



Kapitel 1

Das Projekt AutoBauLog – Autonome Steuerung in der Baustellenlogistik

Prof. Dr. Stefan Kirn, Dipl. oec. Marcus Müller, Dipl.-Ing. (FH) Carsten Frantzen,
Dipl.-Ing. Ulrich Hermanski

Zusammenfassung Das Projekt AutoBauLog entwickelte Modelle, Methoden und Werkzeuge, um Baumaschinen mit softwarebasierter Intelligenz und Sensorik auszustatten. AutoBauLog nutzte dabei Konzepte der Autonomie auf den Ebenen der Maschine, der Maschinen-Teams sowie auf Ebene des Baustellenleitstandes. Dadurch konnte eine Dezentralisierung der Entscheidungsprozesse auf Tiefbaustellen und die Selbstabstimmung der Baumaschineneinsätze ohne dispositiven Eingriff durch den Bauleiter erreicht werden. Ziel war es dabei, die Effizienz und Geschwindigkeit in der projektspezifisch fortlaufenden (Neu-)Organisation des Bauablaufs zu erhöhen. Das vorliegende Kapitel beschreibt den Forschungsansatz für das Gesamtprojekt sowie die im Projekt beteiligten Wertschöpfungsketten und Partner. Die dargestellte Projektarchitektur in drei Schichten ist gleichzeitig gliederungsgebend für dieses Buch.

Prof. Dr. Stefan Kirn
Forschungszentrum FZID, Universität Hohenheim,
E-Mail: stefan.kirn@uni-hohenheim.de

Dipl. oec. Marcus Müller
Forschungszentrum FZID, Universität Hohenheim,
E-Mail: marcus.mueller@uni-hohenheim.de

Dipl.-Ing. (FH) Carsten Frantzen
EDR Software GmbH, München
E-Mail: c.frantzen@edr-software.com

Dipl.-Ing. Ulrich Hermanski
Topcon Europe Positioning B.V, 2908LJ Capelle a/d IJssel, Netherlands,
E-Mail: ulrich.hermanski@topconsokkia.eu



1.1 Forschungsansatz

1.1.1 Problemstellung

Industrielle und öffentliche Bauvorhaben sind gekennzeichnet durch ihre Einmaligkeit, die Beteiligung einer Vielzahl unterschiedlicher Unternehmen an der Leistungserstellung und der daraus resultierenden, erfolgsentscheidenden Koordinationsfunktion [1, S. 47 – 49] und [2, S. 208 – 210]. Während die Bauplanung bereits vergleichsweise umfangreich IT-seitig unterstützt wird, bestehen in der Phase der Bauausführung noch erhebliche Verbesserungspotenziale. So zeigen sich dort ein geringer IT-Durchdringungsgrad, zahlreiche Medienbrüche und Schnittstellenprobleme zwischen den Akteuren sowie manuelle Informations- und Abstimmungsprozesse. In der Folge wird die Baustellensteuerung nur unvollständig, ungenau oder verspätet mit Informationen über die Bauprozesse, den Baufortschritt sowie den Einsatz und die Verfügbarkeit von Bauressourcen versorgt. Dies betrifft insbesondere den Tiefbau – der deshalb im Mittelpunkt des Vorhabens steht – und dort den gesamten Bereich der Baustellenlogistik. Hier sind die von einem signifikant verbesserten IT-Einsatz von der Planung über die Simulation und Steuerung bis hin zur Teilautonomie von Baustellenfahrzeugen und -maschinen erwarteten Optimierungspotenziale besonders hoch.

Bisherige Ansätze zur Digitalisierung und Virtualisierung des Baustellenbetriebs basieren auf der Annahme, dass das Baugeschehen nahezu vollständig durch hierarchische Planungs- und Steuerungssysteme koordiniert werden kann. Diese Ansätze werden entlehnt aus der Fertigungswirtschaft, in denen entsprechend organisierte, hochgradig aufeinander abgestimmte und durch die zentrale Machtposition des OEM geprägte Produktions- und Lieferketten bestehen (Supply Chain Management und Digitale Fabrik). Wesentliche Schwächen dieser Lösung sind die völlig unzureichende Unterstützung paralleler Abläufe auf Baustellen, die Notwendigkeit zur permanenten Gegenkontrolle von planungs-, ausführungs- und kostenrelevanten Vorgaben zwischen Auftraggeber und -nehmer, die heute noch übliche Nachkontrolle (mit anschließender Reparatur) anstatt prozessbegleitender Qualitätssicherung („built-in-Quality“), die trotz enormer Ineffizienzen nach wie vor bestehende Dominanz des Push- gegenüber dem Pull-Prinzip bspw. bei der Baustellenbelieferung und die völlig unzureichende Koordination der Zusammenarbeit der verschiedenen Akteure auf der Baustelle über Unternehmensgrenzen hinweg in der Bauausführungsphase.

1.1.2 Lösungsansatz

Für die zuvor skizzierten Probleme bietet die Autonomik völlig neue Zugänge zu auf andere Weise kaum erreichbaren Ergebnissen. Das Vorhaben AutoBauLog verfolgte deshalb einen Lösungsansatz, der die spezifischen Herausforderungen des Baugeschehens unmittelbar durch die zentralen Lösungskonzepte der Autonomikvision adressierte. Ziel der in AutoBauLog entwickelten Lösungen war die Über-



tragung der ganzheitlich ausgerichteten Vision der „Digitalen Fabrik“ ([3]) in die Bauwirtschaft, und zwar speziell auf Baustellenmanagement und Baustellenlogistik im weitesten Sinn. Dies erfolgte unter Nutzung aller Möglichkeiten der Digitalen Konvergenz zur Zusammenführung bisher getrennter Technologiebereiche, hier insb. Bauplanungstechnologien, Telematik und Georeferenzierung, Technologien zur Maschinensteuerung, Augmented Reality (AR) sowie deren Integration insgesamt mit den heute in der Bauwirtschaft entstehenden 5D-Bauwerksmodellen (drei Raumdimensionen, Zeit und Kosten).

Mit der Erschließung der Potenziale des Internet der Dinge für die Bauwirtschaft durch eine umfassende Integration maschinengestützter Sensorik und Georeferenzierung als informationstechnische Basis eines Virtual und Augmented Reality-basierten Baustellenleitstandes sowie durch den Aufbau respektive Erprobung einer IP-gestützten offenen, breitbandigen Baustellen-Kommunikationsplattform konnten die für die Autonomik-Vision erforderlichen Koordinationsaufgaben kommunikationssseitig (downstream, upstream) unterstützt werden. Die heute bereits bestehenden Ansätze zur „Autonomisierung“ von Baumaschinen wurden dahingehend weiterentwickelt, dass die Baumaschinen ihre Aktivitäten teilautonom steuern und sich unter Nutzung von Situationsmodellen und -kalkülen auch selbst überwachen können. AutoBauLog etablierte dazu in einem zweistufigen Prozess zunächst verteilte und maschinennahe Regelkreise (Erhöhung des Autonomie- und Vernetzungsgrads von Baumaschinen, Sense-Think-Act-Simulate-Zyklus auf Baumaschinenebene, s. Abbildung 1.1). Auf dieser Basis werden zielbasierte „Verhaltensaufträge“ den permanent mit der Ist-Situation abgeglichenen Vorgaben der Bauplanung just-in-time in die Baumaschinen übertragen.

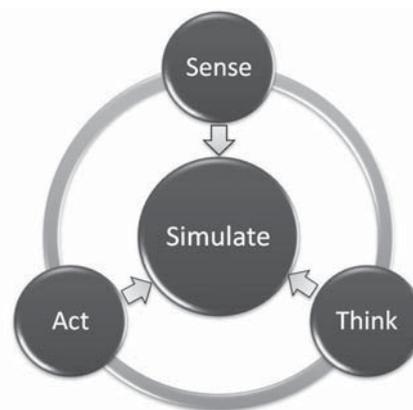


Abb. 1.1 Sense-Think-Act-Simulate-Zyklus auf Baumaschinenebene

Die fortlaufende Übertragung der mittels baumaschinengestützter Sensorik gewonnenen Echtdateen (bspw. Leistungsdaten, Eigenvermessung, Umwelt) werden über die Kommunikationsplattform in den Leitstand kommuniziert. So kann es zu einem fortlaufenden Abgleich mit der aus der Bauplanung vorgegebenen Sollwerten kommen. Dies schaffte die Basis für eine baustellenbetriebsweite Steuerung und Simulation vernetzter, maschinenbasierter Bauprozesse. Zugleich konnten auch die planungs- und steuerungsrelevanten Informationen unmittelbar mit den ökonomisch relevanten Sachverhalten (wie Projektcontrolling, Abrechnung) verbunden werden.



Die Entwicklung einer Baumaschinen-Kooperationsarchitektur auf Basis von Konzepten der Multiagententechnologie können sich teilautonome Baumaschinen in Echtzeit über die Durchführung ihrer Aktivitäten multilateral abstimmen (Teambildung auf Maschinenebene). Die Integration von VR und AR-Technologien zur räumlichen Darstellung im Baustellenleitstand ermöglicht es auch entfernt vom Geschehen arbeitenden Mitarbeitern der Bauleitung die wesentlichen räumlichen Zusammenhänge im Leitstand zu erschließen. Die so getroffenen Maßnahmen können in AR-Qualität direkt an die Mitarbeiter vor Ort kommuniziert werden.

Im Vorhaben wurden in einem zweifach durchlaufenen Wasserfall-Engineeringmodell die drei bereits erwähnten Regelkreise in einem bottom-up-Ansatz etabliert. Im ersten Schritt wurden Baumaschinen mit softwarebasierter Intelligenz und Sensorik so ausgestattet, dass sie im Hinblick auf die Prozesskoordination zu teilautonomen Einheiten wurden. Im zweiten Schritt wurde die Kooperationsfähigkeit von Baumaschinen, vor allem durch den Einsatz intelligenter Softwareagenten und fachlichen Koordinationsprotokollen hergestellt. Im dritten Schritt wurden die Teilbereiche des Baugeschehens ausgehend von inhaltlich wie zeitliche realitätsnahen Informationsbasen (über die erweiterte Sensorik-, Aktuator- und Kommunikationsinfrastruktur) in Bauprozessen zusammengeführt und über einen Leitstand verfügbar gemacht, repräsentiert und mit Entscheidungsverfahren unterstützt.

