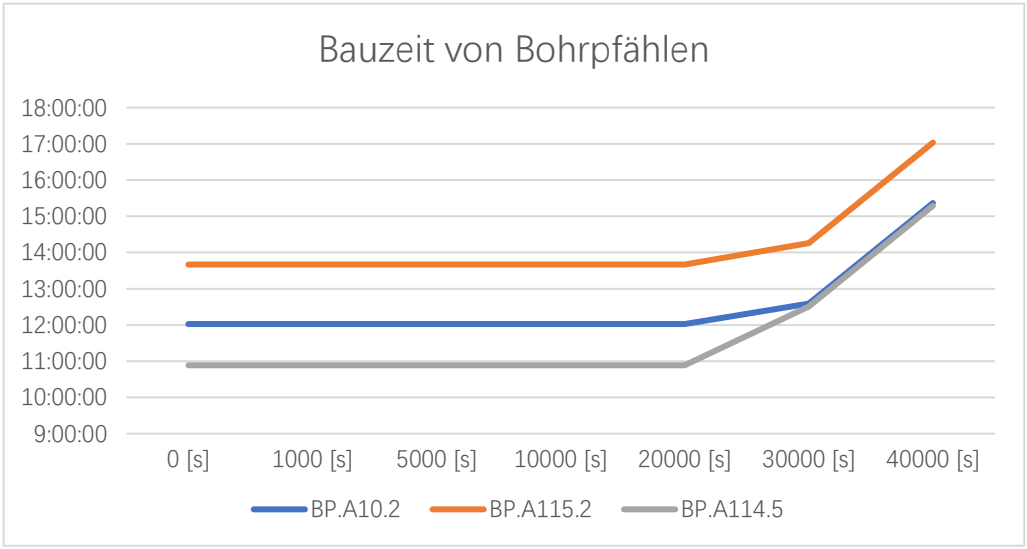


Abbildung 5-14: Parameterstudie durch Variation der Wartezeit

Während der Bauausführung eines Bohrpfahls in der Ablaufsimulation werden die erforderlichen Betonmischer am Anfang der Durchführung abgerufen. Nach der Wartezeit fahren alle Betonmischer mit Beton zusammen zum bezeichneten Bohrpfahl und warten im Lager. Wenn der Vorgang Betonieren beginnt, fahren alle hintereinander

ohne Beton zurück. Deswegen gibt es keinen Einfluss, wenn die Wartezeit kleiner als die gesamte Zeit vom Ausfahren bis zum Beginn des Betonierens ist.

5.2.2 Bauablauf mit der Parameterstudie über die Sequenzierung

Die Ausführungsreihenfolge von Bohrpfählen wird durch die Einstellung der Vorgänger-Beziehung realisiert. Wenn Bohrpfähle einen gleichen Vorgänger haben, dann ist die Sequenzierung dafür interessant. Dazu werden die ersten drei Bohrpfähle (BP.A10.2, BP.A115.2 und BP.A10.4) zur Untersuchung einbezogen. Die originale Sequenzierung basierend auf dem realen Bauzeitplan ist BP.A10.2 an erster Stelle, danach kommt BP.A115.2 und schließlich wird BP.A10.4 ausgeführt. Im ersten Versuch besitzen die letzten zwei Bohrpfähle den gleichen Vorgänger BP.A10.2. Im zweiten Versuch werden die ID-Nummern dieser beiden mit dem gleichen Vorgänger ausgetauscht. Die Ergebnisse sind der Tabelle 5-7 zu entnehmen. Die Ergebnisse werden durch die Normalverteilung untersucht.

Tabelle 5-7: Parameterstudie über die Sequenzierung

	1. Bohrpfahl	2. Bohrpfahl	3. Bohrpfahl
Original	BP.A10.2	BP.A115.2	BP.A10.4
Erster Versuch	BP.A10.2	BP.A115.2	BP.A10.4
Zweiter Versuch	BP.A10.2	BP.A10.4	BP.A115.2

Durch den Vergleich ist das entwickelte Simulationsmodell nicht in der Lage, zwei Bohrpfähle parallel auszuführen. Wenn Bohrpfähle gleichen den Vorgänger haben, wird der Bohrpfahl mit niedriger ID bevorzugt.

5.2.3 Bauablauf mit verschiedener Verteilungsfunktion zur Dauerberechnung

Im Modell liegt die Funktionalität über fünf Typen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen vor: Normalverteilung, Lognormalverteilung, Gammaverteilung, Weilbullverteilung und Dreieckverteilung; wird dadurch die Bauzeit bestimmt. Für das Bauprojekt Westtangente Rosenheim stehen statistische Daten über 232 Bohrpfähle über Normalverteilung, Lognormalverteilung, Weibullverteilung, Gammaverteilung und Exponentialverteilung zur Verfügung (s. Abbildung 5-15). Aufgrund der fehlenden Daten über die Dreiecksverteilung wird im Rahmen dieser Arbeit auf die Untersuchung damit verzichtet.

Spalte1	normal_mu	normal_sigma	lognormal_mu	lognormal_sigma	weibull_b	weibull_a	gamma_a	gamma_b	negexp
drilling_1.00	20714	9135,3	20673,4938	8928,1958	23448	2,4152	5,8782	3523,8	20714
waiting1_1.00	5071,9	3382,6	5225,4593	4264,2779	5679,9	1,5982	2,3717	2138,5	5071,9
reinforcing_1.00	1329,9	768,72	1353,7331	903,2481	1502,7	1,8432	3,1635	420,38	1329,9
waiting2_1.00	782,47	768,12	775,4637	693,3895	849,12	1,2496	1,8	434,69	782,47
installing_contractor_1.00	1619,1	664,26	1638,5314	774,1951	1819,5	2,5184	5,7909	279,59	1619,1
waiting3_1.00	4145	4422,2	5085,9232	9818,4298	4134,5	0,9942	1,008	4111,9	4145
concreting_1.00	10638	3187,4	10622,0174	3020,6967	11819	3,4668	12,523	849,49	10638

Abbildung 5-15: Statistische Daten von verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Die vorliegende Datenbank übernimmt nur Daten von den Vorgängen Bohren, Betonieren und Leerlauf, deshalb werden die Daten über das längste Warten (2. Reihe) entschieden. Unter Berücksichtigung dieser Daten können die Simulationsergebnisse mit der tatsächlichen Bauzeit verglichen werden. Durch die Durchführung von 1000 Beobachtungen pro Experiment werden Minimum, Mittelwert und Maximum in Bezug auf jeder Verteilung in blau, orange und grau dargestellt. Jedes Experiment dauert ca. 2h in der Makrosimulation mit Hilfe der Simulationssoftware Plant Simulation. Aus dem Diagramm (s. Abbildung 5-16) ist zu sehen, dass ein Großteil der simulierten Ergebnisse den Ist-Zustand überschreitet, trotzdem ein Teil der verfügten Daten in der Simulation verwendet werden.

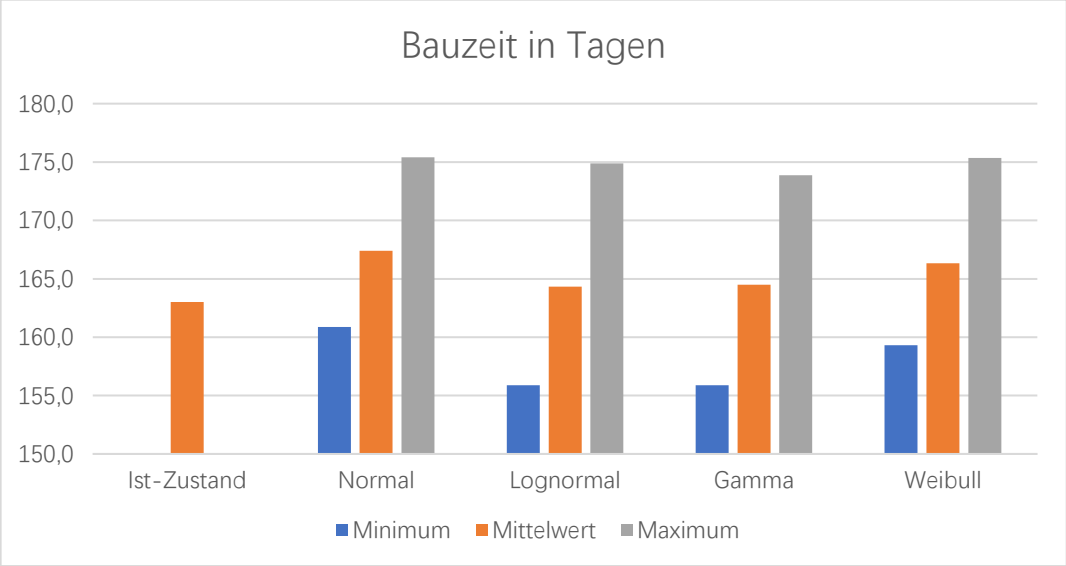


Abbildung 5-16: Ergebnisse (Minimum, Mittelwert und Maximum) durch verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen im Vergleich zum Ist-Zustand

Die Abweichungen zur tatsächlichen Bauzeit sind aus der Tabelle 5-8 zuzugreifen. Mit dem Vergleich von Mittelwerten ist offensichtlich, dass Ergebnisse bezüglich der Lognormalverteilung am besten an den Ist-Zustand annähern. Im Gegensatz zu den anderen drei Verteilungen werden alle Ergebnisse durch die Normalverteilung die tatsachliche Bauzeit überschritten.

