

Dissertation

# Digital Datamanagement of Grouting

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of

Dr. techn.

of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

Dissertation

# Digitales Datenmanagement für Injektionsarbeiten

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Doktors der technischen Wissenschaften,

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Dipl.-Ing. Leopold Winkler**

Matr.Nr.: 00826479

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

**Gerald Goger**

Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement  
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/234-1, A-1040 Wien

begutachtet von

Em.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Bergrat h.c.

**Gert Stadler**

Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft  
Technische Universität Graz  
Lessingstraße 25/II, A-8010 Graz

Prof. Dr.-Ing.

**Hans Christian Jünger**

Institut für Baubetriebslehre  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 7, D-70569 Stuttgart

Wien, im Februar 2020

---



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

*„Success is not final, failure is not fatal: it is the courage to continue that counts.“*

Winston S. Churchill



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kurzfassung

An die Dokumentation von Spezialtiefbauarbeiten werden, durch das im Untergrund verborgene Bauwerk, besonders hohe Anforderungen gestellt. Mit der fortschreitenden Digitalisierung, sowie den einhergehenden Datenmengen, steigt der Bedarf an digitalen Datenmanagementsystemen. Diese nehmen bei Organisations- und Dokumentationsprozessen auf der Baustelle eine zunehmend entscheidende Rolle ein. Sie schließen die Datenkette zwischen den Ausführungsprozessen und Building-Information-Modeling sowie Enterprise-Resource-Planning Systemen. Ziel dieser Arbeit ist es, die standardisierten und projektspezifischen Anforderungen am Beispiel von Injektionsarbeiten zu ermitteln und darauf aufbauend ein Datenmanagementsystem zu modellieren und zu entwickeln.

Etablierte Systeme bauen auf Tabellenkalkulationsprogrammen oder proprietären Programmen auf. Digitales Datenmanagement hingegen zeichnet sich durch direkte Schnittstellen, beginnend von den Sensordaten bis hin zur Abrechnung und Archivierung aus. Der Datenfluss ist durch standortunabhängige Kommunikationselemente charakterisiert. Neueste Forschungen in der Injektionstechnik gehen jedoch nicht auf die Gesamtanforderungen für diese Systeme ein. Eine Umfrage zu digitalen Datenmanagementsystemen wurde durchgeführt, deren Ergebnisse sich in Leitfragen widerspiegeln, die als Grundlage für 22 Experteninterviews dienten. Daraus ergaben sich die standardisierten Anforderungen unter Einbeziehung internationaler Normen und Fachliteratur.

Aufbauend auf den identifizierten Gesamtanforderungen wurde ein fünfstufiges Modell im Zuge der Forschungskooperation mit dem Unternehmen eguana in eine cloud-basierte Webplattform SCALES integriert. Der Einsatz des digitalen Datenmonitoring bringt Verbesserungen im Vergleich mit den tradierten Prozessen. Feldstudien zeigen die Funktionen der interaktiven Visualisierung, automatisierten Abrechnung, datenbasierten Bauzeitprognose und zentralen Kommunikation zwischen Bauaufsicht und Bauleitung. Dokumentationsprozesse können bis zu 70 % reduziert werden.

Die Methodik und Forschungsergebnisse bilden ein Novum in der Diskussion digitaler Prozesse für die Ausführungsphase und können für die zukünftige Entwicklung anderer digitaler Datenmanagementsysteme herangezogen werden.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Abstract

Due to the hidden work below ground, the documentation of underground civil engineering works is subject to high demands in order to make the invisible traceable. With advancing digitization, and the ever increasing amounts of data produced, there is a growing demand for digital data management systems. These are playing an increasingly important role in organizational and documentation processes at construction sites. They connect the data chain between execution processes, building information modeling and enterprise resource planning systems.

The aim of this work is to determine the standardized and project-specific requirements using the construction method grouting as a case study to model and develop a new data management system.

Established systems are built upon spreadsheets or proprietary programs. In contrast, digital data management is characterized by direct interfaces from the sensors to the billing and archiving. This data flow is characterized by location-independent communication elements. The latest developments in grouting works, however, do not address the overall requirements for these systems. A survey was conducted on digital data management systems. The results of this survey served as the basis for developing questions used in 22 expert interviews. This resulted in developing standardized requirements in line with international standards and technical literature. Based on the identified requirements, a five-step model was integrated into a cloud-based web platform, SCALES, as part of the research cooperation with the company eguana. The use of this digital data-monitoring program improves documentation in comparison to traditional processes.

Field studies show the functionality of interactive visualization, automated billing, databased construction time forecasting and central communication between construction supervision and site management. When using this program, documentation processes can be reduced by up to 70 %.

The methodology and research results are an innovation in the discussion of digital processes for the execution phase and can be used for the future development of other digital data management systems.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>13</b>
1.1 Motivation . . . . .	13
1.2 Forschungsfelder . . . . .	14
1.3 Forschungsmethoden . . . . .	15
1.3.1 Forschungsmethoden im Überblick . . . . .	15
1.3.2 Angewendete Forschungswerkzeuge . . . . .	16
1.4 Forschungsumfang . . . . .	17
1.5 Forschungsfragen . . . . .	17
<b>2 Digitalisierung im Baubetrieb und in der Bauwirtschaft</b>	<b>19</b>
2.1 Begriffsdefinition . . . . .	19
2.2 Literaturstudie zur Digitalisierung in der Bauwirtschaft . . . . .	21
2.2.1 Probleme der Bauwirtschaft . . . . .	21
2.2.2 Besonderheiten der Bauwirtschaft . . . . .	22
2.2.3 Chancen und Herausforderungen der Digitalisierung . . . . .	23
2.3 Umfrage „Digitale Datenmanagementsysteme“ . . . . .	26
2.3.1 Haltung der Entscheidungsträger . . . . .	28
2.3.2 Erwarteter Nutzen . . . . .	29
2.3.3 Eigenschaften von digitalen Systemen . . . . .	29
2.4 Automatisierungspotentiale . . . . .	31
<b>3 Bauverfahrenstechnik</b>	<b>35</b>
3.1 Der iterative Planungs- und Ausführungsprozess . . . . .	35
3.2 Grundsätzliche Injektionsprinzipien . . . . .	38
3.3 Bohrtechnik . . . . .	41
3.3.1 Drehbohrungen / Rotarybohrungen . . . . .	42
3.3.2 Hammerbohrungen / Drehschlagbohrungen . . . . .	42
3.3.3 Doppelkopfbohrungen . . . . .	43
3.4 Injektionstechnik . . . . .	44
3.4.1 Manschettenrohrinjektion . . . . .	44
3.4.2 Lanzeninjektion . . . . .	46