Die Technologieintegration in AutoBauLog erfolgte durch eine modellorientierte Entwicklung einer Baumaschinen-Kooperationsarchitektur. Die Kooperationsarchitektur spezifiziert die Zusammenhänge der am Baugeschehen beteiligten Objekte anhand von (1) Maschinenmodellen, (2) Kontext- und Situationsmodellen, (3) integrierten Produkt-/Bauwerksmodellen und (4) Bauprozessmodellen. Das zweite wesentliche Ergebnis ist die Baustellen-Informationssystemarchitektur (BauIS-Architektur) als „Bauplan“ für die durch AutoBauLog zu entwickelten technischen Innovationen und deren anschließende Umsetzung in Prototypen/Pilotierungen. Die BauIS-Architektur besteht aus den Komponenten (1) Autonomik-Infrastruktur, (2) Sensor-/Aktuatorinfrastruktur, (3) Kommunikationsschicht zwischen Maschinen/Maschinenteam und Baustellenleitung, (4) Entscheidungsunterstützungssystem und (5) VR/AR-basierter Leitstand.

Dazu entwickelte AutoBauLog die folgenden Innovationen: Mittels einer Baumaschine-zu-Baumaschine-Kommunikation konnten kommunikationsseitig die Voraussetzungen zur Delegation von interprozessualen Abstimmungsbedarfen auf die Maschinenebene geschaffen werden. Die autark erfassten Maschinen- und Baustellenparameter werden zur Vorhersage der weiteren 6D-Entwicklung (3D-Modell + Zeit + Kosten + Qualität) der Baustelle verwendet und bieten damit unter Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten die Grundlage für das frühzeitige Erkennen von kritischen Situationen und damit für rechtzeitiges Gegensteuern des Projektmanagements bzw. der Maschinen selbst (Autonomie/Selbstabstimmung). Schließlich erfolgt eine Rückkopplung des Baugeschehens über den Leitstand hinaus in vorgelagerte Planungs- und Projektmanagementfunktionen.

AutoBauLog entwickelte diese Innovationen in einem Engineering-Prozess, der die Technologieintegration, Systementwicklung und Evaluation von vorneherein auf breiter industrieller Basis bewerkstelligte sowie die komplementären Kompetenzen der Projektpartner zusammenfasste. Die Fokussierung des Projektes auf die vorste-



henden Kernziele wurde durch die Ausrichtung der Arbeiten auf eine erfolgreiche Pilotierung („Final Demonstrator“/Feldtest) erreicht.

1.2 Einbeziehung von kleinen und mittleren Unternehmen in den AutoBauLog-Innovationsprozess

Bauen ist in Deutschland eine Sache des Mittelstands. Wie kaum eine zweite Branche ist das Baugewerbe in Deutschland durch klein- und mittelständische Betriebe geprägt. Etwa 97% aller 74.765 Betriebe (Stand: Juni 2007) haben weniger als 50 Beschäftigte. Im Hoch- und Tiefbau sind 40% der tätigen Personen in Betrieben mit weniger als 50 Mitarbeitern beschäftigt. Lediglich 0,2% der Unternehmen haben mehr als 200, nur 0,03% mehr als 500 Beschäftigte. Zugleich bietet die in der Baubranche übliche Generalunternehmerschaft besonders günstige Bedingungen für die Durchsetzung von Innovationsprozessen. AutoBauLog nutzte diese dadurch, dass die in Baumaschinen heute zunehmend vorhandenen, bisher jedoch nur lokal genutzten Maschinensteuerungssysteme über einen preiswerten, technisch einfach anzukoppelnden „Konnektor“ mit einer breitbandigen, offenen Baustellenkommunikationsplattform verbunden und an den Baustellenleitstand angeschlossen werden können. Dieser Konnektor wird zukünftig als Modul in die Baustellenmanagementsoftware des Branchenführers RIB Software AG hinzugefügt. Den Generalunternehmern (wie bspw. dem Partner Züblin) wird auf diese Weise die Möglichkeit eines hohen unmittelbaren Mehrwerts eröffnet. Die Partner Drees & Sommer, Züblin und FZID entwickelten organisatorische Lösungen und Geschäftsmodelle (s. Teil V dieses Buches), um Subunternehmer mit diesem Konnektor auszustatten und auf diese Weise den erwarteten Mehrwert erschließen zu können. Basis hierfür sind baustellenbezogene Netzeffekte – nicht nur der Generalunternehmer, auch jedes Mitglied des Netzwerks hat Zugewinne und darauf basierende Lock-In-Effekte, die weit über die einzelne Baustelle hinausreichen.

Das Vorhaben entwickelte seine Lösungen unter Beteiligung von Partnern mit Expertisen in den Bereichen Baumaschinen, Steuerungstechnik, Baumanagementsoftware und Bauprojektentwicklung. Das Konsortium deckte alle relevanten Innovationsketten zur Entwicklung, Realisierung und marktnahen Erprobung in der Baumaschinenteknik und Baustellensteuerung ab. Die F&E-Arbeiten wurden von Beginn an auf die durch die industriellen Technologieprovider RIB Information Technologies AG und Topcon Deutschland GmbH geplante Verwertung im Marktsegment Tiefbau ausgerichtet. Anforderungsanalysen und Erprobungen erfolgten für bzw. in drei Stufen: Simulation, Laborexperiment und Feldtest mit realen Baumaschinen.



1.3 Projektstruktur

1.3.1 Involvierte Prozess- und Wertschöpfungsketten

AutoBauLog führte drei bisher weitgehend unabhängig voneinander existierende, jeweils sehr erfolgreiche Wertschöpfungsketten aus den Bereichen Bauplanungssoftware, Baumaschinenautomatisierungstechnik, Hochleistungskommunikationssysteme und Telematik sowie Baustellenmanagement zusammen und vernetzte diese, um wichtige nächste Innovationsschritte auf dem Sektor des Bauwesens einzuleiten bzw. zu befördern.

Im Bereich der Bauplanungssoftware zielte der in AutoBauLog erreichte Innovationsschritt auf die Erschließung des Zugangs der Softwareprodukte zur Baustellenlogistik. Hierzu wurde, dies war die neue Herausforderung, eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Partner RIB mit einem Anbieter von Baumaschinensteuerungssystemen benötigt; dies stellt die Kernkompetenz des Partners Topcon dar. Topcon brachte seine Produkte sowie das Know how auf den Gebieten Satellitennavigation, Telekommunikation und Maschinensteuerung mit in das Projekt ein. Dem Partner Topcon eröffneten sich dadurch Möglichkeiten, durch die Integration von Produkten aus dem Bauplanungsbereich – in Kooperation mit RIB – sowie durch Bereitstellung von auf Baustellen bisher nicht verfügbaren breitbandigen Kommunikationsinfrastrukturen weitere Innovationsschritte zu unternehmen. In AutoBauLog wurde dies experimentell durch die Kooperation von Topcon mit Züblin untersucht. Mit den für Baumaschinen aller Art zunehmend verfügbaren Steuer- und Regelungssystemen eröffnen sich für Züblin neue Möglichkeiten, die bisher feststehende Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine neu zu definieren. AutoBauLog erschließt die Potenziale der Koordination und direkten Kommunikation zwischen Baumaschinen und eröffnet damit Möglichkeiten für völlig neue Baustellensteuerungsansätze.

Schon bisher werden Kommunikationstechnologien (bspw. SiteLINK[®] von Topcon) genutzt, um die von der Baumaschinensensorik erfassten Daten – insbesondere zu Abrechnungszwecken und für das Projektcontrolling – auf Bauprojektserver zurückzuliefern („Rückkanal“ von der Baumaschine in das Baustellenmanagement).

Die Projektsteuerung – im Projekt vertreten durch den Partner Drees & Sommer – profitiert von den entwickelten Lösungen insoweit, als dass detaillierte und feingranulare Datengrundlagen für eine effiziente Baustellensteuerung und Qualitätssicherung geschaffen werden können. Die automatisierte, sensorische Erhebung von Daten, deren Übertragung und zentralisierte Speicherung eröffnen für eine Bauprojektsteuerung bislang un erreichbare Potenziale im Hinblick auf die Überwachung und Sicherung von Kosten- und Qualitätszielen. Diese auch für den Bauträger vorrangigen Ziele führen zur Annahme, dass zukünftig autonome Technologien auch in den Ausschreibungen für große Infrastrukturprojekte seitens der Auftraggeber gefordert werden.



1.3.2 Die AutoBauLog-Konsortialstruktur

Das Konsortium von AutoBauLog (s. Abbildung 1.2) deckte alle wesentlichen Kompetenzbereiche für die Projektdurchführung ab. RIB ist führender Anbieter von IT-Systeme im Bauwesen, Topcon ist führender Telematik- und Sensorlieferant für ganzheitliche Baumaschinenlösungen. Drees & Sommer und Züblin sind Anwender der Technologie auf der Baustelle. Der Forschungspartner Universität Karlsruhe¹ steuert seine langjährige Forschungserfahrung im Bauwesen und der Bauinformatik bei. Das Forschungszentrum FZID ist Kernkompetenzträger im Bereich autonomer und situativer Systeme und das Virtual Dimension Center ist in der Visualisierung mit VR/AR-Techniken führend.