Tabelle 5-8: Abweichungen zum Ist-Zustand von 163 Tagen

	Minimum	Mittelwert	Maximum
Normalverteilung	1,3%	2,6%	7,1%
Lognormalverteilung	-4,6%	0,8%	6,8%
Gammaverteilung	-4.6%	0,9%	6,3%
Weibullverteilung	-2,3%	2,5%	7,0%

5.2.4 Beschränktheit in Bezug auf dem Brückenbauprojekt Westtagente Rosenheim

Aus den Ergebnissen in der Tabelle 5-7 ist offensichtlich, dass Bohrpfähle durch das Ablaufsimulationsmodell nicht parallel durchgeführt werden. Bei einem Brückenbauprojekt ist jedes Brückenfundaments ein Individuum, deshalb kann die Bauausführung für verschiedene Brückenfundamente voneinander unabhängig sein, sodass diese Einstellung des Modells die Möglichkeit zur parallelen Simulation beschränkt.

In der praktischen Bauausführung ist die Bohrtiefe häufig größer als die Pfahllänge (s. Abbildung 5-3), aber beide werden in der Simulation gleich betrachtet. Die Bohrtiefe ist für die Berechnung des Bodenvolumens verantwortlich, gleichzeitig ist die Pfahllänge für das Betonvolumen zuständig. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Pfahllänge ausgewählt, d. h., dass das berechnete Bodenvolumen kleiner als der reale Wert ist. Deswegen gibt es eine Abweichung zwischen der angeforderten Anzahl und der tatsächlichen Anzahl von Baggern. Sonst stellt der Bauzeitplan (Abbildung 5-4) dar, dass zwei Typen für Bohren im Projekt angewendet werden. In der Ablaufsimulation gibt es jedoch keine Klassifizierung von Typen, d. h., dass alle Bohrpfähle durch ein gemeinsames Bohrgerät gebohrt werden. In der Praxis beeinflusst die Auswahl der Bohrgeräte die Zeitdauer für das Bohren. Aufgrund der fehlenden Klassifizierung ist unmöglich, dass sich die Simulation bei der Auswahl von verschiedenen Bohrgräten entsprechend ändert.

Bei der Simulation werden alle benötigten Betonmischer gleichzeitig abgerufen und zurückgefahren. Auf den Straßen fahren sie hintereinander ohne Abstand. Außerdem gibt es keine beschränkte Anzahl davon. Nur wenn das Lager des Bohrpfahls den Betonmischer nicht weiter übernimmt, erscheint ein Fehler im Modell. Dies ist unrealistisch in der praktischen Situation. Dieser Konflikt erzeugt eine Abweichung zwischen dem simulierten Szenario und der realen Situation. Es kann eine verzerrte Übersicht über das Bauprojekt verursacht werden. Folglich könnte die Entscheidungsfindung von Bauleitern oder Nutzern beeinflusst werden.

Nach den vorliegenden statistischen Daten aus dem Brückenbauprojekt Westtangente Rosenheim (s. Abbildung 5-8 und Abbildung 5-15) wird eine Pfahlausführung in sieben Vorgänge unterteilt: Bohren, 1. Warten, Bewehrung, 2. Warten, Kontraktor Installation, 3. Warten und Betonieren. Allerdings können nur die Daten über Bohren, Betonieren und einen Leerlauf ins Ablaufsimulationsmodell importiert werden, wobei auf andere Daten für die Ausführung verzichtet wird. Die fehlenden Daten verursachen, dass es zur Abweichung bei der Simulation kommt. Darüber hinaus stehen Daten über die Exponentialverteilung zur Verfügung, aber es gibt keine entsprechende Methode im Modell, um eine Bauausführung basierend darauf zu simulieren.

5.3 Terminplanung mit verschiedenen Prioritätsregeln in der Makrosimulation

Hier werden sieben vorliegende Prioritätsregeln in der Makrosimulation mit Projektplanungsdaten, worin jeder Prozess zwei Modi besetzt, untersucht. Die Auswahl der Prioritätsregeln wird nach Wenzler et la. [Wen-2015] entschieden. In den folgenden Sätzen werden diese Regeln auch nach Wenzler et la. [Wen-2015] kurz erläutert.

- **GNS** (Greatest Number of Successors): Für die Priorisierung wird die Anzahl aller Nachfolger des jeweiligen Prozesses berücksichtigt.

- **GRPW** (Greatest Rank Positional Weight): Der Prozess hat Vorrang, wenn die Dauer mit aller Dauer seiner Nachfolger im Vergleich zu anderer am größten ist.

- **LFT** (Latest Finish Time): Der letztmögliche Endzeitpunkt ohne Verzögerung des gesamten Projekts spielt eine entscheidende Rolle für die Priorisierung.

- **MSLK** (Minimum Slack): Der Prozess mit dem geringsten Puffer wird bei dieser Regel bevorzugt. Der Puffer beschreibt die Zeit, die Prozesse nach hinten verschoben werden können.

- **LPF** (Longest Path Following): Die Priorisierung von Prozessen wird nach der Länge des kritischen Pfads des Prozesses bestimmt. Dieser Pfad wird innerhalb der Nachfolger des aktuell betrachteten Prozesses bis zum Projektende bestimmt.

- **WCS** (Worst Case Slack): Bei dieser Regel wird bestimmt, wie weit der fragliche Prozess verschoben werden muss, wenn stattdessen ein anderer ausführbarer

Prozess sofort den Zuschlag für die Ressourcen erhalten würde. Alle derzeit eingeschriebenen Prozesse werden paarweise verglichen. Der Prozess mit dem größten Wert hat die Priorität.

- **ACS** (Average Case Slack): Im Vergleich zu WCS werden alle Prozesse hier in die Berechnung einbezogen. Die Prozesse, die im Durchschnitt bei der Zurückstellung zugunsten der anderen Prozesse den größten Verzug ausweisen würden, werden prioirisiert.

Die vorliegenden Projektplanungsdaten sind nach der realen Bauausführung des Brückenbauprojekt WTRO aufgestellt, deshalb steht darin nur ein Pfad der Sequenzierung zur Verfügung. Diese einzigartige Sequenzierung ist für die Überprüfung von Prioritätsregeln sinnlos. Allerdings kann die Bauausführung jedes Brückenfundaments als eine individuelle Bauarbeit betrachtet werden, sodass diese im Idealfall parallel durchgeführt werden können. PSPLib (s. Abschnitt 3.2.3) verfügt über verschiedene Varianten von Nachfolger-Beziehungen in Bezug auf die unterschiedliche Prozessanzahl. Um mehrere Pfade der Sequenzierung durch die Einstellung zur Verfügung zu stehen, werden Nachfolger-Beziehungen der Datei j301_3.mm (s. Anhang B) aus PSPLib als Beispiel genommen. Einige Beziehungen werden wegen der Ungleichheit der Prozessanzahl verändert.

In der Abbildung 5-17 wird die gesamte Bauzeit des ganzen Projekts über jede Prioritätsregel dargestellt. Es ist offensichtlich, dass die Dauer bei GNS, LFT, MSLK und WCS gleich und am längsten ist. Die Dauer bei ACS steht im Mittelfeld. Im Gegensatz dazu ist die Zeitdauer bei GRPW und LPF kürzer als bei den andere. Gleichzeitig ist die kürzeste Dauer bei LPF aufgetreten. D. h., wenn eine effiziente Bauausführung angefordert ist, ist es besser, LPF zu wählen. Das resultierende Ergebnis könnte die optimale Planung sein.

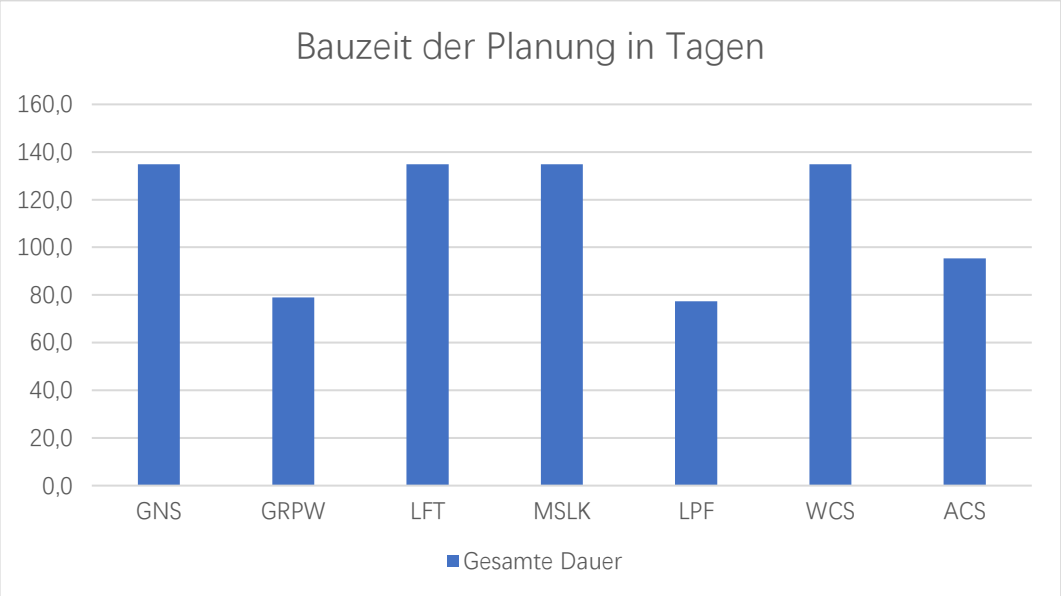


Abbildung 5-17: Ergebnisse der Untersuchung für Prioritätsregeln

5.4 Zyklische Anwendung zwischen den Modellen

Die wichtige Funktionalität des entwickelten Simulationssystems ist, eine baubegleitende Terminplanung zu verwirklichen. Hier werden der Soll-Ist-Vergleich zwischen Makro- und Mikrosimulation bei zwei Varianten übergeprüft. Dazu werden die Ist-Daten am 21.10.2019 über den Bohrpfahl BP.A150.5 übernommen. Nach der Dokumentation wird dieser Bohrpfahl durch BG39 gebohrt. Die Nachfolger-Beziehungen sollen mit der realen Sequenzierung von Achsen oder Bohrpfählen übereinstimmen, damit die passt der Realität an.