3.4.3	Injektionen über das Bohrrohr . . . . .	46
3.4.4	Injektion im unverrohrten Bohrloch . . . . .	47
3.4.5	Mehrfachpacker-Manschettenrohrinjektion . . . . .	47
3.5	Leistungswerte für Bohr- und Injektionstechnik . . . . .	48
3.6	Komponenten in der Injektionstechnik . . . . .	50
3.6.1	Bohrgeräte . . . . .	50
3.6.2	Mischanlagen . . . . .	52
3.6.3	Injektionspumpen . . . . .	53
3.6.4	Packer . . . . .	53
3.6.5	Sensortechnik . . . . .	54
3.6.6	Injektionsmittel . . . . .	57
3.7	Qualitätssicherung von Injektionsmitteln . . . . .	59
3.8	Abbruchkriterien . . . . .	61
3.8.1	Abbruchkriterien im Lockergestein . . . . .	62
3.8.2	Abbruchkriterien im Festgestein . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Datenmanagement</b>	<b>67</b>
4.1	Daten – Information . . . . .	67
4.1.1	Daten . . . . .	68
4.1.2	Datenqualität . . . . .	69
4.2	Datenmonitoring in der Injektionstechnik . . . . .	70
4.2.1	Geschichtliche Entwicklung . . . . .	70
4.2.2	Einteilung nach Technologie . . . . .	72
4.2.3	Einteilung nach Schnittstellen . . . . .	75
4.3	Produktanalyse in der Injektionstechnik . . . . .	77
4.3.1	Datenerfassungen in der Bohrtechnik . . . . .	77
4.3.2	Steuerungen und Datenerfassungen in der Injektionstechnik . . . . .	80
4.3.3	Bestehende Analysesysteme . . . . .	86
4.4	Datenmanagement mit Tabellenkalkulationsprogrammen . . . . .	90
4.5	Datenmanagement bei anderen Bauverfahren . . . . .	92
<b>5</b>	<b>Status quo</b>	<b>97</b>
5.1	Prozessmodell . . . . .	98
5.1.1	Grundlagen der Modellierung . . . . .	98
5.1.2	Prozesslandkarten . . . . .	102
5.1.3	Prozessdiagramme . . . . .	103
5.2	Prozessbeschreibung . . . . .	113
5.2.1	Messung . . . . .	113
5.2.2	Steuerung . . . . .	114
5.2.3	Speicherung und Aufbereitung . . . . .	115
5.2.4	Analyse und Visualisierung . . . . .	116
5.2.5	Vernetzung . . . . .	118

5.3	Tradiertes Dokumentationsprozess . . . . .	119
<b>6</b>	<b>Anforderungsprofile</b>	<b>125</b>
6.1	Grundlagen . . . . .	125
6.1.1	Systembegriff . . . . .	125
6.1.2	Anforderungstypen . . . . .	126
6.1.3	Anforderungsquellen . . . . .	128
6.1.4	Methode und Techniken der Anforderungsermittlung . . . . .	129
6.2	Standardisierte Anforderungen . . . . .	129
6.2.1	Qualität . . . . .	129
6.2.2	Recht . . . . .	132
6.2.3	Ausführung . . . . .	139
6.2.4	Mensch-System Interaktion . . . . .	145
6.3	Projektspezifische Anforderungen . . . . .	149
6.3.1	Prozessbegehung und Leitfragen . . . . .	149
6.3.2	Anforderungen des Bauherren . . . . .	151
6.3.3	Anforderungen der Planung und Bauaufsicht . . . . .	154
6.3.4	Anforderungen der Entwicklung . . . . .	157
6.3.5	Anforderungen der Bauunternehmen . . . . .	159
6.4	Selektion der Gesamtanforderungen . . . . .	163
6.4.1	Funktionale Anforderungen . . . . .	164
6.4.2	Nicht-funktionale Anforderungen . . . . .	171
<b>7</b>	<b>Modellbildung</b>	<b>177</b>
7.1	Baudatenmanagement in der digitalen Datenkette . . . . .	177
7.2	Digitales Prozessmodell . . . . .	181
7.2.1	Die fünf Stufen der digitalen Baudokumentation . . . . .	182
7.2.2	Qualitätsmanagement . . . . .	193
7.2.3	Visualisierung . . . . .	196
7.3	eguna SCALES . . . . .	197
7.3.1	Das Forschungsprojekt . . . . .	197
7.3.2	Aufbau . . . . .	200
7.3.3	Funktionen . . . . .	204
<b>8</b>	<b>Feldstudien</b>	<b>225</b>
8.1	Abdichtungsinjektionen beim konventionellen Tunnelvortrieb . . . . .	225
8.1.1	Visualisierung . . . . .	226
8.1.2	Automatisiertes Aufmaß . . . . .	228
8.1.3	Zeitersparnis . . . . .	230
8.1.4	Bauzeitprognose . . . . .	236
8.2	Weichgelsohle . . . . .	247
8.2.1	Tägliche Dokumentation . . . . .	247
8.2.2	Kommunikation Bauaufsicht - Bauleitung . . . . .	247

---

<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>251</b>
9.1 Beantwortung der Forschungsfragen . . . . .	253
9.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf . . . . .	256
<b>Literatur</b>	<b>259</b>
<b>Verzeichnisse</b>	<b>273</b>
<b>Anhang</b>	<b>281</b>
A Prozessbegehung und Leitfragen . . . . .	281
B Tradierte Handzettel und Protokolle . . . . .	289
C Digitale Berichte . . . . .	297
D Prüfanweisungen Injektion . . . . .	303
E Vergleichsrechnung für die Feldstudie . . . . .	305
<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>307</b>
<b>Danksagung</b>	<b>309</b>



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kapitel 1

## Einleitung

In diesem Kapitel werden die Motive der Arbeit dargestellt und Forschungsfelder präsentiert. Durch die allgemeine Diskussion der Methoden und die Abgrenzung des Umfangs ergeben sich die bearbeiteten Forschungsfragen.

### 1.1 Motivation

Die Baubranche, insbesondere der Tiefbau, steht bei der Entwicklung digitaler Lösungen für Planung, Ausführung und Betrieb am Beginn einer neuen Entwicklung. In der Branche und dafür konzipierten Organisationen, wie IG Lebenszyklus, Plattform 4.0 in Österreich oder beispielsweise planen-bauen 4.0, in Deutschland, werden Arbeitsformen mit digitalen Informationsmodellen diskutiert. Die erprobten Lösungen generieren sich dabei vermehrt aus der Projektphase Planung.