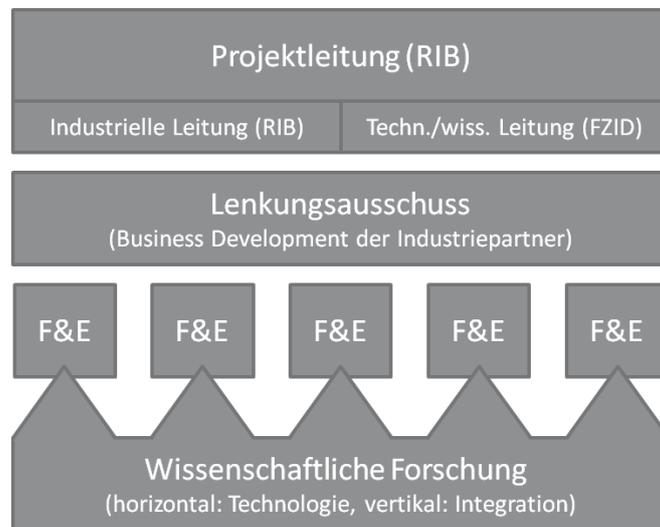


Abb. 1.2 Die AutoBauLog-Konsortialstruktur

Die Projektleitung und industrielle Leitung von AutoBauLog oblag dem Partner RIB. Die wissenschaftliche Leitung und Innovationskoordination lag beim Partner FZID. Die Forschung und Entwicklung der Industriepartner RIB, DRESO, TOP, VDC und ZUEB erarbeiteten Lösungen für die Anforderungen in den Bereichen der (1) Maschinensteuerung, (2) Maschinenteam, (3) integrierte Produkt-/Bauwerksmodelle und (4) leitstandbasierte Koordination und Visualisierung. Die dazu notwendigen wissenschaftlich-technischen Kompetenzen (Modelle, Methoden und Werkzeuge) wurden durch die wissenschaftliche Forschung bereitgestellt. Die Partner FZID und Universität Karlsruhe brachten ihre Kompetenzen in den Bereichen der Autonomie und autonomen Steuerungen, Sensorik in Baumaschinen, Baubetrieb, Bauprozesse und -objekt sowie Virtueller Realität ein.

¹ Beteiligte Einrichtungen waren das Institut für Technologie und Management im Baubetrieb und das Fachgebiet Building Lifecycle Management.



1.3.3 Die Projektarchitektur in drei Schichten

Das Projekt wurde in Form einer Drei-Schicht-Architektur organisiert, s. Abbildung 1.3. Diese Projektarchitektur ist gleichzeitig auch gliederungsgebend für die Teile II bis IV dieses Buches. Die Schicht „Modelle und Baustellenleitstand“ (Teil II) dient der Bereitstellung von Gelände-, Bauwerks- und Bauprozessmodellen für die darunter liegenden Architekturschichten. Gleichzeitig ist diese Schicht auch Empfänger der von den Maschinen- und Kooperationsschichten automatisiert und sensorisch erhobenen Leistungs- und Baufortschrittsdaten. Die Ebene der „Baustellen-Kooperationsarchitektur“ (Teil IV) nutzt die Bauprozessmodelle aus der ersten Schicht und setzt diese in die autonome, kooperative Steuerung des Baumaschineneinsatzes um. Dabei dient die dritte Schicht der „Maschinensteuerung und Baustellenkommunikation“ (Teil III) als Basis für die Erhebung der Maschinenleistungsdaten und zur Kommunikation der vom Steuerungssystem koordinierten Maschineneinsatzpläne („Aufträge“) in Form von z.B. Fahrbefehlen an LKW oder in Form von herzustellenden Geländemodellen an Bagger.

Modelle und Baustellenleitstand	
Teil II	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung von Gelände-, Bauwerks- und Bauprozessmodellen • Integration der Ist-Leistungsdaten in die Modelle und Fortschrittssimulation • Darstellung Gesamtbaustelle durch VR und AR-Technologien
Baustellen-Kooperationsarchitektur	
Teil IV	<ul style="list-style-type: none"> • Überführung der Bauprozessmodelle in Maschinenaufträge • Autonome, auf Selbstabstimmung beruhende Maschineneinsatzplanung • Koordination der Selbstabstimmungsprozesse
Maschinensteuerung und Baustellenkommunikation	
Teil III	<ul style="list-style-type: none"> • Sensorische Erhebung der Maschinenleistungsdaten • Bereitstellung der Baustellenkommunikationnetze • Speicherung und Bereitstellung historischer Sensordaten

Abb. 1.3 Die Projektarchitektur in drei Schichten

Auf der Schicht „Maschinensteuerung und Baustellenkommunikation“ werden die kommunizierten Aufträge abgearbeitet. Dabei werden bereits während der Leistungserstellung (z.B. Aushubleistung oder Transportleistung) Daten der in den Maschinen verbauten Sensoren erhoben, laufend übertragen und zentral gespeichert. Die Systeme der Ebene „Baustellen-Kooperationsarchitektur“ nutzen diese Daten wiederum zur bedarfsgerechten Neuausrichtung der Maschineneinsatzpläne und zur



Aktualisierung der an die Schicht „Modelle und Baustellenleitstand“ rückübertragenen Baustellen-Ist-Modelle. In AutoBauLog konnte so erstmals ein umfassender Lösungsansatz prototypisch implementiert werden der von der Planungsebene zur Ausführungsebene und zurück reicht.

1.4 Ausblick auf die Buchinhalte

Den drei bereits beschriebenen Teilen des Buches wird im vorliegenden Teil I ein einführender Beitrag über die Szenarien für die autonome Baustellenlogistik (Kapitel 2) vorangestellt. Es werden dort die im Rahmen der Anforderungsanalyse identifizierten Bauprozesse und Baumaschinen mit Autonomiepotenzial beschrieben. Die für eine weitere Betrachtung ausgewählten Bauprozesse samt zugehöriger Baumaschinen wurden in Szenarien überführt, die von Beginn an die Entwicklung der AutoBauLog Ergebnisse leiteten und im Rahmen der abschließenden Feldstudie auch als Basis der durchgeführten Evaluation dienten.

Neben der technischen Entwicklung der Ergebnisse erfolgte flankierend eine Betrachtung und Analyse der wirtschaftlichen Verwertungspotenziale autonomer Lösungen für den Tiefbau. Entsprechende Produkt-, Markt- und Preisanalysen finden sich in Teil V dieses Buches. Der aus der Perspektive des Projektes AutoBauLog auf die Zukunft des Tiefbaus gerichtete Ausblick erfolgt unter besonderem Fokus auf die (Voll-)Autonomisierung der Prozesse und Maschinen im abschließenden Teil VI.



1.5 Literaturverzeichnis

- [1] H. Bauer, *Baubetrieb*, 3., neubea. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [2] T. Hasenclever, T. Horenburg, G. Höppner, C. Klaubert, M. Krupp, K. H. Popp, O. Schneider, W. Schürkmann, S. Uhl und J. Weidner, »Logistikmanagement in der Bauwirtschaft«, *Digitale Baustelle-innovativer Planen, effizienter Ausführen*, S. 205–290, 2011.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1:2008-02: Digitale Fabrik – Grundlagen*. Düsseldorf, 2008.



Kapitel 2

Szenarien für die autonome Baustellenlogistik

Dr.-Ing. Burkhard Seizer, Dipl. oec. Marcus Müller

Zusammenfassung Eine detaillierte Analyse der Einsatz- und Evaluationsszenarien ist für den Erfolg eines Forschungsprojektes unabdingbar. In AutoBauLog wurden daher in Workshops und der Beteiligung von Wissenschaft und Tiefbaupraxis Anforderungsstudien in Bezug auf die wirtschaftliche Automatisierung und Automatisierung von Bauprozess und Baumaschine durchgeführt. Die so analysierten und dokumentierten Anforderungen leiteten konsequent die Entwicklungsarbeiten und Evaluationen der entstandenen Artefakte. Dies sicherte eine wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse von Beginn des Projektes an. Der vorliegende Unterabschnitt gibt Auskunft über die im Rahmen der Anforderungsanalyse identifizierten Bauprozesse und Baumaschinen mit Autonomiepotenzial.

2.1 Einleitung

Eine sinnhafte (Voll-)Automation sozio-technischer Systeme im Tiefbau bedarf zunächst der Auswahl von Teilsystemen für die eine Automatisierung besonders wirtschaftlich erscheint. Dabei sind Wechselwirkungen zwischen Prozess und Maschine zu berücksichtigen. Mag sich auch ein Prozess für eine Automatisierung anbieten, so kann der mit der Automatisierung der mit diesem Prozess verbundenen Maschinen zu einem prohibitiv hohen Aufwand führen. Aber auch in die Gegenrichtung kann es zu solch unerwünschten Wechselwirkungen kommen. Maschinen die besonders aufwandsarm einer Automatisierung unterzogen werden können, können ihrerseits wieder in Prozesse eingebunden sein, die für die eigentliche Wertschöpfung auf der Tiefbaustelle von nachgeordneter Relevanz sind.

Dr.-Ing. Burkhard Seizer
Drees & Sommer Infra Consult und Entwicklungsmanagement GmbH,
E-Mail: burkhard.seizer@dreso.com

Dipl. oec. Marcus Müller
Forschungszentrum FZID, Universität Hohenheim,
E-Mail: marcus.mueller@uni-hohenheim.de



Im Rahmen der Anforderungsanalyse zu Beginn des Projektes AutoBauLog erfolgte daher die Erhebung relevanter Bauprozesse sowie die Auswahl Autonomiegeeigneter Maschinen unter der Zugrundelegung von wirtschaftlichen Optimierungspotenzialen. Dazu wurden die erforderlichen Bauprozesse inklusiver der darin eingesetzten Baumaschinen beschrieben und analysiert. Im Rahmen von Workshops wurden gemeinsam mit Wissenschaftlern und Tiefbau-Praktikern Szenarien definiert die der angestrebten Automatisierung und Autonomisierung von Bauprozess und Baumaschine besonders zugänglich sowie gleichzeitig wirtschaftlich vorteilhaft sind.