Variante 1: Projektplanungsdaten aus der Ablaufsimulation

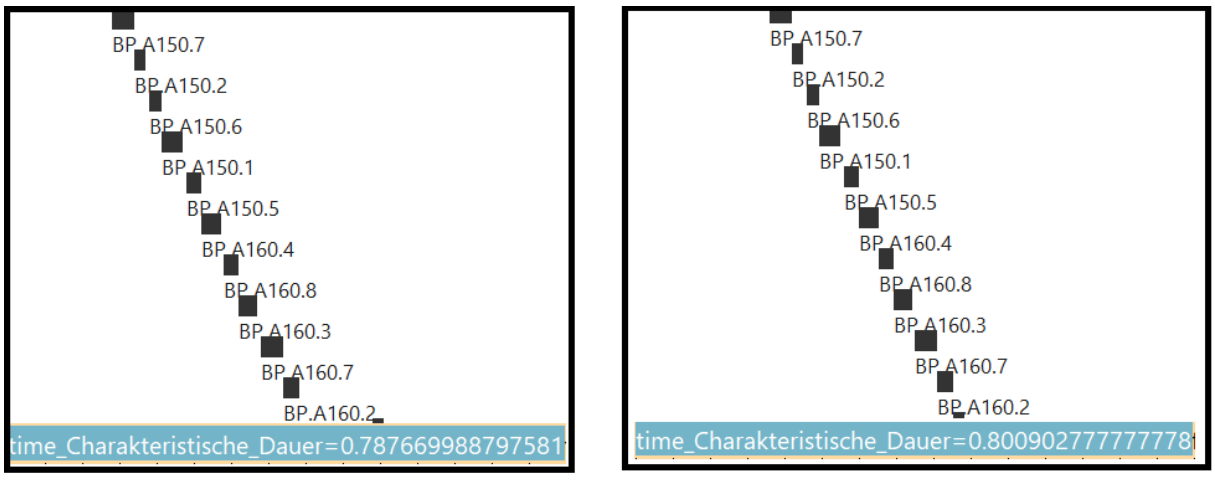
Zur Untersuchung werden hier die resultierenden Daten über jeden Bohrpfahl aus derNormalverteilung der Ablaufsimulation in die Makrosimulation importiert. Die Makrosimulation macht den Terminplan bezüglich dieser Bauausführung durch ein Balkendiagramm anschaulich: am Ende wird ein protokollierter Soll-Plan erstellt, darin wird der zeitliche Fortschritt jedes Bohrpfahls als 0 eingesetzt. Mit dem Importieren des Plans mit vorliegenden digitalen Daten in die Prozesssimulation werden die Ist-Daten zur Vergügung stellt. Wie in der Abbildung 5-18 dargestellt werden, die Bohrpfähle, die vor dem BP.A150.5 (Prozess-ID 206) ausgeführt sind, als geschlossen eingesetzt. Die Informationen über die nachfolgenden Bohlpfähle werden gelöscht. Der angezeigte Endzeitpunkt ist der neue Endzeitpunkt des aktuellen Bohrpfahls, der durch die Prozesssimulaton aktualisiert wird.Durch das Hochladen dieser Datei zusammen mit

den Projektplanungsdaten in die Makrosimulation ist ein neuer Terminplan in Bezug auf den Ist-Zustand zu bekommen.

Prozess-ID	zeitl. Fortschritt	Startzeit	Endzeit	Mode
200	1	283.75	284.557356905747	1
201	1	284.55742972877	285.310894159091	1
202	1	289.75	290.953032016733	1
203	1	290.953104839756	291.573581742481	1
204	1	291.75	292.453762866987	1
205	1	292.45383569001	293.508040820353	1
206	1	293.75	294.550902777778	1
207	0			
208	0			
209	0			
210	0			
211	0			
212	0			
213	0			
214	0			

Abbildung 5-18: Auszug der Ist-Daten bei der Variante 1

Die Abbildung 5-19 zeigt die Ausschnitte von simulierten Ergebnissen in der Makrosimulation. Links ist der simulierte Soll-Plan zu sehen. Seine Eingangsdaten werden direkt aus der Ablaufsimulation genommen, deshalb stellt das Balkendiagramm die Bauausführung der Ablaufsimulation. Rechts ist der aktualisierte Soll-Plan abgebildet, daher ist die Zeitdauer des betrachteten Bohrpfahls gleich wie die simulierte Dauer der Prozesssimulation, was die reale Bauausführung nach den prozessbegleitenden Dokumentationsdaten und Maschinendaten beschreibt. Bei diesem Fall wird der Endzeitpunkt vom Bohrpfahl BP.A150.5 als d Simulationsstart eingestellt. Der erneut eingestellte Simulationsstart wird wegen der Limitation seiner Länge wird in diesem Ausschnitt nicht dargestellt. Darunter steht die Zeitdauer dieses bohrpfahls jedes Versuchs in der Makrosimulation. Durch den Vergleich dieser zwei Werte wird deutlich, dass die Bauzeit nach dem Ist-Soll-Vergleich verlängert wird.



Soll-Plan Soll-Plan mit Ist-Daten

Abbildung 5-19: Soll-Ist-Vergleich bei der Variante 1

Variante 2: Projektplanungsdaten aus dem Terminplan

Der nach dem Bauzeitplan erstellte Terminplan ist auf die Brückenfundamente ausgerichtet. Jeder Prozess verfügt über zwei Modi. Bohren durch BG39 wird als Modus 1 eingestellt, und Bohren durch BG46 als Modus 2. Bei dieser Untersuchung wird die Prioritätsregel LPF für die Makrosimulation verwendet, um eine effiziente Terminplanung zu erhalten. Durch die Makrosimulation werden zunächst alle Prozesse im Modus 2 ausgewählt. Nach der Abbildung 5-20 links ist zu sehen, dass Achse 150 im Modus 2 mit einer Zeitdauer um 6.3 s geplant wird. Allerdings werden alle Bohrpfähle der Achse 150 mit BG39 durchgeführt. Nach der Abbildung 5-20 rechts ist deutlich, dass der Modus und die Dauer bei Achse 150 nach der Prozesssimulation erfolgreich aktualisiert werden. Darüber hinaus ist eine Prognose der Dauer im gleichen Modus für die nachfolgenden Prozesse erwartet. Nach dem Vergleich der Balkenlänge von zwei Fällen ist bemerkbar, dass der geplante Zeitaufwand der Achsen 190, 180 und 170 offensichtlich verkürzt ist. Die neue Dauer dafür ist beim Modus 1 kürzer als beim Modus 2, deswegen wird diese Achse im Modus 1 geplant.

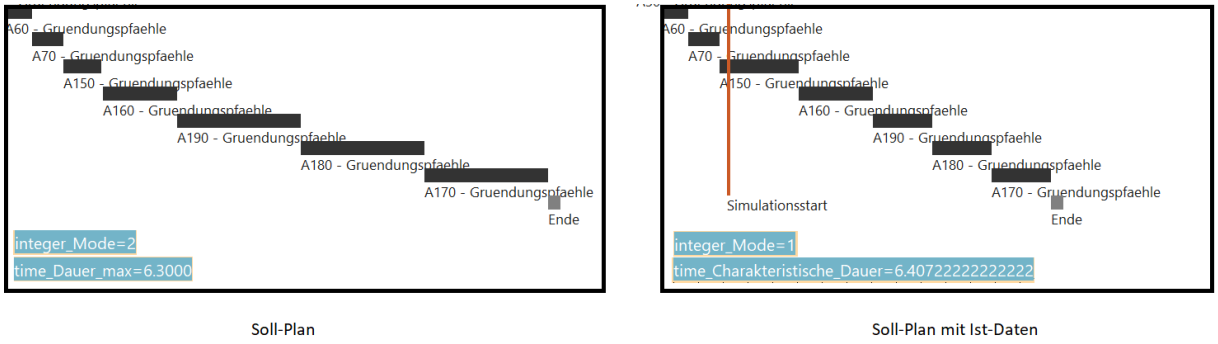


Abbildung 5-20: Soll-Ist-Vergleich bei der Variante 2

Um die zyklische Funktionalität des Simulationssystems zu validieren, wird ein derartiger Soll-Ist-Vergleich zwei Mal durchgeführt. Die Prozesssimulation muss in der Lage sein, nicht nur den Prozess mit einem zeitlichen Fortschritt von 0 zu aktualisieren, sondern auch mit einer positiven Dezimale.