Die Motivation dieser Arbeit ist dadurch begründet, eine Methodik und Lösung des Datenmanagements anhand von ausgewählten Bauverfahren in der Injektionstechnik auszuarbeiten, um baustellen- und bauphasenübergreifende Informationsmodelle mit Daten versorgen zu können. Ansätze und Lösungen generieren sich demnach aus der Ausführungsphase mit Fokus auf Praxisrelevanz und Entwicklungsfähigkeit neuer Arbeitsweisen. Digitale Bauprozesse werden als „digitale Baustellenprozesse“ verstanden. Die entstehenden Anforderungsprofile für die Entwicklung, die optimierte Modellbildung und die Quantifizierung einzelner erprobter Module daraus geben den Input für weitere Entwicklungen in diesem Feld.

Die Erwartungshaltung des digitalen Datenmanagements ist es, die Datenkette zwischen den Ausführungsprozessen auf der Baustelle und den Systemen aus der Planung und Unternehmensführung zu schließen. Baudatenmanagement interagieren demnach mit unterschiedlichen Interessensvertretern. Der erhoffte Mehrwert gegenüber dem Status quo liegt in der Standardisierung von Workflows für Dokumentationsprozesse, beginnend von der Entstehung der Daten

bis hin zur baubetrieblichen Analyse und Abrechnung, der Administrationserleichterung und einer bauteilorientierten Archivierung und Visualisierung der Daten. Diese Potentiale am Beispiel der Injektionstechnik zu erheben, auszunützen und zu quantifizieren und eine Methodik zu entwickeln, die für andere Bauverfahren angewendet werden kann, ist Motivation für diese Forschungsarbeit.

## 1.2 Forschungsfelder

Folgende drei Forschungsfelder beschreiben die drei großen Cluster, in denen im Rahmen dieser Arbeit geforscht wird. Die einzelnen Felder sind interdisziplinär miteinander verschränkt, werden jedoch zur besseren Übersichtlichkeit in Kurzform dargestellt und in Kapitel 4 bis Kapitel 8 ausgeführt und weiter bearbeitet.

### **Forschungsfeld 1: Weiterentwicklung der tradierten Bauprozessabwicklung bei Bohr- und Injektionsarbeiten**

Dieses Forschungsfeld beschäftigt sich mit der Umsetzungsrelevanz von Soft- und Hardwaretechnik im Kontext der Industrie 4.0. In den vier verschränkten Feldern Überwachung, Steuerung, Optimierung und Autonomie werden Fragen der Weiterentwicklungsmöglichkeiten und der praktischen Umsetzbarkeit der Teilbereiche Datenbankverknüpfung von Herstell- und Arbeitsparameter, Bauprozesszeitmanagement, Qualitätsmanagement, Materialmanagement, Protokollwesen und automatisierte Aufmaßerstellung erforscht. Auf Grundlage von international geltenden Entwicklungsstufen, einer Produktanalyse, sowie der Erfassung der relevanten Dokumentationsprozesse, können die möglichen Weiterentwicklungen diskutiert werden.

### **Forschungsfeld 2: Modellbildung einer idealisierten Datenstruktur**

Aufbauend auf die Weiterentwicklungspotentiale müssen die Anforderungen der Beteiligten am Bau an ein idealisiertes, digitales und globales Projektmanagementtool für die Bauverfahren Bohren und Injizieren identifiziert werden. Dabei wird der Fokus einerseits auf das Potential einer Administrationserleichterung gelegt, andererseits darauf, wie solche Modelle neue Informationen generieren können. Der Erkenntnisgewinn beruht dabei auf den Zielen der vertragsorientierten Qualitätserfüllung, der technischen Effizienzkritik, sowie Ertragswahrheit und der Administrationserleichterung.

### **Forschungsfeld 3: Quantifizierung von Gebrauchstauglichkeit und Effizienzsteigerung einzelner Module**

In diesem Forschungsfeld werden Module aus dem Forschungsfeld 2, die bereits in Pilotprojekten umfassend getestet und angewendet werden auf deren baupraktische Umsetzung evaluiert. Dabei sind unmittelbare und mittelbare Veränderungen im Fokus der Untersuchung. Die Veränderung der Zeitanteile für unproduktives Personal auf der Baustelle durch Einführung einer modularen Software wird in die Fragestellungen miteinbezogen. Das Forschungsfeld 3 umfasst die Implementierung eines Stufenplans in die Webapplication eguana SCALES.

## **1.3 Forschungsmethoden**

Baubetriebliche Forschung ist naturgemäß eng mit dem Forschungslabor „Baustelle“ verbunden. Die Darstellung der Forschungsmethoden im Überblick und die darauf aufbauenden Werkzeuge zur Bearbeitung der Fragestellungen sind in diesem Kapitel angeführt.

### **1.3.1 Forschungsmethoden im Überblick**

Ziel dieser Dissertation ist es, neues Wissen über das Zusammenwirken von Bauprozessen zu erlangen und dieses anhand baupraktischer Werkzeuge und Strategien in die Praxis überzuführen. Dazu bedient sich diese Arbeit mehrerer Forschungsmethoden, weshalb angewendete wissenstheoretische Ansätze erläutert und auf den praktizierten Fall dieser Arbeit umgelegt werden. Eine Grundlage ist die nachvollziehbare Symptomatik für zuordenbares Wissen. Da die Modellbildung auf dem Ist-Stand der heute gängigen Techniken auf der Baustelle referenziert, muss Alltagswissen des Baustellenpersonals fassbar gemacht werden. Man spricht in diesem Kontext von „weichen“, realitätsnahen Daten [41]. Die Erfahrung von langjährigem Stammpersonal muss somit mittels qualitativer Forschungsmethoden aufgenommen werden. Diese Forschungsmethoden zeichnen sich durch das Verstehen und Erklären von Perspektiven aus und haben zum Ziel daraus neue Theorien und Modelle zu entwickeln.