Ausgewählt wurde der schwere Erdbau, insbesondere das Szenario „tiefer Abtrag und der Einbau großer Massen“. Die dort durch eine Automatisierung und Autonomisierung erzeugbaren Skalen- und Verbundeffekte führen zu einem ökonomisch sinnvollen Einsatz der im Projekt entwickelten Modelle, Verfahren und Werkzeuge. Das gewählte Szenario bildet gleichzeitig die Basis für die Evaluation der Modelle, Verfahren und Werkzeuge im Rahmen einer Feldstudie („Final Demonstrator“).

Neben den Anwendungs- bzw. Evaluationsszenarien wurde im Rahmen der Anforderungsanalyse der Stand der Technik zur Automatisierung und Autonomisierung von Baumaschinen erhoben. Dabei kam es zu einer Beschreibung, Analyse und Bewertung der vorhandenen Automatisierungsgrade der ausgewählten Baumaschinen.

2.2 Anforderungen an die Bauprozesse

2.2.1 Auswahl Autonomie-geeigneter Prozesse mit wirtschaftlichen Potenzialen

Für die Prozesse Einrichten und Freimachen sind in erster Linie Einzelmaschinen im Einsatz. Dies können beim Einrichten zum Beispiel Fahrzeugkräne sein, um Baustellencontainer zu positionieren, oder beim Freimachen können Rodungsmaschinen eingesetzt werden. Diese Maschinen werden jedoch als Einzelmaschinen eingesetzt. Sie sind daher nicht geeignet, um autonome Prozesse zu implementieren. Lediglich wenn Oberflächen (z.B. Asphaltstraßen) aufgebrochen werden müssen, sind mehrere Baumaschinen gleichzeitig im Einsatz (z.B. Bagger + LKW + ggf. Planierraupe). Dieser Prozess ist geeignet, um Autonomie einzusetzen. Die Bau-massen dieses Prozesses sind in der Regel relativ gering, so dass mit einer Autonomisierung dieses Prozesses nur kleine bis mittlere wirtschaftliche Potenziale zu erschließen sind.

Für das Abtragen von Oberboden werden in erster Linie Planierraupen eingesetzt, die den Oberboden zur Seite schieben, um ihn nach Fertigstellung aller Arbeiten wieder verteilen zu können. Dieser Prozess ist in der Regel ebenfalls ein Einzelmaschinenprozess, der wenig Autonomie-Eignung aufweist, da die Schichten unterschiedlich und ungleichmäßig stark anfallen und sich nur bedingt vorherbestimmen lassen.



Bei den Erdbauprozessen Lösen, Laden, Fördern und Einbauen sind zumeist mehrere Maschinenengruppen im Einsatz [1]–[3]. Diese Prozesse sind daher prädestiniert für die Abbildung von Autonomie. Da insbesondere im Verkehrswegebau auch große Erdbaumassen zu bewältigen sind, ist eine Prozessverbesserung durch die Einführung von Autonomie wirtschaftlich sehr positiv zu bewerten. Eine ggf. erforderliche Bodenverbesserung kann entweder durch ein zentrales Mischwerk oder vor Ort mit einer Bodenfräse durchgeführt werden. Es ist ein Spezialprozess, der ggf. in einem zweiten Entwicklungsschritt in die o.g. Erdbauprozesse integriert werden kann.

Im Kanal- und Rohrleitungsbau sind ergänzend zu den erforderlichen Erdbauprozessen in erster Linie Einzelgeräte im Einsatz (z.B. Grabenfräse, Verbaugerät, Horizontalbohrmaschine). Für diese Spezialgeräte ist die Einführung von autonomen Prozessen wenig geeignet.

Im Rahmen von AutoBauLog wurden in erster Linie Straßenbaustellen betrachtet. Die Herstellung des Straßenoberbaus ist in die Herstellung der nicht gebundenen Schichten (z.B. Frostschutzschicht aus Schotter) und die Herstellung von gebundenen Schichten (z.B. Asphaltdeckschicht) zu unterteilen. Für die Herstellung der ungebundenen Schichten können die gleichen Maschinenengruppen eingesetzt werden wie im Erdbau. Daher ist der Prozess der Herstellung ungebundener Oberbauschichten für die Anwendung der Autonomie gut geeignet und bei entsprechender Prozessverbesserung wirtschaftlich profitabel. Für die Herstellung gebundener Schichten werden in der Regel hochspezialisierte Fertiger eingesetzt. Die Vor- und Nachteile der Berücksichtigung von Fertigerprozessen im Rahmen von AutobauLog sind in der folgenden Abbildung 2.1 dargestellt.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Vervollständigt Straßenbauprozess • Häufiger Straßenbauprozess 	<ul style="list-style-type: none"> • Fertiger weist bereits einen hohen Automatisierungsgrad auf • Autonomisierung nicht besonders ausgeprägt, da alle Prozesse an den Fertiger angebunden • Fertiger und erforderliche Maschinenumgebung ist für Versuche zu teuer

Abb. 2.1 Vor- und Nachteile der Berücksichtigung von Fertigerprozessen

Bei den Fertigerprozessen kann die Autonomisierung nur mit geringem Wirkungsgrad implementiert werden, da der Fertiger als sehr teures Einzelfahrzeug sämtliche beteiligte Maschinen dominiert. Somit sind auch nur geringe wirtschaftliche Potenziale erschließbar. Die Fertigerprozesse werden folglich im Rahmen von AutoBauLog nicht betrachtet. Es werden daher folgende Autonomie-geeignete Tiefbauprozesse zur Weiterverfolgung im Rahmen von AutoBauLog ausgewählt:

1. Erdbauprozesse (Lösen, Laden, Fördern und Einbauen)
2. Herstellung nicht gebundener Oberbauschichten
3. Aufbrechen von Oberflächen



In der ersten Entwicklungsstufe von AutoBauLog ist der Prozess der Bodenverbesserung in einem zentralen Mischwerk abzubilden. In einer zweiten Entwicklungsstufe ist ggf. eine Integration einer Bodenfräse anzustreben.

2.2.2 Auswahl der erforderlichen Baumaschinen

Hierbei sind die Maschinen für die Vorgänge „Boden lösen“, „Transport“ und „Bodeneinbau“ zu unterscheiden. Bei den Prozessen „Boden lösen“ unterscheidet man grundsätzlich den tiefen Abtrag, der mit einem Bagger, vorwiegend Hydraulikbagger durchgeführt wird, und einen flachen Abtrag, für den bei leicht lösbaren Böden eine Kettenraupe (Dozer) eingesetzt wird. Beim flachen Abtrag ist für den Verladevorgang zusätzlich ein Radlader oder ggf. ein Kettenlader erforderlich. Sollte schwer lösbarer Boden anstehen, so sind für den Hydraulikbagger z.B. Meißelwerkzeuge erforderlich oder für die Kettenraupe z.B. Reißzähne. Da es sich bei schwer lösbaren Böden um dieselben Maschinen handelt wie bei den sonstigen Böden, werden die schwer lösbaren Böden im Rahmen von AutoBauLog mit entsprechend höheren Aufwandswerten simuliert.

Von entscheidender wirtschaftlicher Bedeutung ist beim Prozess „Boden lösen“, dass die in Bodenschichten anstehenden Bodenklassen getrennt gelöst werden. Das getrennte Lösen ist deshalb entscheidend, da die Bodenklassen wie in der folgenden Abbildung 2.2 zu verwerthen sind.



Abb. 2.2 Systematik der Bodenverwertung

Die Kenntnis der Bodenschichtung ist durch Bodenerkundungen (i.d.R. alle 50-200m) nur als Grobmodell bekannt. Es ist daher erforderlich, diese Bodenschichtung vor Ort zu beurteilen. Dies ist derzeit nur mit Hilfe der Bediener der Baumaschinen und der Bodengutachter vor Ort möglich. Die Technik kann hierbei allerdings unterstützen (vgl. Teil III dieses Buches).

Beim Transportprozess kommt im Erdbau in der Regel ein Dumper zum Einsatz, der allerdings nur innerhalb der Baustelle eingesetzt werden darf, weil er keine Zulassung zur Benutzung öffentlicher Straßen hat. Bei guter Verwertbarkeit und



Entwässerung der Logistikwege kommen ebenfalls LKW zum Einsatz. LKW sind zwingend erforderlich bei Transportwegen über öffentliche Straßen [4], [5].

Grundsätzlich ist der Transport von Erdmassen mit einem Förderband ebenfalls möglich. Da dieser Einsatz nur bei besonderen Verhältnissen erforderlich ist und bei Straßenbaustellen deutlich unwirtschaftlicher ist als der Transport mit Dumpfern oder LKW, wird der Erdmassentransport mit Förderbändern im Rahmen von Auto-BauLog nicht betrachtet.

Beim Bodeneinbauen sind die Prozesse Einbau großer Massen mit einer Kettenraupe oder Einbau in dünnen Schichten mit einem Grader zu unterscheiden. Bei beiden Prozessen ist eine anschließende Verdichtung mit einer Walze erforderlich, um die geforderte Tragfähigkeit zu erreichen. Die Bodenverbesserung wird wie im vorangegangenen Kapitel erläutert in einer zentralen Aufbereitungsanlage durchgeführt. Eine Bodenverbesserung mit Bodenfräsen ist im ersten Entwicklungsschritt zunächst nicht vorgesehen.

Alle drei Prozesse „Boden lösen“, „Transport“ und „Bodeneinbau“ sind alternativ auch mit nur einem Fahrzeug, dem sog. Schürfwagen (Scraper), leistbar. Jedoch kann der Schürfwagen nur bei wenigen Bodenarten eingesetzt werden. Ferner ist der Einsatz eines Schürfwagens als Einzelfahrzeug wenig sinnvoll, um Autonomieprozesse abzubilden. Der Schürfwagen wird daher im Rahmen von AutoBauLog nicht abgebildet.