Das Brückenfundament A150 hat insgesamt 8 Bohrpfähle. Die Prozesssimulation simuliert jedes Mal einen Bohrpfahl. Nach den Ergebnissen der Simulation nimmt der Wert für den zeitlichen Fortschritt von A150 um 0,125 bei jedem Versuch zu. Die berechneten Werte (s. Abbildung 5-21) aus der Prozesssimulation stimmt mit der praktischen Bauausführung überein, deshalb ist das entwickelte Simulationssystem für die zyklische baubegleitende Terminplanung geeignet.

Prozess-ID	zeitl. Fortschritt	Startzeit	Endzeit	Mode
17	1	107.5	111.5	2
18	1	111.5	115.7	2
19	1	115.7	119.95	2
20	1	119.95	126.7	2
21	1	126.7	137.2	2
22	1	137.2	139.2	2
23	1	139.2	141.45	2
24	1	141.45	143.95	2
25	0.125	143.95	144.7...	1
26	0			
27	0			
28	0			
29	0			
30	0			

Ist-Daten des ersten Versuchs

Prozess-ID	zeitl. Fortschritt	Startzeit	Endzeit	Mode
17	1	107.5	111.5	2
18	1	111.5	115.7	2
19	1	115.7	119.95	2
20	1	119.95	126.7	2
21	1	126.7	137.2	2
22	1	137.2	139.2	2
23	1	139.2	141.45	2
24	1	141.45	143.95	2
25	0.25	143.95	145.5...	1
26	0			
27	0			
28	0			
29	0			
30	0			

Ist-Daten des zweiten Versuchs

Abbildung 5-21: Auszug der Ist-Daten von zwei Versuchen

6 Diskussion

Um die Funktionalität jedes Simulationsmodells zu überprüfen, werden Parameterstudien unter Berücksichtigung der digitalen Daten durchgeführt. Die Ergebnisse im Kapitel 5 haben gezeigt, dass das entworfene dreiteilige Konzept (s. Abschnitt 3.1) durch die entwickelten und erweiterten Simulationsmodelle verwirklicht wird.

Durch die Ablaufsimulation können die Projektplanungsdaten mit Erfahrungswerten erzeugt und weiter zur Makrosimulation übergeben werden. Der Ressourcenbedarf und die Kapazität können nach den Anforderungen in Grenzen selbst definiert werden (s. Abschnitt 5.2.1). Durch die validierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Normalverteilung, Lognormalverteilung, Gammaverteilung und Weibullverteilung) kann eine relativ stabile Bauzeit erhalten werden (s. Abschnitt 5.2.3). Allerdings ist die Anwendung dieses Modells beschränkt. Weil die Bauzeit kaum von einer Änderung der Ressourcen beeinflusst wird, kann nur ein Modus jedes Prozesses bei der Ausführung in Bezug auf eine Reihe von Erfahrungswerten simuliert werden. Wenn ein Bedarf an der Änderung des Modus besteht, müssen die entsprechenden Erfahrungswerte im Datenspeicher verändert werden. Außerdem ist eine parallele Bauausführung nicht möglich (s. Abschnitt 5.2.2). Für das Brückenbauprojekt Westtangente Rosenheim sind die Bauarbeiten jedes Brückenfundaments unabhängig voneinander. Daher trägt zur Verbesserung der Effizienz bei, wenn unabhängige Prozesse parallel durchgeführt werden können.

Die Makrosimulation ist nützlich, um eine optimale Terminplanung des Projekts zu erreichen. Nach den Ergebnissen der Experimente (s. Abbildung 5-17) ist zu sehen, dass nicht alle Prioritätsregeln eine optimale Lösung ergeben. Innerhalb der betrachteten sieben Prioritätsregeln ist LPF fähig, die Prozesse am effizientesten zu planen. Daher ist es besser, sich bei der Anwendung für diese Prioritätsregeln zu entscheiden.

Eine wichtige Funktion der Prozesssimulation ist die Fortschrittsberechnung. Die Ergebnisse aus den zwei Versuchen (s. Abbildung 5-21) haben gezeigt, dass die Prozesssimulation sich der zyklischen Anwendung anpasst. Das Modell kann das simulierte Ergebnis gemäß den vorliegenden Daten verarbeiten und berechnen. Beim Vergleich der Balkendiagramme in der Abbildung 5-20 ist zu sehen, dass die Prozesssimulation nicht nur den aktuell betrachteten Prozess aktualisieren, sondern auch Prognosen über die nicht ausgeführten Prozesse geben kann.

Zusammenfassend ermöglicht die Interaktion zwischen Makro- und Mikrosimulation, eine baubegleitende Terminplanung zur Verfügung zu stellen. Die Ablaufsimulation

verfügt über die Projektplanungsdaten, die die Eingangsdaten der Makrosimulation sind. Der aus der Makrosimulation resultierende Terminplan und Soll-Plan sind die Basis für die Anpassung in der Prozesssimulation. Diese Prozesssimulation verfügt über die Ist-Daten, die für den Soll-Ist-Vergleich in der Makosimulation verantwortlich sind. Nach der Makrosimulation wird ein neuer Soll-Plan in Bezug auf die Ist-Daten erstellt. Er kann wieder in die Prozesssimulation übergeben werden. Ein derartiger Zyklus ermöglicht eine ständige Aktualisierung des Terminplans.

Aber die Anwendung ist begrenzt. Es gibt noch Punkte, die optimiert werden könnten. Erstens ist die Ablaufsimulation nicht fähig, verschiedene Varianten zu simulieren, wenn die Eingangsdaten in der Datenbank nicht verändert werden. Dies erhöht nicht nur die Komplexität bei der Anwendung, sondern erfordert auch eine manuelle Zusammenfassung über die simulierten Modi. Zweitens ist die Prozesssimulation nutzlos, wenn sich die Sequenzierung bei der praktischen Bauausführung ändert. Die Anpassungsstrategie dafür ist, den bezeichneten (aktuellen) Prozess aus dem vorliegenden Plan zu suchen und dann die entsprechenden Daten zu aktualisieren. Wenn die Reihenfolge der Prozesse in der Praxis geändert wird, erkennt das Prozesssimulationsmodell das nicht. Daraus folgt, dass die resultierenden Ist-Daten nicht zum Ist-Zustand passen, somit ist der Soll-Ist-Vergleich in diesem Fall sinnlos.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand dieser Arbeit ist die Einführung des vorliegenden Ansatzes, der die Kombination der Maschinendaten im Simulationsmodell zur Optimierung des Terminplans beschreibt, in dem realen Brückenbauprojekt Westtangente Rosenheim, somit ist eine baubegleitende Terminplanung durch den zyklischen Soll-Ist-Vergleich zukunftsfähig.

Zunächst wurde mit der Vorstellung der Simulation begonnen. Darin wurden die grundsätzlichen Begriffe, die Klassifikation, vorliegende Simulatoren und die Vorgehensweise einer Simulationsstudie zusammenfasst. Danach wurde die Simulationsstudie für die Bauablaufplanung vertieft. Einerseits wurde der Aufbau, Modellierungsansätze und Interaktion der Simulationsmodelle beschrieben, andererseits standen die verschiedenen Integrationen von Bauschrittdaten in die Simulation zur Verfügung. Um die Entscheidung dieser Arbeit im letzten Abschnitt dieses Kapitels zu unterstützen, folgten die relevanten Simulationsstudien nach.

Zur Modellierung stand im nächsten Kapitel eine Beschreibung über drei Ausgangsmodelle an erster Stelle. Dabei lag der Fokus auf drei Aspekten: Eingangsdaten, System und Optimierungsansatz zur Darstellung der Funktionalitäten von Modellen. Danach kam das dreiteilige Konzept über das Thema dieser Arbeit. Um die Interaktion zwischen den Modellen zu realisieren, wurde hier auch ein Ansatz zur Kombination vorgestellt.

Im nächsten Kapitel wurden die Erweiterung der Ausgangsmodelle und die Modellbildung durch das vorliegende Simulationsmodell vorgestellt. Über die Erweiterungen wurden Anforderungen und Änderungen des Modells angegeben. Über die Modellbildung wurde das Lösungskonzept, der Aufbau und die Erweiterung zur Einbindung fokussiert.

Durch eine kurze Beschreibung des betrachteten Brückenbauprojekts wurde das Kapitel für Verifikation und Validierung eingeleitet. Hier wurden auch teilweise die gesammelten Daten für jede Simulation des Systems beschrieben. Zur Überprüfung der Ablaufsimulation wurden Parameterstudien über Ressourcen, Sequenzierung und Wahrscheinlichkeitsverteilungen durchgeführt. Nach der Analyse der Ergebnisse folgt eine Zusammenfassung. Anschließend wurden verschiedene Prioritätsregeln in der Makrosimulation verglichen. Der Schluss bildete die Überprüfung der zyklischen Anwendung zur Kombination der Makro- und Mikrosimulation.

Durch die Verifikation und Validierung ist zu sehen, dass ein zyklischer Soll-Ist-Vergleich in Bezug auf die realen Bauprojektdaten durch das entwickelte Hybrid-Simulation gut umgesetzt wird. Allerdings ist dieses Simulationssystem aufgrund der beschränkten Bedienbarkeit weiter zu optimieren. Für die Ablaufsimulation steuern die durch Erfahrungen gesammelten statistischen Daten den Zeitablauf des Projekts. Die Änderung von Ressourcen hat kaum Einfluss darauf, daher steht für die Makrosimulation nur eine Variante jedes Prozesses zur Verfügung. In der Praxis führt die Auswahl von Ressourcen zu vielfältigen Bauausführungen, deshalb ist es notwendig, verschiedene Modi in der Ablaufsimulation auszuführen, wobei Projektplanungsdaten mit vielen Möglichkeiten für die Makrosimulation vorliegen.