Quantitative Forschungsmethoden kehren im Zusammenhang „harter“ replizierbarer Daten wieder. Der Forschungsprozess folgt demnach – im Vergleich zur qualitativen Forschung – einem festen Muster. Als Beispiel wäre ein Materialversuch unter Normalbedingungen zu nennen, der einem statischen, festgelegten Prüfablauf folgt und messbare Ergebnisse zur Folge hat. Im Kern dieser Methode liegt es, die gemessenen Ergebnisse zu vergleichen und statistisch auszuwerten. Der Unterschied von qualitativer und quantitativer Befragung beispielsweise liegt in der Charakteristik der Befragung und der hoher Stichprobenanzahl. Bei quantitativer Befragung steht der hohe Standardisierungsgrad, der überwiegend durch geschlossene Fragen

erreicht wird, im Mittelpunkt. Qualitative Befragungen hingegen geben die Möglichkeit sehr individueller Antworten und besitzen daher einen abduktiven Charakter. Die Stichprobenanzahl ist im Vergleich zur quantitativen Befragung klein. Das Aufstellen von Hypothesen und neuer Wissensgewinn stehen im Mittelpunkt [67]. Für das Forschungsfeld 2 wird größtenteils auf qualitative Forschungsmethoden zurückgegriffen. Eine scharfe Abgrenzung ist nicht möglich, wodurch man in den meisten Fällen von Triangulation sprechen kann [2].

In der ingenieurwissenschaftlichen Forschung, insbesondere in der Produktentwicklung und Informationstechnologie, haben sich daraus die Forschungsarten explorativ, theoretisch, experimentell und angewandt entwickelt [7, S.19–21]. Insbesondere die angewandte Forschung mit der Frage, wie Technologie eingesetzt werden kann um gezielte Ausprägungen zu verbessern, ist im Zusammenhang mit Forschungsfeld 3 zu setzen. Als Ergebnis angewandter Forschung steht die Beschreibung wichtiger, praktischer Probleme, verallgemeinerbare Lösungen, Machbarkeits- und Fallstudien und der daraus induktive Schluss der Nützlichkeit. Die empirische Forschung lässt diese Forschungsmethode zu, nicht zuletzt durch den kritischen Empirismus, der Falsifizierbarkeit logischer Aussagen zulässt [127]. Beispielhaft sei in diesem Zusammenhang die Analyse des Bauverfahrens Bohren- und Injizieren genannt und die Verallgemeinerung der Nützlichkeit auf andere Spezialtiefbauarbeiten.

### 1.3.2 Angewendete Forschungswerkzeuge

Die angewendeten Forschungswerkzeuge implementieren in ihrer dargestellten Chronologie die zeitliche Bearbeitung der Forschungsfelder.

- Anforderungsprofile durch qualitative Expertenbefragung mittels einheitlichen Frageleitfadens und anschließender qualitativer Bewertung
- Darstellung der tradierten Dokumentationsprozesse auf der Baustelle und Verknüpfung mit der Prozesslandschaft eines Bauprojekts mit Hilfe von Business Process Model Notation in der Version 2.0 (BPMN 2.0)
- Modellbildung des idealen Datenflusses durch qualitative Inhalts- und Produktanalyse, Beobachtungen und Diskussionen einzelner Fachgruppen sowie Mitarbeit bei einem Entwicklungsteam
- Quantifizierung des Digitalisierungspotentials durch vergleichende Analyse der Dokumentationsprozesse
- Gebrauchstauglichkeitstests der darauf basierenden modularen Software eguana SCALLES
- Fallstudien anhand umgesetzter Bauprojekte (Abdichtungsinjektionen im Fels, Weichgelsohle)



## 1.4 Forschungsumfang

Die Digitalisierungsszenarien werden in allen Bereichen des Bauens diskutiert. Die gegenständlichen Forschungsfragen richten sich gezielt nach dem Bauverfahren Injizieren und den damit vor- und nachgelagerten Prozessen dieser Bautätigkeit. Nach Einteilung der ÖNORM 1801-1 kommen daher die vorgestellten Forschungsfelder in der Optimierung der Ausführungsphase und den daran angrenzenden Entwurfs- und Abschlussphasen zu liegen [113]. Die vorgestellten Bauverfahren sind gepaart mit Planungsläufen die durch starke Rückkopplungseffekte während der Ausführung geprägt sind. Pläne, Herstell- und Qualitätsdaten auf der Baustelle sind die Grundlage für Planung, Leistungserstellung und Abrechnung während der Bauausführung. Im Projektmanagement sind dadurch die Projektleitung, Projektsteuerung, die örtliche Bauaufsicht (ÖBA), der Geologe<sup>1</sup>, der geotechnischer Planer und das ausführende Unternehmen im Fokus der umsetzungsrelevanten Thematik.

## 1.5 Forschungsfragen

Die beschriebenen Forschungsfelder im Abschnitt 1.2 und 1.3 lassen sich, abgegrenzt vom Abschnitt 1.4, in drei Forschungsfragen zusammenfassen.

- Forschungsfrage 1** Welche Anforderungen werden an digitale Datenmanagementsysteme in der Injektionstechnik gestellt?
- Forschungsfrage 2** Wie ist ein digitales Datenmanagement für Injektionsarbeiten zu modellieren und zu entwickeln?
- Forschungsfrage 3** Welche Vorteile im Vergleich zum tradierten Prozess lassen sich durch den Einsatz digitaler Datenmanagementsysteme in der Injektionstechnik ableiten?

Forschungsfrage 1 wird durch eine umfassende Analyse der Produkte und Entwicklungsstufen des Datenmanagements in der Injektionstechnik in Kapitel 4 begonnen. Die Modelle des tradierten Dokumentationsprozesses in Kapitel 5, sowie die durch Expertengespräche und Mitarbeit bei der Entwicklung im Forschungsprojekt „digitales Baustellenmonitoring im Tiefbau“ erstellten Anforderungsprofile in Kapitel 6 beantworten diese Fragestellung. Die Forschungsfrage 2 zur Modellbildung des Datenmanagementsystems wird durch den allgemeinen 5-Stufen-Verlauf beantwortet und anhand des Entwicklungsstandes der Webplattform

---

<sup>1</sup>Der Autor legt großen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wurde auf eine geschlechtsneutrale Formulierung Wert gelegt. Sofern dies nicht dem bautechnischen Sprachgebrauch entspricht, wurde entweder die maskuline oder feminine Form gewählt. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des jeweils anderen Geschlechts.

eguana SCALES im Kapitel 7 weiter ausgeführt. Unterschiedliche Anwendungsfälle, die in den Feldstudien auf der Baustelle aufgenommen wurden, wird die dritte Forschungsfrage beantwortet. Durch ein Rechenmodell zu Quantifizierung der Zeitersparnis und einen Implementierungsvorschlag für eine Echtzeit-Bauzeitprognose, wird weiterer Entwicklungs- und Forschungsbedarf vorgestellt.