Zusammenfassend werden die in der folgenden Abbildung 2.3 dargestellten Maschinen bzw. Maschinengruppen für die Erdbauprozesse ausgewählt. Die Auswahl umfasst Schaufelbagger für den schweren Erdbau, Dumper für den Transport von Erdmassen auf der Baustelle, Raupen und Walzen. Dies entspricht der typischen Ausstattung einer Erdbaustelle.

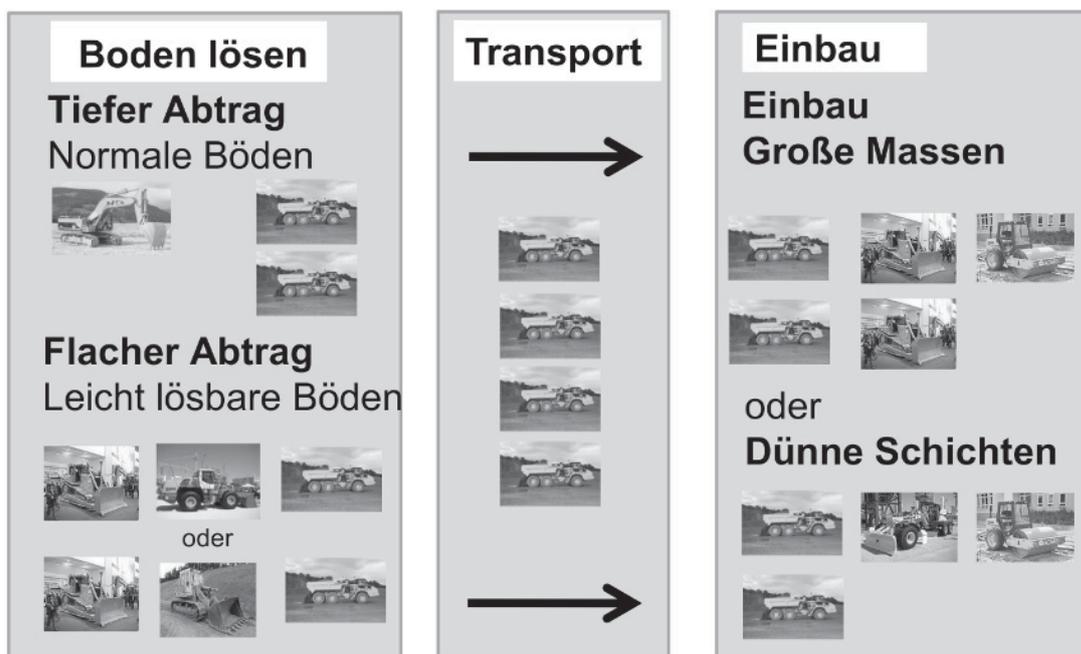


Abb. 2.3 Ausgewählte Baumaschinen für Erdbauprozesse



2.2.3 Darstellung der ausgewählten Prozesse in Szenarien

Zur Abbildung der Prozesse in Szenarien ist es erforderlich, zunächst die Lieferketten einer Erdbaustelle zu analysieren [6]. Die wirtschaftlichste Form der Lieferkette ist das Lösen des Bodens an einer Stelle der Baustelle und die direkte Verwertung an einer anderen Stelle der Baustelle (1). Die direkte Verwertung ist jedoch nicht immer möglich, weil die Einbaukapazitäten nicht ausreichen oder der Boden aufbereitet werden muss. Dann ist eine temporäre Ablagerung in einem Zwischenlager erforderlich (2). Auf diesem Zwischenlager kann auch gleichzeitig eine Aufbereitungsanlage (Brecher oder Mischanlage zur Bodenverbesserung) stationiert sein. Wie im vorangehenden Kapitel beschrieben, ist jedoch nicht jeder Boden verwertbar. Einige Bodenarten sind bautechnisch nicht geeignet und müssen auf eine Deponie gefahren werden. Dies trifft auch auf verunreinigte Böden zu. Für die Transporte zur Deponie müssen in der Regel öffentliche Straßen befahren werden. Als Transportfahrzeug kommt daher nur ein Lkw in Frage (3). In den meisten Fällen stehen vor Ort nicht ausreichende Mengen und Bodenklassen an, so dass auch Erdmassen und gebrochenes Material (für nicht gebundene Tragschichten) antransportiert werden müssen. Auch diese Transporte von außen auf die Baustelle müssen mit dem LKW durchgeführt werden (4). Sämtliche o.g. Transportfälle sind in der folgenden Abbildung 2.4 dargestellt.

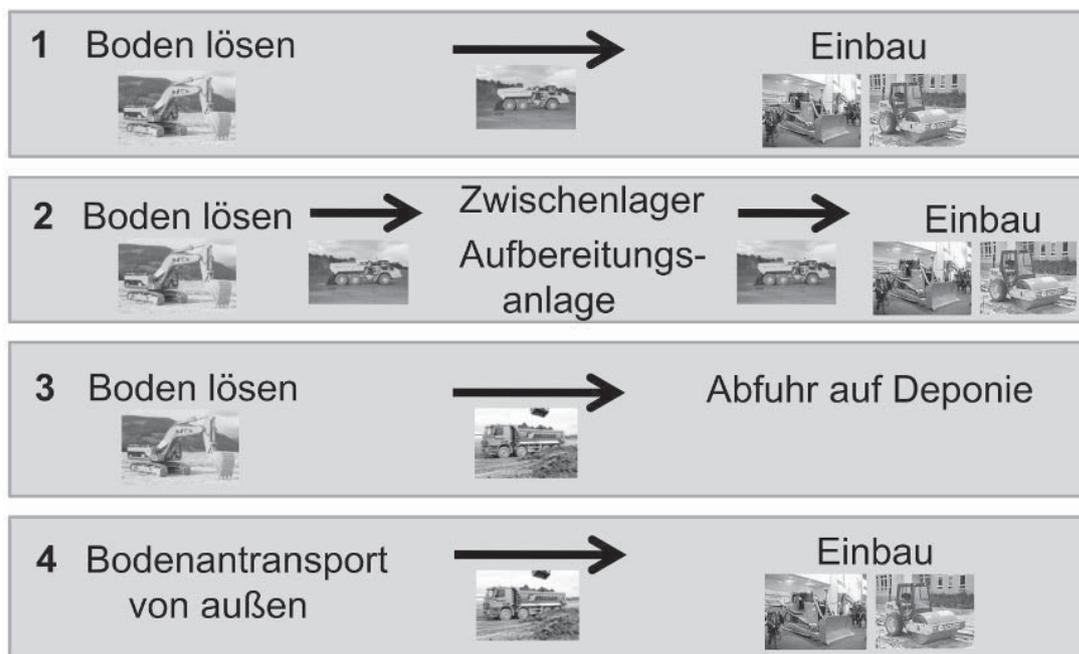


Abb. 2.4 Lieferketten einer Erdbaustelle

Für die Auswahl der Szenarien werden die ausgewählten Baumaschinen für die Erdbauprozesse mit den erforderlichen Lieferketten überlagert. Ferner werden die einzelnen Maschinenteam und die Leitstelle dargestellt. In den Szenarien werden die Prozesse für den tiefen Abtrag und den Einbau großer Massen sowie den flachen Abtrag und den dünn-schichtigen Einbau abgebildet (vgl. Abbildungen 2.5 und 2.6).

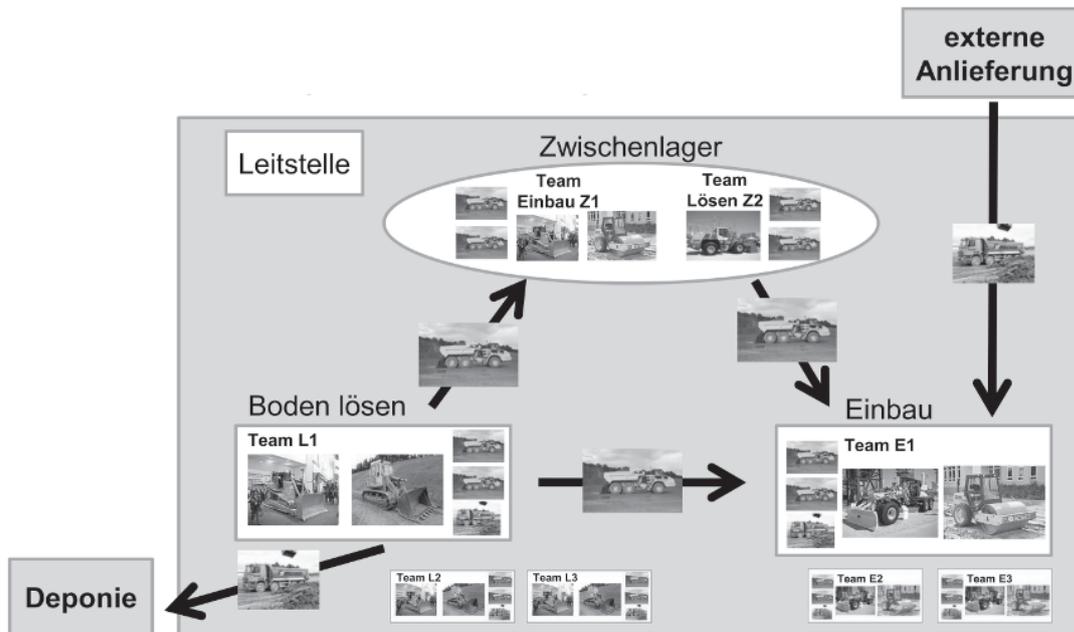


Abb. 2.6 Szenario 2 – Flacher Abtrag und dünnschichtiger Einbau

per stark beschädigt bzw. die Dumper können nur geringere Fahrgeschwindigkeiten erreichen. Ferner ist der Einbau von bestimmten Böden bei Regen nicht oder nur unter ständiger Kontrolle der Entwässerung möglich. Bei Frost ergeben sich ähnliche Einschränkungen für den gesamten Prozess Lösen – Transportieren – Einbauen.