In dieser Arbeit sind zwei Varianten von Projektplanungsdaten diskutiert werden: eine aus dem Terminplan, die andere aus der Ablaufsimulation, diskutiert werden. Beide sind jedoch im Wesentlichen gleich. Der Unterschied liegt im Fokus. Der allgemeine Terminplan ist auf das Brückenfundament ausgerichtet, aber im Gegensatz dazu simuliert die Ablaufsimulation jeden Bohrpfahl. Das Hierarchie-System der Ablaufsimulation kann in die Makrosimulation eingeführt werden, damit ist möglich, beide Varianten als ein Dokument in die Simulation einzusetzen.

Die Beschränktheit der Prozesssimulation ist, dass die Maschinendaten die gesamte Bauausführung eines Bohrpfahls beschreiben müssen, weil diese Simulation die importierten Daten für einen geschlossenen Prozess standardmäßig behandelt. Hier wird auch Tiefenstand des Bohrpfahls berücksichtigt. Dieser Wert könnte in die Fortschrittsberechnungen einbezogen werden. Einerseits wird dadurch die Beschränktheit der Simulation verhindert, andererseits kann dieser Wert zur Bewertung des Bohrpfahls verwendet werden, z. B., ob die erforderliche Tiefe erreicht ist.

Gegenwärtig ist das Simulationssystem eine halbautomatische Anwendung, weiterhin muss eine automatische Kombination der Makro- und Mikrosimulation in Betracht gezogen werden.

Literaturverzeichnis

[Abo-2010] AbouRizk, S.: Role of Simulation in Construction Engineering and Management. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 136 (2010) Nr. 10, S. 1140–1153.

[Abo-2011] AbouRizk, S.; Halpin, D.; Mohamed, Y.; Hermann, U.: Research in Modeling and Simulation for Improving Construction Engineering Operations. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 137 (2011) Nr. 10, S. 843–852.

[Ahn-2014] Ahn, S.; Lee, S.; Steel, R. P.: Construction Workers' Perceptions and Attitudes toward Social Norms as Predictors of Their Absence Behavior. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 140 (2014) Nr. 5, S. 4013069.

[Al--2019] Al-Kaissy, M.; Arashpour, M.; Fayezi, S.; Akbarnezhad, A.; Ashuri, B.: Process Modelling in Civil Infrastructure Projects: A Review of Construction Simulation Methods. In: Al-Hussein, M. (Hrsg.): Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), 2019.

[Alt-2018] Altaf, M. S.; Bouferguene, A.; Liu, H.; Al-Hussein, M.; Yu, H.: Integrated production planning and control system for a panelized home prefabrication facility using simulation and RFID. In: Automation in Construction, Jg. 85 (2018), S. 369–383.

[Alz-2015] Alzraiee, H.; Zayed, T.; Moselhi, O.: Dynamic planning of construction activities using hybrid simulation. In: Automation in Construction, Jg. 49 (2015), S. 176–192.

[Arn-2008] Arnold, D. (Hrsg.): Handbuch Logistik. Springer, Berlin, 2008.

[Bal-1989] Balci, O.: How to assess the acceptability and credibility of simulation results. In: MacNair, E. A.; Musselman, K. J.; Heidelberger, P. (Hrsg.): 1989 Winter Simulation Conference proceedings. Winter Simulation Conference; American Statistical Association; Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, s.l., 1989, S. 62–71.

[Bau-1996] Baumgarten, B.: Petri-Netze – Grundlagen und Anwendungen. Spektrum Akad.-Verl., Heidelberg, 1996.

[Bau-2007] Bauer, H.: Baubetrieb. Springer Verlag, s.l., 2007.

[Ber-2013] Berner, F.; Habenicht, I.; Kochkine, V.; Spieckermann, S.; Väth, C.: Simulation in der Fertigungsplanung von Bauwerken. In: bauingenieur (2013) Nr. Band 88

[DIN-60050-351] Deutsche Institut für Normung; International Electrotechnical Commission: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik. DIN IEC Nr. 60050-351, 2006.

[Eky-2012] Ekyalimpa, R.; AbouRizk, S.; Farrar, J.: Effective strategies for simulating one-of-a-kind construction projects. In: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (2012), S. 2948–2960.

[Ele-2012] Eley, M.: Simulation in der Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.

[Fis-2021] Fischer, A.; Li, Z.; Wenzler, F.; Kessler, S.; Fottner, J.: Cyclic Update of Project Scheduling by Using Telematics Data. In: 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (2021)

[Fra-1999] Franz, V.: Simulation von Bauprozessen mit Petri-Netzen. In: Hohman, G. (Hrsg.): Fortschritt in der Simulationstechnik, Weimar, 1999.

[Gal-2018] Galvão Scheidegger, A. P.; Fernandes Pereira, T.; Moura de Oliveira, M. L.; Banerjee, A.; Barra Montevechi, J. A.: An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. In: Computers & Industrial Engineering, Jg. 124 (2018), S. 474–492.

[Gün-2010] Günther, Willibald A. et la.: ForBau - Virtuelle Baustelle - Digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung –Abschlussbericht 2010, 2010.

[Gün-2011] Günthner, W.; Borrmann, A.: Digitale Baustelle- innovativer Planen, effizienter Ausführen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.

[Gut-2017] Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik – Grundlagen und Anwendungen. Springer Vieweg, Berlin, 2017.

[Haj-1999] Hajjar, D.; AbouRizk, S.: Simphony. In: Farrington, P. A., et al. (Hrsg.): Proceedings of the 31st conference on Winter simulation Simulation---a bridge to the future - WSC '99, New York, New York, USA, 1999, S. 998–1006.

[Hal-1977] Halpin, D. W.: Cyclone–Method for Modeling Job Site Processes. In: Journal of the Construction Division, Jg. 103 (1977) Nr. 3, S. 489–499.

[Hor-2012] Horenburg, T.; Wimmer, J.; Günthner, W. A.; Borrmann, A.; Dori, G.: Towards collection, processing and use of actual data for process simulation during construction. In: Proceedings of the International Workshop: Intelligent Computing in Engineering 2012 (2012)

[Hor-2014] Horenburg, T.: Simulationsgestützte Ablaufplanung unter Berücksichtigung aktueller Baufortschrittsinformation. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2014.

[Hrd-1997] Hrdliczka, V.; Jakobi, H. A.; Schumacher, R.; Wenzel, S.: ASIM-Fachgruppe 4.5.6: Leitfaden für Simulationsbenutzer in der Produktion und Logistik (1997) Nr. 58

[Jab-2017] Jabri, A.; Zayed, T.: Agent-based modeling and simulation of earthmoving operations. In: Automation in Construction, Jg. 81 (2017), S. 210–223.

[Ji-2020] Ji, S.: Analyse des aktuellen Stands der ereignisdiskreten Simulation im Bauwesen und Entwicklung einer Simulationsstudie anhand eines konkreten Fallbeispiel. Masterarbeit. Lehrstuhl für Födertechnik materialfluss Logstik, Technische Universität München, Garching, 2020.

[Kol-1997] Kolisch, R.; Sprecher, A.: PSPLIB - A project scheduling problem library. In: European Journal of Operational Research, Jg. 96 (1997) Nr. 1, S. 205–216.

[Kon-2012] Konig, M.; Koch, C.; Habenicht, I.; Spieckermann, S.: Intelligent BIM-based construction scheduling using discrete event simulationProceedings Title: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), 2012, S. 1–12.

[Law-1989] Law, A. M.; Haider, S. W.: Selecting simulation software for manufacturing applications. In: MacNair, E. A.; Musselman, K. J.; Heidelberger, P. (Hrsg.): 1989 Winter Simulation Conference proceedings. Winter Simulation Conference; American Statistical Association; Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, s.l., 1989, S. 29–32.

[Lee-2007] Lee, S.; Han, S.; Peña-Mora, F.: Hybrid System Dynamics and Discrete Event Simulation for Construction Management. American Society of Civil Engineers, 2007.

[Lee-2009] Lee, S.; Han, S.; Peña-Mora, F.: Integrating Construction Operation and Context in Large-Scale Construction Using Hybrid Computer Simulation. In: Journal of Computing in Civil Engineering, Jg. 23 (2009) Nr. 2, S. 75–83.

[Li-2017] Li, X.; Xu, J.; Zhang, Q.: Research on Construction Schedule Management Based on BIM Technology. In: Procedia Engineering, Jg. 174 (2017), S. 657–667.

[Li-2020] Li, Z.: Entwicklung eines ereignisorientierten Simulationsmodells zur Einbindung von realen Baustellendaten im Austausch mit dem Terminplan. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2020.

[Li-2021] Li, R.: Analyse des aktuellen Stands der ereignisdiskreten Simulation im Bauwesen. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss logistik, Technische Universität München, Garching, 2021.

[Lov-2006] Lova, A.; Tormos, P.; Barber, F.: Multi-mode resource constrained project scheduling: scheduling schemes, priority rules and mode selection rules. In: INTELIGENCIA ARTIFICIAL, Jg. 10 (2006) Nr. 30

[Mar-1994] Martinez, J. C.; Ioannou, P. G.: General purpose simulation with Stroboscope. In: Tew, J. D., et al. (Hrsg.): Proceedings, 1994 Winter Simulation Conference. Society for Computer Simulation International, San Diego, Dec. 1994, S. 1159–1166.