# Kapitel 2

## Digitalisierung im Baubetrieb und in der Bauwirtschaft

Durch Digitalisierung erhofft sich die Baubranche die stagnierende Produktivität in ihrem Sektor zu erhöhen. In der Diskussion wurde Building-Information-Modelling (BIM) in den vergangenen Jahren als zentrales Entwicklungsthema forciert. Die in diesem Kapitel präsentierte Literaturstudie zeigen jedoch, dass ohne die intensive Anwendung von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) auf den Baustellen die digitalen Baustellenmodelle nur mit einem hohen Aufwand aktuell gehalten werden können. Zu Beginn dieses Kapitels werden Begriffe mit zentraler Bedeutung in dieser Arbeit definiert. Aufbauend auf diese, werden durch den Autor durchgeführte und ausgewertete Umfragen und eine Inhaltsanalyse zum Thema Digitalisierung präsentiert. Diese bilden die Grundlage und Motivation für die Modelle und Entwicklung digitaler Datenmanagementsysteme in der Injektionstechnik.

### 2.1 Begriffsdefinition

Die globalen Begriffsdefinitionen werden in alphabetischer Reihenfolge angeführt. Spezifische Begriffe, die nur in Teilbereichen der Arbeit verwendet werden, finden Erörterung bei der ersten Erscheinung im Fließtext.

**Abbruchkriterien** In der Injektionsplanung werden die Kriterien definiert, unter denen die Steuerung automatisch oder der Pumpenfahrer manuell die Injektion beendet. Diese Abbruchkriterien setzen sich aus mess- und berechenbaren sowie visuellen Parametern zusammen.

**Anforderungsmanagement** Der Begriff wird bei der ingenieurmäßigen Erstellung von softwaregestützten Systemen verwendet und gewährleistet eine systematische Vorgehensweise

bei deren Entwicklung [124]. Das Anforderungsmanagement gliedert sich in die vier Tätigkeiten Ermittlung, Dokumentation, Abstimmung und Verwaltung [57].

**Automatisierung** Das bedeutet, dass eine Einrichtung so ausgerüstet wird, dass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet. Als Synonym zu automatisch nennt die Norm [74] das Adjektiv selbsttätig. Der Automatisierungsgrad gibt den Anteil der selbsttätigen Funktionen aus der Gesamtheit eines Systems mit definierten Grenzen an. Automatisierung ist prinzipiell unabhängig von Digitalisierung [72]. Für die Automatisierung von komplexen Prozessen werden jedoch zunehmend Digitaltechniken verwendet, weshalb die Begriffe oftmals gleichzeitig genannt werden.

**Datenmanagement** Darunter wird die Gesamtheit der notwendigen Tätigkeiten verstanden, die im Zusammenhang mit Daten, von der Entstehung über den Nutzen bis hin zu ihrer Ablage, notwendig sind. Bei der Verwendung von digitalen Daten sind Themen der Verfügbarkeit, der Dateiformate, Datenbanken und Datensicherheit umfasst [17].

**Digitalisierung** Dieser Begriff bedeutet im technischen Sinn die Transformation eines analogen in eine digitalen Wert. Digitale Daten bestehen aus diskreten Werten und sind nicht wie analoge Daten zeit- und wertekontinuierlich [17]. Informations- und Kommunikationstechniken, die als digitale Systeme bezeichnet werden, bauen auf die Digitaltechnik auf. Im heutigen Sprachgebrauch wird unter Digitalisierung die Transformation ganzer Prozesse und die damit einhergehende Veränderung durch den Einsatz von digitalen Systemen verstanden [72].

**Monitoring** Durch Monitoring gelingt es, einen Zustand eines Prozesses oder einer Tätigkeit zu beaufsichtigen und zu prüfen. Im Zusammenhang mit Prozessen werden die Begriffe Kontrolle oder Überwachung als Synonym verwendet [28]. Bei Monitoring mit Webplattformen im Internet wird ein Vorgang mit Hilfe von speziellen Messungen in Echtzeit oder mit zeitnaher Übertragung beobachtet und/oder für definierte Zeiträume aufgezeichnet und verfügbar gehalten.

**Prozess** Ein Prozess wird allgemein als Satz zusammenhängender oder sich gegenseitig beeinflussender Tätigkeiten verstanden. Zum Erzielen eines vorgesehenen Ergebnisses werden Eingaben benötigt [28]. Ausführungsprozesse sind Bauarbeiten, die zum Entstehen eines Bauwerkes führen. Dokumentationsprozesse sind Tätigkeiten die notwendig sind, um Arbeiten im Ausmaß und Qualität nachzuweisen. Prozesse zeichnen sich durch die Zuteilung der Beteiligten und die verbrauchten Ressourcen aus. In Organisationsformen werden Pro-

zessmodelle verwendet, um standardisierte Prozesse festzuhalten. Dazu werden grafische Spezifikationsprachen, sogenannte Notationen, verwendet.

**Wissensmanagement** Mit der Hilfe von unterschiedlichen Techniken der Wissenspräsentation versucht man in dieser Disziplin, vorhandenes Wissen zu speichern und für andere Fälle wiederverwertbar zu machen. Wissen unterscheidet sich von reinen Informationen durch die Verknüpfung mit Vorwissen. Insbesondere in großen Unternehmen mit Aufbauorganisation finden sich Wissensmanagementsysteme, die den Wissensaustausch abteilungsübergreifend fördern.

**Herstellungsdaten** Baugeräte, insbesondere im Spezialtiefbau, messen während eines Herstellungsprozesses unterschiedlichste Parameter und speichern deren zeitliche Veränderung. Beispielsweise werden unter Herstellungsdaten Druckverläufe, Ratenänderungen von Durchflüssen oder Drehzahlveränderungen von Baugeräten während des Arbeitsprozesses verstanden.

## 2.2 Literaturstudie zur Digitalisierung in der Bauwirtschaft

Im Fachartikel Die Digitalisierung als eine Maßnahme zur Lösung der Probleme in der Bauwirtschaft werden Herausforderungen und Chancen der Digitalisierung gegenübergestellt [73]. Durch die Inhaltsanalyse von 66 Studien zum Thema Produktivität, betriebswirtschaftliche Aspekte, Innovationen und Megatrend in der Bauwirtschaft wird die Motivation zu Lösung der Probleme definiert.