Zusammenfassend sind im Rahmen von AutoBauLog die folgenden, in Abbildung 2.7 dargestellten Störgrößen im Erdbauprozess berücksichtigt [2, S. 164f], [4, S. 364], [14, S. 171f].

2.3 Anforderungen an die Maschinenteknik

2.3.1 Stand der Technik zur Automatisierung und Autonomisierung

Die Maschinensteuerungstechnik hat getrieben durch Innovationen in den Bereichen Mikroelektronik, Hydraulik, Sensorik, Telematik, Softwaretechnik und Mechanik erheblich dazu beitragen, die von Maschinen ausgeführten Arbeitsvorgänge zu (teil-)automatisieren, Arbeitspläne aus der Produktionsplanung auszuführen und die Präzision, Geschwindigkeit und Gesamtqualität der Arbeitsvorgänge zu erhöhen [15]–[20]. Während diese Entwicklungen sich zunächst auf stationäre und dann begrenzt mobile Arbeitsmaschinen in der Fertigungsindustrie beschränkten, hat sich in den vergangenen zehn Jahren die Steuerungstechnik für mobile Baumaschinen, insbesondere für im Tiefbau eingesetzte Maschinen, schnell weiterentwickelt und Ansätze der Fertigungsindustrie und digitalen Fabrik adaptiert. So ist die weitgehend automatisierte Kontrolle der Vorgänge einzelner Baumaschinen bereits heute

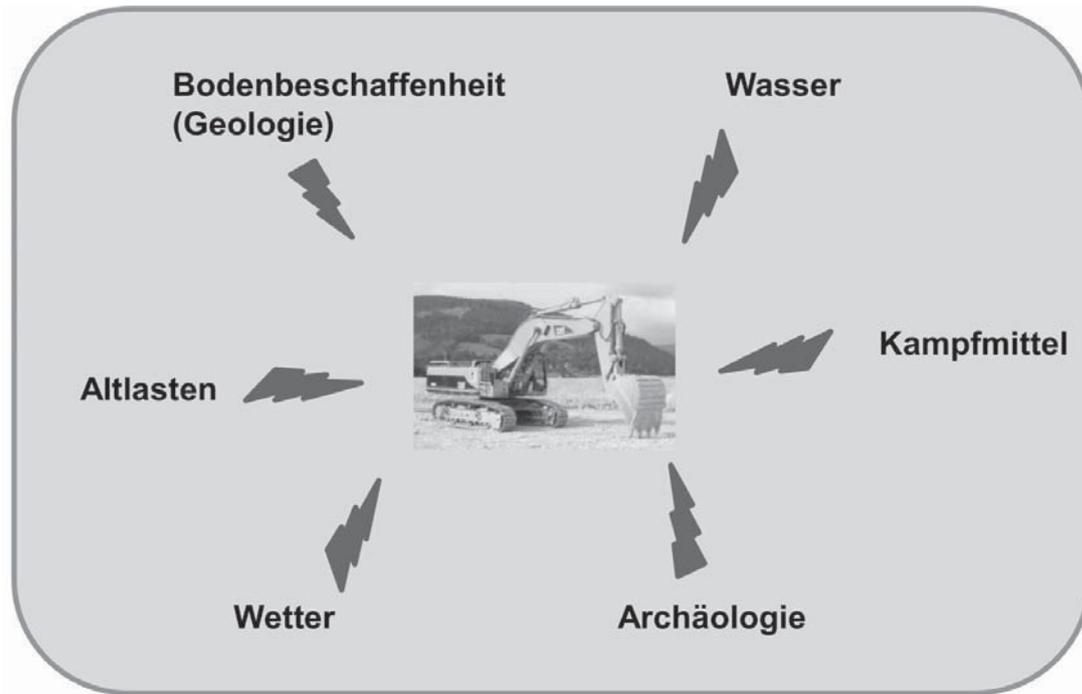


Abb. 2.7 Störgrößen im Erdbauprozess

Realität; darunter ist zu verstehen, dass der Maschinenbediener durch Steuerungstechnik unterstützt und hinsichtlich der auszuführenden Vorgänge angeleitet wird. Steuerungssysteme sind heute seitens der Maschinenbauer vollständig in die Maschine integriert, beispielsweise bis in die Ventile für die Hydraulikansteuerung.

In den letzten Jahren finden zudem GNSS (Global Navigation Satellite Systems: GPS (USA) + GLONASS (Russland) + GALILEO (EU), GNSS auch GPS genannt) und das bauspezifische Millimeter GPS im Tiefbau zunehmende Verbreitung [21], [22]. Maschinensteuerungssysteme werden derzeit um zusätzliche Sensoren und höhere Rechenkapazität erweitert. Ziel ist auch hier ein Zusammenwachsen von Steuerungs- und Maschinenteknik. Allen Systemen gemein ist das Arbeiten auf CAD-Modellen in Echtzeit: Werden in der Maschinensteuerung Differenzen zwischen dem CAD-Modell und der über Sensorik erfassten Umgebung festgestellt, wird automatisch in die Maschine eingegriffen und beispielsweise das Schild einer Raupe beim Planieren angepasst. Solche Systeme arbeiten heute schon im Hochpräzisionsbereich (Subzentimeterbereich). Über den CAN-Bus (Control Area Network) können einzelmaschinenbezogene Daten ausgelesen werden, z.B. Treibstoffstand, Motortemperatur, Arbeitsstunden und Positionierung [15], [23].

Softwaretechnisch basieren moderne Maschinensteuerungen auf serviceorientierten Architekturen und Webservice-Technologien, wodurch sie auf der technischen Ebene einfacher in übergeordnete Informationssysteme integriert werden können [24]. Stand der Praxis ist jedoch der konventionelle, wenig standardisierte Datentransfer z.B. über Dateiformate und Übertragungsmedien wie USB-Stick, um z.B. CAD-Daten in die Maschinensteuerung zu übertragen. Eine Rückkopplung von der Maschinensteuerung zur Planungsebene ist derzeit nicht möglich, wird aber dringend benötigt. Aktuell in der Entwicklung befinden sich kleinere und



schnellere Systeme, die Daten basierend auf GPS, GALILEO, GLONASS, GSM, UMTS und Standards des Internets der Dinge austauschen und verarbeiten können (RFID-basierte Sensorsysteme; Identifikation von Baumaschinen, -werkstoffen und -elementen [22], [23], [25], [26]). Die für rückkoppelnde AR-Systeme erforderlichen Breitbandkommunikationsplattformen stehen auf Baustellen bisher ebenfalls nicht zur Verfügung.

Im Bereich Maschinensteuerung ist für die ausgewählten und im folgenden dargestellten Maschinen folgender Stand der Technik aus dem Hause Topcon vorhanden. Die Maschinensteuerung eines Schaufelbaggers geschieht auf Basis von Laser oder GPS Technologie. Hierbei handelt es sich um ein reines Anzeigesystem das dem Bediener die exakte Position des Löffels, des Baggerarms als auch der Maschinenposition im 3D Geländemodell darstellt. Die Maschinensteuerung eines Rad/Raupenlader erfolgt auf Basis von Laser oder GPS Technologie. Ähnlich wie beim Bagger handelt es sich um ein reines Anzeigesystem das dem Bediener die exakte Position der Schaufel, des Schaufelarms als auch der Maschinenposition im 3D Geländemodell darstellt. Die Maschinensteuerung einer Raupe erfolgt auf Basis von Laser, Totalstation, GPS, mmGPS oder Inertialtechnologie. Exakte Bestimmung der Schildposition in der Höhe, Neigung sowie der Rotation und die Maschinenausrichtung. Der Boardrechner berechnet die Abweichung vom Sollmodell und das Schild wird automatisch ausgegeregelt. Die Maschinensteuerung eines Motorgrader erfolgt auf Basis von Laser, Totalstation, GPS oder mmGPS Technologie. Exakte Bestimmung der Schildposition in der Höhe, Neigung sowie der Rotation und die Maschinenausrichtung. Der Boardrechner berechnet die Abweichung vom Sollmodell und das Schild wird automatisch ausgegeregelt.

Walzen nutzen GPS Technologie zur exakten Positionsbestimmung für die Dokumentation der flächendeckenden Verdichtungskontrolle und zur Dokumentation der einzelnen Überfahrten sowie für eine automatisierte Verdichtungsmessung. LKW und Dumper besitzen einfache Telematiksysteme zur kontinuierlichen Positionsbestimmung und Fahrstreckenüberwachung [19]. Über Geofencing können z.B. Ein- und Ausfahrten aus der Baustelle oder aus einzelnen Baustellenabschnitten zu dokumentiert werden. Die Abbildung 2.8 stellt die Steuerungstechnik exemplarisch für das Baugerät Bagger dar.

2.3.2 Potenziale der Automatisierung und Autonomisierung

Ein wichtiger Entwicklungsschritt im Rahmen des Autobaulog Projekts war die Erweiterung der Maschinensteuerungs-Architektur um Webservice-Technologien, so dass diese auf der technischen Ebene einfacher in übergeordnete Informationssysteme integriert werden konnte.