[Mar-1999] Martinez, J. C.; Ioannou, P. G.: General-Purpose Systems for Effective Construction Simulation. In: Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 125 (1999) Nr. 4, S. 265–276.

[Mat-2018] Matejevi´c, B.; Zlatanovi´c, M.; Cvetkovi´c, D.: The Simulation Model for Predicting the Productivity of the Reinforced Concrete Slabs Concreting Process. In: Tehnicki vjesnik - Technical Gazette, Jg. 25 (2018) Nr. 6

[Mül-2019] Müller, J. K. M.: Dateneigentum in der vierten industriellen Revolution? In: Datenschutz und Datensicherheit - DuD, Jg. 43 (2019) Nr. 3, S. 159–166.

[Nwa-1996] Nwana, H. S.: Software agents: an overview. In: The Knowledge Engineering Review, Jg. 11 (1996) Nr. 3, S. 205–244.

[Pau-1993] Paul, R. J.: Activity Cycle Diagrams and the Three Phase Method-Proceedings of 1993 Winter Simulation Conference - (WSC '93), 1993, S. 123–131.

[Rab-2008] Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

[Ras-2012] Rasys, E.; Dawood, N. N.: Semi-Structured Data Modelling for a Web-Enabled Engineering Application. American Society of Civil Engineers, 2012.

[Rob-2014] Robinson, S.: Simulation – The practice of model development and use. Palgrave Macmillan, London, 2014.

[Sar-1984] Sargent, R. G.: A tutorial on verification and validation of simulation models. In: Winter Simulation Conference (1984), S. 115–121.

[Sca-2019] Scales, J.: Including Generative Mechanisms in Project scheduling using Hybrid Simulation, 2019.

[Sch-1995] Schnell, W.: Verfahrenstechnik zur Sicherung von Baugruben. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, s.l., 1995.

[Sch-2019] Schönit, M.; Quasthoff, P.: Bohren – Verfahren, Geräte, Anwendungen, IT-Lösungen. Ernst & Sohn; Liebherr, Berlin, Lenzing, 2019.

[Sho-2019] Shou, W.; Wu, P.; Wang, J.: A Survey of Simulation Modelling Techniques in Lean Construction ResearchProc. 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), 2019, S. 1093–1104.

[Sol-2017] Solihin, W.; Eastman, C.; Lee, Y.-C.; Yang, D.-H.: A simplified relational database schema for transformation of BIM data into a query-efficient and spatially enabled database. In: Automation in Construction, Jg. 84 (2017), S. 367–383.

[TEA-2021] TEAMPLAN GmbH Tübingen: Computergestützte Echtzeitsimulation. https://www.teamplan.de/planen-beraten/computergestuetzte-echtzeitsimulation/, Aufruf am 05.04.2021.

[Tem-2018] Tempelmeier, H.: Modellierung logistischer Systeme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.

[TUM-2018] TUM: B15 Westtangente Rosenheim: Pfahlgründung Brücke über Mangfall und Aicherpark, Vorgaben und Empfehlungen für die Herstellung der Mischgründung, Jg. 12125/04(v5) (2018)

[VDI-3633] Verein Deutscher Ingenieure: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. VDI Nr. 3633, 2014.

[Wac-2020] Wackerl, M.: Auswertung von Bohrgerätedaten und Einfluss-faktoren beim Kelly-Verfahren im Seeton – Am Beispiel des Bauvorhabens „Westtangente Rosenheim“. Bachelorarbeit. Baubetrieb und Maschinentechnik, Hochschule München, München, 2020.

[Wen-2015] Wenzler, F.; Günther, W. A.: Ressourcenbeschränkte Terminplanung mit einem System kollaborativer Agenten. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): Simulation in Production and logidtics. Frauenhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2015, S. 177–186.

[Wen-2016] Wenzler, F.; Günthner, W. A.: Multi-Agenten-System zur Terminplanoptimierung im Bauwesen mit gemeinsam genutzten Ressourcen, 2016.

[Wen-2018] Wenzel, S.: Simulationswerkzeuge am Markt. Vortrag, Dortmund, 04.12.2018.

[Wil-2016] Wilscher, J.: Brücksichtigung von Flächenrestriktionen in einem Multi-Agenten-System zur Terminplanoptimierung im Bauwesen. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2016.

[Wim-2014] Wimmer, J.: Ereignisorientierte Simulation und Optimierung im Erdbau. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2014.

[Wit-2020] Wittemann, F.: The Library PSBLIB. http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/library.html, Aufruf am 09.04.2021.

[Wol-2021] Wolfram MathWorld: Wolfram MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Resource. https://mathworld.wolfram.com/, Aufruf am 12.04.2021.

[Xu-1999] Xu, J.; AbouRizk, S.: Product-based model representation for integrating 3D CAD with computer simulation. In: Farrington, P. A. (Hrsg.): 1999 Winter Simulation Conference proceedings. Winter Simulation Conference; WSC '99, New York, 1999, S. 971–977.

[Xu-2013] Xu, L.; Pei-qing Wang; Shang-lun Chen; Xing-li Zhong: Simulation and Optimization of the Steel Enterprise Raw Material SystemThe 19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 1489–1498.

[Xu-2018] Xu, X.; Wang, J.; Li, C. Z.; Huang, W.; Xia, N.: Schedule risk analysis of infrastructure projects: A hybrid dynamic approach. In: Automation in Construction, Jg. 95 (2018), S. 20–34.

[Zim-2019] Zimbelmann, J.; Simson, A.; Beckhaus, K.; Cudmani, R.; Rebstock, D.: Pfahltest der Superlative für ein innovatives Gründungskonzept im Rosenheimer Seeton. In: Pfahl-Symposium (2019)

[Zöb-2020] Zöbel, D.: Echtzeitsysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABM	Agent-Based-Modelling, Deutsch: Agentenbasierte Modellierung
ACD	Activity Cycle Diagram
ACS	Average Case Slack
Auto-ID	automatische Identifizierung
BE	Bewegungselement
BG	Baugerät
BIM	Building Information Modelling
CAD	Computer-aided design
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
DES	Discrete Event Simulation, Deutsch: ereignisdiskrete Simulation
d. h.	das heißt
FEM	Finite-Elemente-Methode
fml	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss und Logistik
ggf.	Gegenbenfalls
HBVG	Hauptbietvorgang
GNS	Greatest Number of Successors
GPS	Global Position System
GRPW	Greatest Rank Positional Weight
LFT	Latest Finish Time
LPF	Longest Path Following
MRCPSP	Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem
MSLK	Minimum Slack
PC	Personal Computer
RFID	Radio Frequency Identification
SAZ	Anfangszeitpunkte
SEZ	spätester Endzeitpunkt
TaT	Tracking and Tracing
TUM	Technische Universität München
WBS	Work Breakdown Structure
WCS	Worst Case Slack

WTRO	Westtangente Rosenheim
V&V	Verifikation und Validierung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
XML	Extensible Markup Language
z. B.	zum Beispiel
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
AP_n	[-]	Set zugelassener Aktivitätenpaare
a	[-]	X-Wert des links untenliegenden Punkts der Dreiecksverteilung
b	[-]	X-Wert des Scheitelpunkts der Dreiecksverteilung
c	[-]	X-Wert des rechts untenliegenden Punkts der Dreiecksverteilung
D_n	[-]	Entscheidungsset
d_{jm}	[s]	Dauer des Prozesses j in Modus m
$E_{(i,j)}$	[s]	frühester Zeitpunkt der Aktivität j
EFT_j	[s]	Frühestmöglicher Endzeitpunkt des Prozesses j
F^*	[-]	Nachfolgerset
i	[-]	Vorgänger
J	[-]	Anzahl der Prozesse j
j	[-]	Prozess
k	[-]	Ressource
LFT_j	[-]	Spätestmöglicher Endzeitpunkt des Prozesses j
EFT_j	[-]	Frühestmöglicher Endzeitpunkt des Prozesses j
M	[-]	Anzahl der Modi m
m	[-]	Modus
P_j	[-]	Menge der Vorgänger des Prozesses j
p_i	[s]	Dauer
R_k	[-]	Menge der Ressource k
r_{jmk}	[-]	Bedarf der Ressource k von Prozess j in Modus m
T	[s]	Angenommener spätestzulässiger Endtermin
J	[-]	letzten Prozesses J
t	[s]	Periode des einzelnen Prozesses j
t_n	[s]	Entscheidungspunkt
x_{jmt}	[-]	Binäre Variable
u	[-]	Erwartungswert
$v(j)$	[s]	Prioritäten

Z	[s]	Zykluszeit
α	[-]	Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilung
β	[-]	Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilung
σ	[-]	Standardabweichung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Klassifikation von dynamischen Simulationsmodellen [Arn-2008] 7

Abbildung 2-2: Prozesse, Aktivitäten und Ereignisse [Ele-2012] 7

Abbildung 2-3: Auszug aus der Liste existierender Simulationswerkzeuge: Stand 2008 [Wen-2018] 9

Abbildung 2-4: Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et la. [Rab-2008] 11

Abbildung 2-5: Einfaches Activity Cycle Diagram für einen Erdbauprozess [Wim-2014] 15