### 2.2.1 Probleme der Bauwirtschaft

Die Aussicht nach Steigerung der Produktivität ist einer der treibenden Faktoren um die Bauwirtschaft in Maßnahmen zur steigenden Digitalisierung investieren zu lassen. Diese Aussage lässt sich durch die Umfrage in Abschnitt 2.3 bestätigen. Der Begriff ist in der Baubranche als Verhältnis zwischen Input und Output definiert und wird als wesentliche Kennzahl einzelner Prozesse und Tätigkeiten herangezogen. Krammer gibt an, dass die Produktivität in der Bauindustrie in den vergangenen 50 Jahren absolut gesehen abgenommen hat [88]. Er gibt dazu folgende Gründe an:

- Die ausgeprägte Projektbezogenheit mit einem zahlreichen Wechsel von Projektbeteiligten und baubegleitender Planung
- Der hohe Informationsverlust durch die Vielzahl von Schnittstellen

- Die ineffiziente Speicherung der Daten in den Bauphasen
- Das siloartige, nicht verknüpfte Projekt-Know-how
- Die großteils analog gesammelten Daten.

Die Zusammenfassungen der teilweise kontroversen Studien können in [73, S.188] nachgelesen werden. Die verschiedenen Definitionen von Produktivität und unterschiedlich angewendeten Methodologien führen zu diversen Ergebnissen und Aussagen zu Produktivität. Die Konklusion, die sich aus den unterschiedlichen Studien ergibt, ist, dass im Vergleich zu anderen Industriezweigen, eine geringe Produktivität oder zumindest eine ungünstige Entwicklung zu erkennen ist.

Betriebswirtschaftliche Aspekte, wie die durch den starken Wettbewerb beeinflusste niedrige Umsatzrentabilität oder die hohe Insolvenzquote, sind Probleme, mit denen die Branche zu kämpfen hat. Kosten- und Terminunsicherheiten verstärken den schlechten Ruf der Bauwirtschaft. Laut einer Studie [42], die 258 Infrastrukturprojekte untersuchte, zeigt sich, dass 9 von 10 Bauprojekten mit Kostenüberschreitungen abgeschlossen werden und keine Besserung in den letzten Jahrzehnten zu beobachten ist.

Das Hauptaugenmerk der Bauwirtschaft liegt nicht in der Entwicklung eigener Produkte oder Innovationen, sondern an der Integration extern verfügbarer Technologien. Diese Aussage lässt sich durch den Vergleich der Forschungsausgaben der Bauindustrie in Forschung und Entwicklung stützen, die beispielsweise nur 1 % der Gesamtumsatz des Bausektors in Großbritannien ausmachen [36]. Das Weltwirtschaftsforum gibt an, dass der zeitliche Versatz zwischen Kosten und Nutzen im projektgetriebenen Wirtschaftszweig der Bauindustrie der Grund für das niedrige Investitionsvolumen in die Entwicklung ist. Diese Angabe deckt sich auch mit den Erfahrungen des Autors. Neue Technologien, die eine Abänderung eines Prozesses oder Produktes induzieren, lassen sich nicht nur durch die unmittelbaren Vorteile bei einem Projekt rechtfertigen. Insbesondere für Wissensmanagementsysteme die ihre Anwendung in der Ausführung finden, und somit in der Kalkulation und der Bauerfolgsrechnung begründet werden müssen, stellt dies ein Problem dar. Das Ausmaß der mittelbaren Potentiale ist um ein vielfaches höher einzuschätzen als unmittelbare Vorteile, die sofort sichtbar werden. Im Kapitel Kapitel 8 wird auf diesen Umstand im Detail eingegangen.

### 2.2.2 Besonderheiten der Bauwirtschaft

Bei der Entwicklung von digitalen Systemen müssen folgende Eigenheiten der Bauwirtschaft in Betracht gezogen werden. Diese lassen sich einerseits in einen kausalen Zusammenhang mit den erörterten Problemen bringen, andererseits müssen diese bei der Erarbeitung von Anforderungsprofilen für Entwicklungen in Betracht gezogen werden [73].

- Im Gegensatz zur produzierenden Industrie, bei der häufig eine große Anzahl von gleichen oder ähnlichen Produkten erzeugt wird, stellen Bauwerke in der Regel Einzelanfertigungen dar.
- Bedingt durch die Größe von Gebäuden, werden diese nicht an einem hochtechnisierten Produktionsstandort produziert, sondern an deren Bestimmungsort errichtet.
- Bauprozesse sind stark von äußeren Einflussfaktoren (z. B. Witterung, Planungsänderungen im Bauverlauf, Einflüsse des öffentlichen Interesses etc.) abhängig.
- Bauunternehmen sind oftmals stark projektbezogen organisiert.
- Häufig kommt es zu vorübergehenden oder kurzfristigen Geschäftsbeziehungen, was in direktem Zusammenhang mit dem vorherigen Punkt steht.
- Die arbeitsteilige Vorgehensweise bei Bauprojekten führt dazu, dass oftmals verschiedene Gewerke mit stark unterschiedlichen Prozessen gleichzeitig am gleichen Ort durch unterschiedliche Unternehmen durchgeführt werden.
- Im Gegensatz zur produzierenden Industrie hat das bauausführende Unternehmen oftmals nicht die volle Kontrolle und Steuerung über den aus Planung und Herstellung bestehenden Gesamtprozess, sondern ist dabei auf Interaktionen über die Betriebs- und Vertragsgrenzen hinweg angewiesen. Zusätzliche Unternehmen zwischen dem Bauherren und dem letztendlich ausführenden Subunternehmen machen Bauprozesse hoch komplex, erschweren die Logistik und sind, durch den zusätzlichen Verwaltungsaufwand und das zusätzliche Risiko, eine Quelle von Kosten.
- Die Bauwirtschaft ist ein stark fragmentierter Wirtschaftszweig. Mehr als 80 % der Beschäftigten in der Bauwirtschaft in Österreich sind in KMUs tätig. Auf europäischer Ebene sind 95 % der Unternehmen KMUs mit weniger als 20 Mitarbeitern. Bei der Abwicklung von Bauprojekten sind Bauunternehmen deshalb stark auf KMUs angewiesen, die mit der Implementierung neuer Technologien oftmals nicht mithalten können.
- Die Bauwirtschaft ist in einem hohen Maß reguliert. Die große Menge an lokalen Gesetzen und Gepflogenheiten erschwert die Umsetzung von Standardlösungen.
- Lange Bauzeiten und eine Fülle an Unsicherheiten in der Bauausführung erschweren die Planung.
- Die Bauwirtschaft ist stark von Investitionen der öffentlichen Hand abhängig [102]. 60 % des Produktionswertes im Tiefbau in Österreich stammen aus öffentlichen Aufträgen.