Neben der Entwicklung dieser Breitbandkommunikationsplattformen war es aber auch das Ziel, die einzelnen Maschinen in Bezug auf Ihre Arbeitsabläufe noch weiter zu automatisieren und dort, wo es aus Anwendersicht Sinn macht, noch mehr Autonomie zu verleihen. Potenziale der einzelnen Maschinen diesbezüglich wurden dabei in folgenden Bereichen gesehen. Für den Bagger konnte der Autonomiegrad erhöht werden durch die Ausrüstung des Baggers mit einem 3D GPS Anzeigesys-

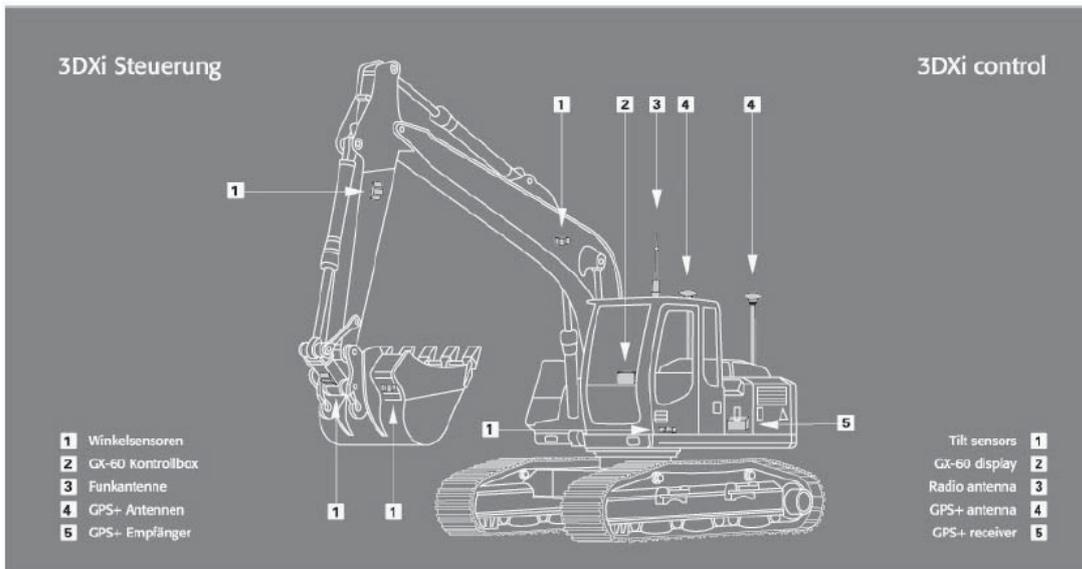


Abb. 2.8 Steuerungstechnik Bagger

tem, durch die Erweiterung des digitalen Geländemodells mit Layern der unterschiedlichen Bodenschichten. Die Ermittlung des tatsächlichen Aushubs durch Bestimmung der Position des Löffels in Verbindung mit dem Geländemodell ermöglichte eine automatisierte Erfassung der Bagger-Leistungsdaten. Über die Leistung erfolgte eine Zuweisung neuer Einsatzgebiete. Dadurch konnte der Beladeprozess mit Autonomie angereichert werden.

Auch Raupen und Walzen konnten mit einem 3D GPS Anzeigesystem ausgerüstet werden. Hier kam die Erweiterung des digitalen Geländemodells mit Layern der unterschiedlichen Bodenschichten zum Einsatz. Die Maschinenleistungsdaten konnten aufgenommen werden durch die Einbindung der Maschine in das Baustellenkommunikationssystem sowie dem Vergleich der Geländemodelle vor und nach einer Bearbeitung durch Raupen und Walzen. Die Anbindung einer intelligenten Verdichtungssteuerung durch Variablen wie Geschwindigkeit, Vibrationsfrequenz und Amplitude wurde im Projekt AutoBauLog noch nicht unternommen. Hier werden Folgeprojekte angestrebt, um auch die Potenziale dieser Autonomie-gestützten Komponente ausschöpfen zu können.

Die auf Baustellen zum transport eingesetzten LKW waren im Fokus der Autonomieentwicklungen im Projekt. Durch eine autonome Abstimmung der Transportkapazitäten auf der Erdbaustelle in Abhängigkeit der von den Ausbaugeräten erbrachten Ist-Leistungen konnte die koordinative Belastung des Bauleiters deutlich reduziert werden. Die Ausbaugeräte erheben durch die zuvor skizzierten Techniken und Verfahren ihre Ist-Leistungsdaten und kommunizieren diese über das Baustellen-weite Kommunikationsnetz. Die LKW kennen folglich die aktuellen Ist-Leistungsdaten ihrer „Zulieferer“ und können sich gestützt auf Verfahren der verteilten künstlichen Intelligenz dezentral abstimmen. Der LKW-Einsatz sowie dessen flexible Neudisposition nach einer detektierten Störung verläuft vollkommen autonom vom Bauleiter. Im Feldtest werden die vom System ermittelten Fahraufträge direkt an die menschlichen LKW-Fahrer zur Ausführung übergeben. Das Potenzi-



al der Vollautomatisierung der Transportkapazitäten wurde im Experimentallabor mit selbstfahrenden Modell-LKW evaluiert. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem vom dispositiven Softwaresystem vorgegebenen Fahraufträgen die Reaktionsgeschwindigkeit und Flexibilität des Transportlogistischen Systems erhöht wird.

Bei der Erkennung der vorhandenen Bodenbeschaffenheit besteht Potenzial für Automatisierung und Autonomisierung. Mit Hilfe von geologischen Untersuchungen kann die zu erwartende Bodenbeschaffenheit bisher nur mit Ungenauigkeit bestimmt werden. Aus diesem Grund ist eine Ermittlung der tatsächlichen Ist-Situation notwendig. Stand der Technik ist, dass die Bodenbeschaffenheit mit Hilfe unterschiedlicher Felduntersuchungen (z.B. Probebohrungen, Sondierungen, Schürfe usw.) und Laboruntersuchungen bestimmt wird.

Im Rahmen der Automatisierung und Autonomisierung von Baumaschinen wäre eine in situ Erkennung der vorhandenen Bodenbeschaffenheit zumindest in gewissen Grenzen denkbar. So könnte evtl. über die Bestimmung unterschiedlicher Parameter (wie z.B. Gewicht, Volumen, optische Eigenschaften, Feuchte usw.), der Kräfteentwicklung am Löffel bzw. Schild oder mit Hilfe von geophysikalischen Erkundungsverfahren Aussagen über die Bodenbeschaffenheit gemacht werden. Aufgrund der Komplexität könnte es auch notwendig sein eine Kombination dieser Methoden zu wählen. Im Rahmen von AutoBauLog stand die automatisierte Erkennung von Bodenbeschaffenheiten jedoch nicht im Vordergrund. Eine entsprechende Forschungsarbeit ist für zukünftige Weiterentwicklungen im Rahemn weiterer Forschungsprojekte angestrebt.

2.3.3 Auswahl der aus Anwendersicht sinnvollen Potenziale

Aus Anwendersicht ist z.B. eine automatische Richtungssteuerung einer Raupe bzw. eines Graders technisch möglich, steigert aber nur geringfügig die Produktivität. Ebenso zu bedenken ist, ob auf einer normalen Linienbaustelle eine vollständige autonome Baumaschine Sinn macht, da dies nur mit einem erheblichen Aufwand in Bezug auf die erforderliche Arbeitssicherheit realisierbar wäre. Notwendig hierfür wären visuelle oder Scanner-gestützte Systeme zum Erkennen der Bodenbeschaffenheit, Hindernissen usw. und es müssten lokale als auch globale Fahrspurplanungen integriert werden. Im Bereich der Landwirtschaft sind solche automatischen Lenk- und Spurplanungssysteme bereits im Einsatz wobei die Maschinen hier auch aus Sicherheitsgründen nicht vollständig autonom arbeiten. Eine Ausrüstung z.B. einer Raupe mit einem derartigen System wäre für Demozwecke möglich, wenn die sicherheitsrelevanten Aspekte außer Acht gelassen werden könnten. Insbesondere auf Straßenfertigern oder auf Walzen ist der Einsatz automatischer Lenksysteme als sinnvoll einzustufen.

Die Autonomisierung von Transportgeräten (z.B. LKW) verspricht besonders aus Anwendersicht hohe Potenziale. Aufgrund von Schwankungen in den Ausbauleistungen der Bagger kommt es immer wieder zu Wartezeiten bei den LKW bzw. Stillstandzeiten bei den Baggern. Eine autonome Abstimmung der LKW-Zuteilungen zu den einzelnen Ausbaugeräten stellt daher aus prozessualer Sicht eine besondere Chance der Autonomie dar. Die perspektivische, im Labor bereits um-



gesetzte Vollautomatisierung von Transportgeräten bietet die Möglichkeit weiterer Verbesserungspotenziale. Im Feld konnte eine solche automatisierte Transportressource jedoch noch nicht zum Einsatz gebracht werden.

Das Projekt AutoBauLog kaprizierte sich daher auf die Zuteilung der LKW-Ressourcen (Prozess-Autonomie) im Feld. Im Experimentallabor konnten LKW-Modelle automatisiert werden (Maschinen-Autonomie). In vorgeschalteten Simulationsstudien konnten die, der so definierten Autonomie zugrundegelegten Verfahren bereits eine Erhöhung der Flexibilität und Reaktionsgeschwindigkeit zeigen. Dies führte auch zu einer Erhöhung der ausgebauten, transportierten und wieder eingebauten Erdmengen im Vergleich zu den traditionellen Verfahren.

2.4 Anforderungen an die Systemumgebung

2.4.1 Anforderungen an Kommunikation und Steuerung innerhalb der Maschinengruppen und zwischen Maschinengruppen und Leitstand

Die einzelnen Maschinen können über die während des Projekts entwickelte Baustellenkommunikationsinfrastruktur innerhalb des gesamten Teams und über Teamgrenzen hinweg kommunizieren. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit der autonomen, selbstabstimmenden Organisation des LKW-Einsatzes. Die Maschinenteam kommunizieren so untereinander und steuern damit Kapazitäten und reagieren dabei auf die Einflüsse aus Störgrößen.

Die Kommunikation zwischen den Maschinenteam und dem Leitstand garantiert dabei, dass alle wichtigen Informationen im Leitstand verfügbar sind. Die Steuerungsprozesse innerhalb und zwischen den Maschinenteam können so im Leitstand nachvollziehbar gemacht werden. Der Leitstand kann bei gegebenen Anlass steuernd eingreifen kann. Im Feldtest mittels Bildschirmnachrichten an die Fahrer. Im Laborexperiment kann aus dem Leitstand heraus direkt die Maschinensteuerung übernommen werden.

Die Kommunikationswege zwischen den Maschinen und dem Leitstand werden in Abbildung 2.9 dargestellt.