Abbildung 2-6: Beispiel eines einfachen Petri-Netzes [Gün-2011] . 16

Abbildung 2-7: Abstraktionsniveau und Anwendungsbereiche der hybriden Simulation [Al--2019] 20

Abbildung 2-8: Interaktion zwischen den Modellen in der Prozesssimulation [Hor-2012] 22

Abbildung 2-9: Konzept für GPS-Tracking von Fahrzeugen [Hor-2012] 25

Abbildung 3-1: Sequenzdiagramm des dreiteiligen Konzepts 30

Abbildung 3-2: Hauptnetzwerk Prozesslauf 31

Abbildung 3-3: Struktur des Agentensystems [Wen-2016] 34

Abbildung 3-4: Zustandsdiagramm des Arbeitsmittelagenten [Hor-2014] 36

Abbildung 3-5: Dialog für den Datenimport 36

Abbildung 3-6: Ein Beispiel für Startzeitpunkte 38

Abbildung 3-7: Bietvorgang [Li-2020] 39

Abbildung 3-8: Hierarchie-System der Ablaufsimulation 43

Abbildung 3-9: Vorlage vom Bearbeitungsbereich der Ablaufsimulation 44

Abbildung 3-10: Flussdiagramm eines Bohrpfahls 47

Abbildung 3-11: Interaktion zwischen Bohrpfählen und Lagern von Ressourcen 48

Abbildung 3-12: Ablaufplanung als Regelkreis [Gün-2011] 51

Abbildung 4-1: Neuer Bereich für MySQL im Import_Projekt_MultiMode 57

Abbildung 4-2: Erweiterter Eingabe-Dialog für die Makrosimulation 57

Abbildung 4-3: Erweiterter Eingabe-Dialog für die Prozesssimulation 59

Abbildung 4-4: Erweitertes Netzwerk für die Datenverarbeitung 60

Abbildung 4-5: Beispiele für Grundrisse von verschiedenen Bohrpfahlwänden [Sch-1995] 62

Abbildung 4-6: Grundriss der Achse 10 von WTRO [TUM-2018] 62

Abbildung 4-7: Übersicht des Ablaufsimulationsmodells 63

Abbildung 4-8: Erweitertes Netzwerk TaskScheduler 64
Abbildung 5-1: Übersichtsplan des Neubaus der Bundesstraße B15, Westtangente Rosenheim, mit zwei Brückenbauwerken [Zim-2019] 65
Abbildung 5-2: Schnittbilder der zwei Brückenbauwerke, aufgeteilt in Teilbauwerk 1 und Teilbauwerk 2, für den Neubau [Zim-2019] 66
Abbildung 5-3: Auszug der Hellstelldokumentation bei Bohrpfahl A10.1 67
Abbildung 5-4: Auszug aus dem Bauzeitplan 68
Abbildung 5-5: Auszug aus der Übersicht aller Bohrpfähle 68
Abbildung 5-6: Auszug aus der Tabelle PileWalls 69
Abbildung 5-7: Auszug aus der Tabelle task 69
Abbildung 5-8: Auszug von statistischen Daten von Bohrpfählen 70
Abbildung 5-9: Tabelle supplier in der Datenbank 70
Abbildung 5-10: Auszug aus den Projektplanungsdaten von WTRO 71
Abbildung 5-11: Auszug aus der Tabelle Ressourcen_MySQL 71
Abbildung 5-12: Aktivitäten bezüglich ihres Startzeitpunkts am 21.10.2019 72
Abbildung 5-13: Maschinendaten am 21.10.2019 72
Abbildung 5-14: Parameterstudie durch Variation der Wartezeit 76
Abbildung 5-15: Statistische Daten von verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilung 78
Abbildung 5-16: Ergebnisse (Minimum, Mittelwert und Maximum) durch verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen im Vergleich zum Ist-Zustand 78
Abbildung 5-17: Ergebnisse der Untersuchung für Prioritätsregeln 82
Abbildung 5-18: Auszug der Ist-Daten bei der Variante 1 83
Abbildung 5-19: Soll-Ist-Vergleich bei der Variante 1 83
Abbildung 5-20: Soll-Ist-Vergleich bei der Variante 2 84
Abbildung 5-21: Auszug der Ist-Daten von zwei Versuchen 85

Abbildung A-1: Grundriss des Bauvorhabens WTRO A-1
Abbildung A-2: das Netzwerk im Ablaufsimulationsmodell A-2
Abbildung A-3: Auszug der Tabelle von Subprozessen für die Prozesssimulation A-2

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Zustände des Prozessagenten [Hor-2014]	35
Tabelle 5-1:	Allgemeine Parameter von entsprechenden Bewegungselementen	73
Tabelle 5-2:	Änderung der reduzierten Menge durch die Variation vom Bedarf oder Typ	74
Tabelle 5-3:	Änderung der reduzierten Menge durch die Variation der Kapazität	74
Tabelle 5-4:	Parameterstudie durch die Variation der Kapazität beim Betonmischer	75
Tabelle 5-5:	Parameterstudie durch die Variation der Fahrgeschwindigkeit beim Betonmischer	75
Tabelle 5-6:	Parameterstudie durch die Variation der Länge beim Betonmischer	76
Tabelle 5-7:	Parameterstudie über die Sequenzierung	77
Tabelle 5-8:	Abweichungen zum Ist-Zustand von 163 Tagen	79
Tabelle B-1:	Einstellung der Nachfolger-Beziehungen	B-1
Tabelle B-2:	Modus jedes Prozesses durch die Priorisierung	B-2