### 2.2.3 Chancen und Herausforderungen der Digitalisierung

Goger et al. [55] untersuchten die Potentiale der Digitalisierung in der Bauwirtschaft und teilten die Chancen und Herausforderungen in die Abschnitte Planen, Bauen und Betreiben

des Lebenszyklus eines Gebäudes. Die Potentiale, die in der Ausführungsphase eines Projektes als hoch identifiziert wurden, sind in Tabelle 2.1 dargestellt. In der Spalte „Relevanz“ wird die Verbindung der Potentiale mit dem gegenständlichen Thema hergestellt. Dabei ist erkenntlich, dass eine Vielzahl der Themen mit dem digitalen Datenmanagement in Verbindung gebracht werden können und die meisten Herausforderungen auch in diesem Bereich zu überwinden sind.

Die Schaffung von durchgängigen Datenketten ohne eine Vielzahl von Datenbrüchen und unterschiedlichen Datenabgestrukturen ist in der Bauausführung eines der größten Entwicklungspotentiale. Zusätzlich angeführte Chancen, wie die automatische Massenermittlung und dynamische Kosten- und Terminalsicherheit können erst im Anschluss daran ausgenützt werden. Mit zunehmender Kultur für eine erhöhte Datentransparenz, ermöglichen neue Datenmanagementsysteme die Interaktion mit digitalen Modellen und bauverfahrensspezifischen Visualisierungen. Die Interoperabilität der entstehenden Einzellösungen und der damit einhergehenden Schnittstellenproblematik wird durch die nationale und internationale Bestimmung eines Datenstandards verbessert werden, stellt aber weiterhin eine der größten Herausforderungen dar. Inwieweit die herrschende Flexibilität im Bauablauf durch digitale Techniken eingedämmt werden kann, bleibt abzuwarten. Die Skepsis der Mitarbeiter kann nur durch die aktive Miteinbeziehung in den Entwicklungsprozess, und kontinuierliche Fortbildungsmaßnahmen zunehmend abgebaut werden. In der Konzeption und Erstellung des neuen Datenmonitoringsystems in Kapitel 7 wurden daher kontinuierlich alle Beteiligten einbezogen. Forschung und Entwicklung ist mit Investitionskosten verbunden, die bis heute die Bauindustrie daran hindern, neue Technologien einzusetzen. Die Amortisierung wird zumeist nicht vollständig durch ein neues Projekt erreicht, weshalb eine strategische Planung der Entwicklungsvolumina in Bauunternehmen anzustreben ist.

Die jährlich erscheinenden Indizes zur Digitalisierung von Statistik Austria oder Unternehmensberatungen wie McKinsey & Company bescheinigen, dass die Bauwirtschaft zu den am wenigsten digitalisierten Wirtschaftszweigen zählt. Eine im Jahr 2014 durchgeführte Studie [45] zeigt, dass es den neu verwendeten IKT-Systemen noch an Reife und Flexibilität in der Integration von bestehenden Lösungen fehlt und damit die Bauwirtschaft noch nicht den vollen Nutzen aus dieser Technologie schöpfen kann. Die unterdurchschnittlichen Investitionen sind unter anderem durch die definierten Eigenheiten der Bauwirtschaft in Kapitel 2.2.2 begründet.

Der Vergleich der genannten Herausforderungen der Digitalisierung wurde durch den Autor aus Sicht eines Unternehmens in eine endogene und eine exogene Gruppe unterteilt [73]. Paraphrasen aus den 66 aktuellen Veröffentlichungen bildeten die Basis der Gruppenzuordnung. In einem weiteren Schritt wurden aus den Gruppen Kategorien geformt. Für die von den Unternehmen endogenen Herausforderungen bildeten sich die Kategorien Bewusstsein, Organisation und Technik. Dabei liegen die Schwerpunkte auf den Kategorien Organisation und Bewusstsein. Insbesondere auffallend ist die häufige Nennung von fehlendem Wissen und



**Tab. 2.1:** Chancen und Herausforderungen nach Goger et al. [55] mit hoher Auswirkung

	<b>Digitalisierungsthemen</b>	<b>Relevanz</b>
Chancen	Automatische Massenermittlung	✓
	Ganzheitliche Gebäudeanalyse	
	Digitale Baueinreichung	
	Integrale, kollaborative Planung	
	Anwendung von AR- und VR-Technologie	
	Durchgängige Datenketten für erhöhte Wertschöpfung	✓
	Dynamische Kosten- und Terminalsicherheit	✓
	Kommunikation am Modell und an Visualisierungen	✓
	Datentransparenz in der Dokumentation	✓
Interoperabilität der Software	✓	
Herausforderungen	Einheitliche Datenablagestrukturen	✓
	Mitarbeiterakzeptanz	✓
	Fehlende Standardisierung	✓
	Datensicherheit	✓
	Fort- und Weiterbildung der Angestellten	✓
	Investitionskosten	✓
	neue Anforderungen an Beteiligte	
	Schnittstellendefinition	✓
	Urheberrecht	
	Gesetzliche Rahmenbedingungen	
	Lebenszyklusbetrachtungen	
	Flexibilität im Bauablauf	✓
Wettbewerbsentwicklung		

fehlender Erfahrung in der Kategorie Bewusstsein. In der Kategorie Organisation werden hohe Finanzierungskosten oder geringe Investitionsmöglichkeiten als wichtigste Herausforderungen genannt. Technische Herausforderungen hingegen liegen vergleichsweise selten vor. Es kann daraus geschlossen werden, dass Unternehmen in Bezug auf Digitalisierung organisatorische und bewusstseinsbildende Maßnahmen für erfolgreiche Implementierung von IKT forcieren müssen. Für die exogenen Herausforderungen ergaben sich die Kategorien Standardisierung, Zusammenarbeit und Sicherheit. In Bezug auf die Anzahl der Nennungen ist die Kategorie Standardisierung besonders bedeutend, die sich in der Literatur durch die fehlende Interoperabilität und Standardisierung auszeichnet. Diese Gruppe deckt sich mit den Erfahrungen des Autors zu den Arbeiten des gegenständlichen Datenmonitorings, da aufgrund fehlender Standardisierung eine Vielzahl von Datenaustauschformaten zur Anwendung kommt.

Den Herausforderungen stehen die Chancen durch die Digitalisierung gegenüber. Diese wurden durch den Autor in vier Gruppen unterteilt.