2.4.2 Anforderungen an den Leitstand und die Systeme zur Arbeitsvorbereitung und -kontrolle

Basis für sämtliche Prozesse ist die Planung der Erdbaumaßnahmen. Für die Planung der Bauprozesse und den Einsatz von Personal, Maschinen und Baumaterial sind unterschiedliche Partialmodelle erforderlich. Diese wurden im Rahmen der Multimodell-basierten Modellierung mit den erforderlichen Parametern ergänzt. Dies trifft insbesondere auf das Bauprozessmodell sowie die Geländemodelle. Die Modellierungswerkzeuge des Partners RIB wurden entsprechend angepasst. Über

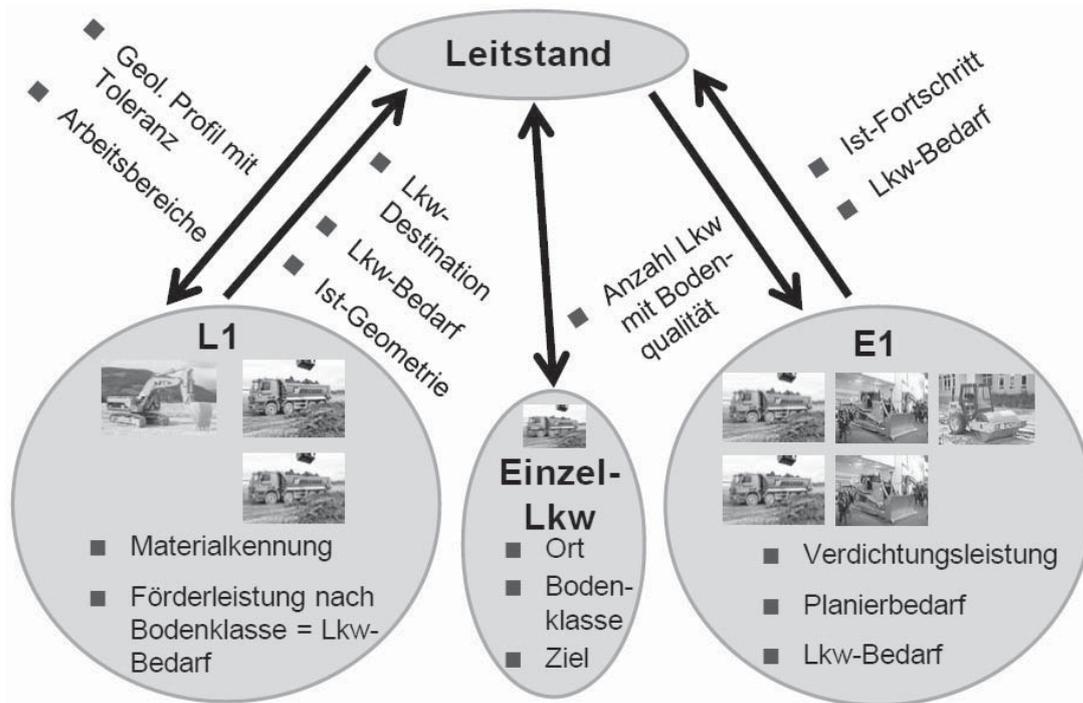


Abb. 2.9 Beispiel einer Kommunikationsstruktur

XMP-basierte Schnittstellen werden die Daten an das Multiagenten-basierte Steuerungssystem des Partners FZID übergeben. Die während der Ausführung erzeugten Leistungsdaten wurden dazu verwendet, das Bauprozessmodell anzupassen. Dies stellte wiederum die Basis für nachgelagerte Baufortschrittssimulationen. So wurde der Zyklus Planung – Steuerung – Änderung – Überarbeitung Planung – Neue Steuerung umgesetzt (s. Kapitel 8). Der Leitstand verfügt über Möglichkeiten, die autonom gesteuerten Bauprozesse im Rahmen einer virtuellen Realität darzustellen und ermöglicht so die Überwachung der von den Maschinen selbst ausgeführten koordinativen Tätigkeiten.

2.5 Fazit

Die frühe Ausrichtung des Projektes AutoBauLog auf wirtschaftlich sinnvolle und verwertbare Autonomisierungs- und Automatisierungsbestrebungen ermöglichte eine schnelle Fokussierung auf relevante Teilprozesse des Tiefbaus. Die Anwendungsszenarien aus der Anforderungsanalyse wurden über die Projektlaufzeit hinweg detailliert und verfeinert und konnten so in die Definition des Evaluations szenarios im Feld überführt werden.

Der allgemeinen Anforderungsanalyse folgten weitere, spezialisiertere Anforderungsanalysen. Exemplarisch ist in diesem Buch die Anforderungsanalyse bezüglich des Virtual Reality-Leitstands in Kapitel 6 aufgeführt.



2.6 Literaturverzeichnis

- [1] G. Kühn, *Der maschinelle Erdbau*. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1984.
- [2] H. Bauer, *Baubetrieb*, 3., neubea. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [3] F. Berner, B. Kochendörfer und R. Schach, *Grundlagen der Baubetriebslehre I*. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2007.
- [4] C. Hofstadler, *Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb*. Springer-Verlag, 2007, S. 490.
- [5] T. Hasenclever, T. Horenburg, G. Höppner, C. Klaubert, M. Krupp, K. H. Popp, O. Schneider, W. Schürkmann, S. Uhl und J. Weidner, »Logistikmanagement in der Bauwirtschaft«, *Digitale Baustelle-innovativer Planen, effizienter Ausführen*, S. 205–290, 2011.
- [6] G. Girmscheid, *Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse*. Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [7] A. H. Al-Momani, »Construction delay: a quantitative analysis«, *International Journal of Project Management*, Bd. 18, S. 51–59, 2000.
- [8] S. A. Assaf und S. Al-Hejji, »Causes of delay in large construction projects«, *International Journal of Project Management*, Bd. 24, Nr. 4, S. 349–357, 2006.
- [9] Günthner WA, Kessler S, Frenz T und Wimmer J, »Transportlogistikplanung im Erdbau«, Technische Universität München, München, Techn. Ber., 2010.
- [10] F. Gehbauer, *Stochastische Einflussgrößen für Transportsimulationen im Erdbau*, Ser. Veröffentlichungen des Instituts für Maschinenwesen im Baubetrieb der Universität Karlsruhe (TH) / F. Karlsruhe: IMB Reihe F. Heft 10, 1974.
- [11] J. Fente, C. Schexnayder und K. Knutson, »Defining a probability distribution function for construction simulation«, *Journal of construction engineering and management*, Bd. 126, Nr. 3, S. 234–241, 2000.
- [12] C. Maio, C. Schexnayder, K. Knutson und S. Weber, »Probability distribution functions for construction simulation«, *Journal of Construction Engineering and Management*, Bd. 126, Nr. 4, S. 285–292, 2000.
- [13] C. Schexnayder, K. Knutson und J. Fente, »Describing a beta probability distribution function for construction simulation«, *Journal of construction engineering and management*, Bd. 131, Nr. 2, S. 221–229, 2005.
- [14] A. Deml, *Entwicklung und Gestaltung der Baulogistik im Tiefbau - Dargestellt am Beispiel des Pipelinebaus*. Verlag Dr. Kovac, 2008.
- [15] E. J. Jaselskis, H. C. Han, J. Grigas, L. Tan und D. Fahrion, »Status of roller mountable microwave asphalt pavement density sensor«, *Journal of construction engineering and management*, Bd. 127, S. 46, 2001.
- [16] R. Navon und Y. Shpatnitsky, »A model for automated monitoring of road construction«, *Construction Management and Economics*, Bd. 23, Nr. 9, S. 941–951, Nov. 2005.
- [17] F. Peyret, J. Jurasz, A. Carrel, E. Zekri und B. Gorham, »The computer integrated road construction project«, *Automation in Construction*, Bd. 9, Nr. 5, S. 447–461, 2000.



- [18] R. V. Rinehart und M. A. Mooney, »Instrumentation of a roller compactor to monitor vibration behavior during earthwork compaction«, *Automation in Construction*, Bd. 17, Nr. 2, S. 144–150, 2008.
- [19] S. Sanladerer, *EDV-gestützte Disposition mit Telematikeinsatz und mobiler Datenerfassung in der Baulegistik*. 2008.
- [20] S.-w. Leung, S. Mak und B. L. P. Lee, »Using a real-time integrated communication system to monitor the progress and quality of construction works«, *Automation in Construction*, Bd. 17, Nr. 6, S. 749–757, 2008.
- [21] F. Peyret, »A new facility for testing accurate positioning systems for road construction robotics«, *Automation in construction*, Bd. 8, Nr. 2, S. 209–221, 1998.
- [22] M. Lu, W. Chen, X. Shen, H.-C. Lam und J. Liu, »Positioning and tracking construction vehicles in highly dense urban areas and building construction sites«, *Automation in Construction*, Bd. 16, Nr. 5, S. 647–656, 2007.
- [23] R. Navon, »Research in automated measurement of project performance indicators«, *Automation in Construction*, Bd. 16, Nr. 2, S. 176–188, 2007.
- [24] K. Kontogiannis, G. A. Lewis und D. B. Smith, »A research agenda for service-oriented architecture«, in *Proceedings of the 2nd international workshop on Systems development in SOA environments*, Ser. SDSOA '08, New York, NY, USA: ACM, 2008, S. 1–6.
- [25] E. J. Jaselskis und T. El-Misalami, »Implementing radio frequency identification in the construction process«, *Journal of Construction Engineering and Management*, Bd. 129, Nr. 6, S. 680–688, 2003.
- [26] M. Helmus, A. Meins-Becker, L. Laußat und A. Kelm, *RFID in der Baulegistik: Forschungsbericht zum Projekt Integriertes Wertschöpfungsmodell mit RFID in der Bau- und Immobilienwirtschaft*. Vieweg+ Teubner, 2009.