Anhang A Abbildungen

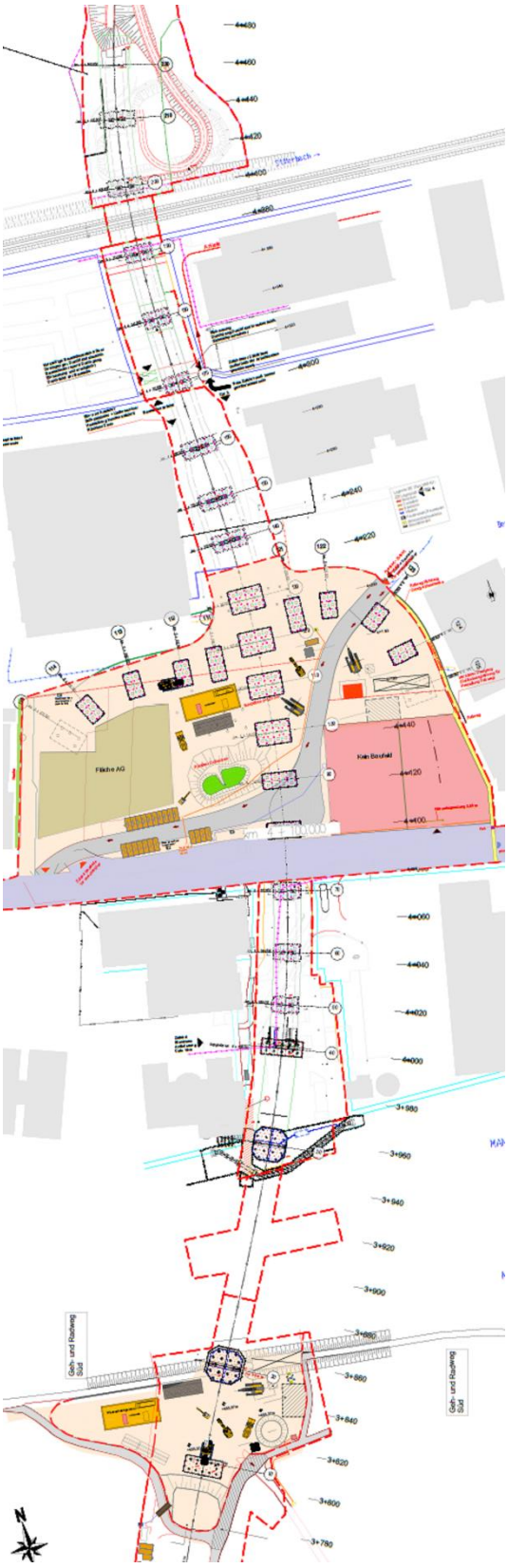


Abbildung A-1: Grundriss des Bauvorhabens WTRO

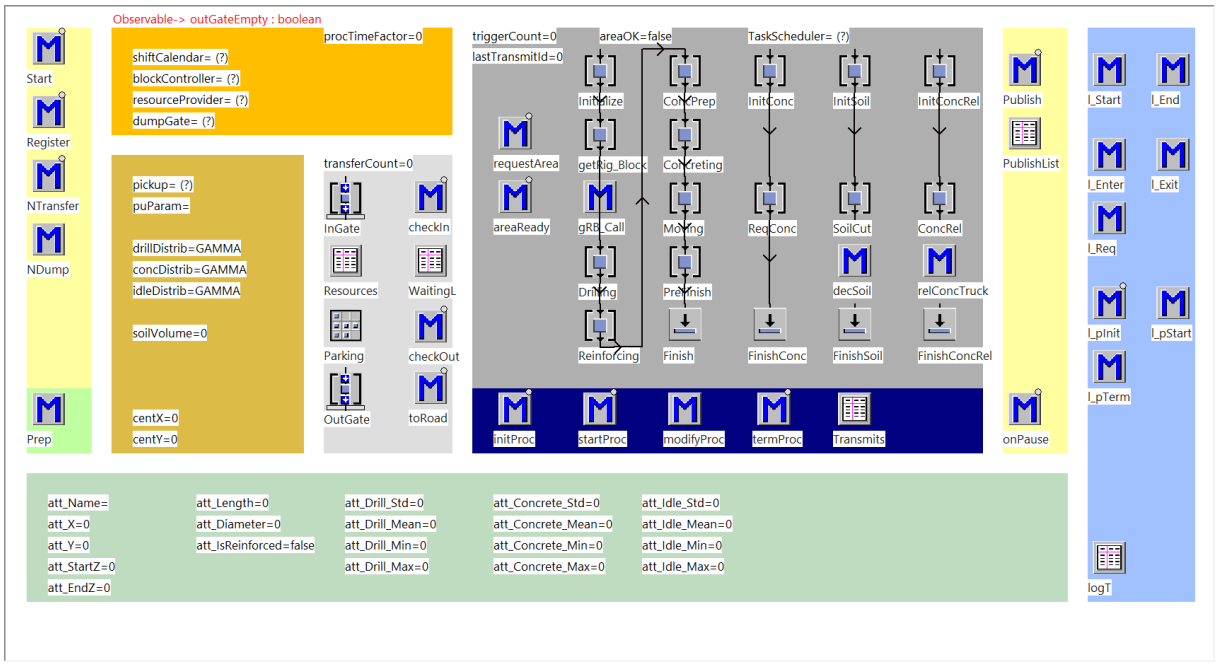


Abbildung A-2: das Netzwerk PileStandard *im Ablaufsimulationsmodell*

NR	Anzahl_SubProzesse	Rest_SubProzesse
1	10	10
2	5	5
3	6	6
4	6	6
5	6	6
6	8	8
7	10	10
8	10	10
9	17	17
10	10	10
11	8	8
12	8	8
13	10	10
14	8	8
15	6	6

Abbildung A-3: Auszug aus der Tabelle für Subprozessen

Anhang B Tabellen

Tabelle B-1: Einstellung der Nachfolger-Beziehungen

	Nachfolger 1	Nachfolger 2	Nachfolger 3
1 (A10)	2	3	4
2 (A115)	16	25	27
3 (A114)	5	24	
4 (A113)	6	11	
5 (A112)	7	9	12
6 (A111)	19	28	
7 (A120)	8	10	17
8 (A110)	15	20	23
9 (A20)	28		
10 (A100)	22		
11 (A90)	14	20	21
12 (A80)	13	15	22
13 (A130)	23	25	
14 (A121)	22	23	27
15 (A122)	21		
16 (A123)	20	21	24
17 (A124)	18		
18 (A125)	29	25	
19 (A40)	27		
20 (A140)	28		
21 (A30)	28		
22 (A50)	26		
23 (A60)	28		
24 (A70)	29		
25 (A150)	26		
26 (A160)	26		
27 (A190)	29		
28 (A180)	29		
29 (A170)			

Tabelle B-2: Modus jedes Prozesses durch die Priorisierung

	GNS	GRPW	LFT	MSLK	LPF	WCS	ACS
1 (A10)	1	2	1	1	2	1	2
2 (A115)	1	2	1	1	2	1	1
3 (A114)	1	2	1	1	2	1	1
4 (A113)	1	2	1	1	2	1	1
5 (A112)	1	2	1	1	2	1	2
6 (A111)	1	2	1	1	2	1	1
7 (A120)	1	2	1	1	2	1	1
8 (A110)	1	2	1	1	2	1	1
9 (A20)	2	1	1	1	2	1	1
10 (A100)	1	2	1	1	2	1	1
11 (A90)	1	2	1	1	2	1	1
12 (A80)	1	2	2	2	1	2	1
13 (A130)	1	2	2	2	2	2	2
14 (A121)	1	2	1	1	2	1	2
15 (A122)	1	2	1	1	2	1	1
16 (A123)	1	2	1	1	2	1	2
17 (A124)	1	2	1	1	2	1	1
18 (A125)	1	2	1	1	2	1	2
19 (A40)	1	2	1	1	2	1	1
20 (A140)	1	2	1	1	2	1	1
21 (A30)	1	2	1	1	2	1	2
22 (A50)	1	2	1	1	2	1	2
23 (A60)	1	2	2	2	2	2	1
24 (A70)	1	2	1	1	2	1	2
25 (A150)	1	2	1	1	2	1	1
26 (A160)	1	2	1	1	2	1	2
27 (A190)	1	2	1	1	2	1	2
28 (A180)	1	2	1	1	2	1	2
29 (A170)	1	2	1	1	2	1	2

Anhang C Datei j301_3.mm aus PSPLib

```
************************************************************************
****
file with basedata            : mf1_.bas
initial value random generator: 1622672903
************************************************************************
****
projects                      :  1
jobs (incl. supersource/sink ):  32
horizon                       :  235
RESOURCES
  - renewable                 :  2   R
  - nonrenewable              :  2   N
  - doubly constrained        :  0   D
************************************************************************
****
PROJECT INFORMATION:
pronr.  #jobs rel.date duedate tardcost  MPM-Time
    1     30      0       35       20       35
************************************************************************
****
PRECEDENCE RELATIONS:
jobnr.    #modes  #successors   successors
   1        1          3           2   3   4
   2        3          3          16  25  27
   3        3          2           5  24
   4        3          2           6  11
   5        3          3           7   9  12
   6        3          3          19  28  31
   7        3          3           8  10  17
   8        3          3          15  20  23
   9        3          1          28
  10        3          1          22
  11        3          3          14  20  21
  12        3          3          13  15  22
  13        3          2          23  25
  14        3          3          22  23  27
  15        3          1          21
  16        3          3          20  21  24
  17        3          1          18
  18        3          2          19  25
  19        3          2          27  30
  20        3          1          31
  21        3          2          26  31
  22        3          1          28
  23        3          1          30
  24        3          1          26
  25        3          1          26
  26        3          2          29  30
  27        3          1          29
  28        3          1          29
  29        3          1          32
```

```
  30        3          1          32
  31        3          1          32
  32        1          0
************************************************************************
****
REQUESTS/DURATIONS:
jobnr. mode duration  R 1  R 2  N 1  N 2
------------------------------------------------------------------------
----
  1      1     0       0    0    0    0
  2      1     9       8    0    0    8
         2     9       3    0    3    0
         3     9       0    6    0    8
  3      1     4       8    0    0    2
         2     5       8    0    6    0
         3    10       0    9    3    0
  4      1     2       7    0    0    7
         2     5       0    8    3    0
         3     5       0    6    0    5
  5      1     2       0    5    0    5
         2     6       0    3    0    1
         3     9       0    2   10    0
  6      1     2       9    0    2    0
         2     7       8    0    0    2
         3    10       0    2    0    2
  7      1     1       9    0   10    0
         2     5       8    0   10    0
         3     9       7    0    0    8
  8      1     2       6    0    5    0
         2     3       6    0    4    0
         3     8       5    0    4    0
  9      1     1       0    5    0    2
         2     6       1    0    0    1
         3     6       2    0    9    0
 10      1     3       0    2    0    7
         2     5       8    0    0    7
         3     7       3    0    0    6
 11      1     1       0    5    7    0
         2     7       3    0    0    6
         3     8       2    0    6    0
 12      1     5       0    6    0    9
         2     6       7    0    0    7
         3     7       6    0    7    0
 13      1     6       0    4    0    5
         2     7       0    3    0    3
         3    10       9    0    0    1
 14      1     3       0    5    0    9
         2     3       6    0    0    6
         3     4       0    5    0    4
 15      1     2       0    9    8    0
         2     3       0    7    7    0
         3     6       0    3    0    4
 16      1     2       6    0    0    2
         2     5       0    4    9    0
         3     8       3    0    7    0
```

```
 17      1     9       10     0     0    10
         2    10        9     0     0    10
         3    10       10     0     2     0
 18      1     3        7     0     5     0
         2     4        0     7     0     4
         3     5        0     4     4     0
 19      1     1        0     6     7     0
         2     3        5     0     6     0
         3     4        0     4     0     2
 20      1     8        0     5     9     0
         2     8        0     5     0     9
         3    10        0     4     0     9
 21      1     2        8     0     2     0
         2     5        8     0     0     9
         3     9        7     0     0     8
 22      1     4        7     0     0    10
         2     5        6     0     0     7
         3    10        0     4     0     3
 23      1     5        5     0     8     0
         2     6        0     4     8     0
         3    10        4     0     7     0
 24      1     1        7     0     0     3
         2     3        3     0     7     0
         3     3        0     7     7     0
 25      1     8        0     8     0     2
         2     8        2     0     4     0
         3     9        0     6     3     0
 26      1     1        2     0     6     0
         2     5        0     8     3     0
         3     5        0     9     0     8
 27      1     3        0     5     0     9
         2     6        4     0     7     0
         3     9        0     5     5     0
 28      1     2        7     0     6     0
         2     7        7     0     5     0
         3    10        6     0     0     2
 29      1     3        0     7     7     0
         2     5        8     0     0     9
         3     7        6     0     7     0
 30      1     7        6     0     2     0
         2     8        4     0     1     0
         3     9        0     7     0     1
 31      1     3        6     0     9     0
         2     4        0     4     9     0
         3     9        4     0     0     7
 32      1     0        0     0     0     0
************************************************************************
****
RESOURCEAVAILABILITIES:
  R 1  R 2  N 1  N 2
   18   10   48   51
************************************************************************
****
```

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München, 03.05.2021, Li, Lu

Ort, Datum, Unterschrift