- Chancen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit
- Chancen zur Verbesserung der Organisationsstruktur
- Soziale und unternehmensübergreifende Verbesserungen
- technische Verbesserungen

Die Literaturanalyse ergab, dass die Steigerung der Produktivität im Einklang mit der Senkung von Kosten und einer Erhöhung der Qualität sowie Zeitersparnis als stärkste Gruppen der verbesserten Wirtschaftlichkeit genannt werden. Im Feld Organisationsstrukturen werden insbesondere die Zusammenarbeit, Kommunikation im Allgemeinen und der rasche Datenzugriff/-austausch als höchste Potentiale gesehen. Interessant war dabei, dass die Bewältigung komplexerer Techniken nicht als größte Chance gesehen wird. In Tabelle 2.2 werden die einzelnen Nennungen und betrachteten Literaturzitate aufgelistet. Im Kapitel 8 lassen sich einige Nennungen durch das eingesetzte Datenmonitoringsystem bestätigen. Insbesondere geht der Einsatz von digitalem Datenmonitoring in der Injektionstechnik mit Zeitersparnis, Automatisierung von Prozessen, verbessertem Risikomanagement, Verbesserung der Kommunikation, Koordination, Terminplanung und Dokumentation, Erhöhung der Kundenzufriedenheit und verbesserter Datenvisualisierung und erhöhter Datengenauigkeit einher.

## 2.3 Umfrage „Digitale Datenmanagementsysteme“

Im Zuge der Veranstaltung „Zukunftsfragen des Baubetriebs“ im Jahr 2018 beantworteten die Entscheidungsträger der österreichischen Bauwirtschaft eine Umfrage zum Thema „digitales

**Tab. 2.2:** Chancen der Digitalisierung in der Bauwirtschaft nach Nennungen in der Literatur ab 2010 [73]

Kategorie	Paraphrase	Nennungen	Verweis
Wirtschaft	Steigerung der Produktivität oder Effizienz	9	[51], [102], [45], [16], [86], [40], [55], [104], [22]
	Senkung von Kosten	6	[51], [139], [16], [86], [24], [69]
	Erhöhung der Qualität	5	[51], [86], [104], [22], [69]
	Zeitersparnis	4	[51], [86], [24], [69]
	Erschließen neuer Märkte, Geschäfts- und Vertragsmodelle	3	[173], [40], [55]
	Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit	2	[37], [24]
	Automatisierung von Prozessen	1	[40]
	Senkung des Ressourcenverbrauchs	1	[22]
	Senken des Risikos	1	[16]
	Verbesserungen im Risikomanagement	1	[79]
	Verbesserung bei der Lebenszykluskostenrechnung	1	[55]
	Bessere Reaktion auf Marktveränderungen	1	[37]
Schaffung neuer Arbeitsplätze	1	[55]	
Organisation	Verbesserung der Zusammenarbeit	5	[51], [173], [16], [55], [69]
	Verbesserung der Kommunikation	5	[1], [86], [40], [55], [69]
	Verbesserter Datenzugriff/-austausch	4	[173], [86], [24], [55]
	Verbesserung in der Planung	3	[16], [55], [69]
	Verbesserung in der Koordination	2	[1], [69]
	Verbesserung im Betrieb von Immobilien	2	[16], [55]
	Verbesserung in der Baustellenlogistik	2	[139], [55]
	Verbesserung in der Finanzplanung oder im Finanzcontrolling	2	[51], [86]
	Verbesserung in der Terminplanung	2	[51], [55]
Verbesserung der Dokumentation	1	[55]	
Soziales	Erhöhung der Transparenz	3	[16], [24], [55]
	Erhöhung der Sicherheit	2	[51], [175]
	Verbesserung der Arbeitsbedingungen, Reduktion körperlich beanspruchender Tätigkeiten	2	[51], [9]
	Erhöhung der Kundenzufriedenheit	2	[40], [69]
	Unterstützung von Innovation	1	[22]
	Verbesserung bei der Vertragsabwicklung	1	[55]
	Effektivere Streitschlichtung	1	[173]
	Erhöhung der Nachhaltigkeit	1	[51]
Technik	Bewältigung von hoher Komplexität	1	[51]
	Verbesserte Datenvisualisierung	1	[55]
	Erhöhung der Datengenauigkeit	1	[86]

Datenmanagement im Baubetrieb“. Dabei wurde unter anderem die Haltung gegenüber digitaler Technologien, der erwartete Nutzen von Systemen und andere wichtige Eigenschaften erfragt. Die Ergebnisse gingen in die Entwicklungsarbeit des digitalen Datenmonitorings ein.

### 2.3.1 Haltung der Entscheidungsträger

In der ersten Umfragerunde waren die Teilnehmer dazu aufgerufen, Aussagen über zentrale Wissensmanagementsysteme im Baubetrieb zu bewerten. Die möglichen Antworten entsprachen den wesentlichen Stimmungen aus der Branche, die bei Vorgesprächen ermittelt wurden und sich in den Expertengesprächen in Abschnitt 6.3 wiederfinden. Auf die Frage: „Stimmen Sie den Aussagen über zentrale, digitale Wissensmanagementsysteme im Baubetrieb zu?“ standen folgende vier positive und vier negative Aspekte zur Verfügung.

Positive Aussagen:

1. Eine zentrale Informationsplattform mit anderen Stakeholdern würde meine Arbeit erleichtern.
2. Ich vertraue den digitalen Outputs mehr als Handprotokollen.
3. Ich wäre bereit, mehr Information als bisher für ein zentrales Baustellensystem zur Verfügung zu stellen.
4. Digitale Datentransparenz auf der Baustelle führt zu Verbesserungen am Bau.

Negative Aussagen-Pendant:

1. Ich habe im letzten Jahr absichtlich analoge Daten oder darauf aufbauende Analysen zurückgehalten.
2. Meine Arbeit würde durch digitale Prozesse ständig überwacht werden. Dadurch habe ich selbst weniger Kompetenzen.
3. Nur was vertraglich vereinbart ist wird mit anderen Stakeholdern geteilt.
4. Die Entwicklungskosten solcher Baustellensysteme rechtfertigen nicht die Vorteile.

Den negativen Aussagen über digitale System wurden nur zu 7 % zugestimmt, wohingegen die positiven Antwortmöglichkeiten eine Zustimmung von durchschnittlich 50 % erhielten. 22 % der Teilnehmer gaben an, dass der Vertrag bestimme, was mit anderen Interessensvertretern auf der Baustelle geteilt würde. Im Gegensatz dazu wären 40 % der Befragten bereit, mehr Informationen über ein zentrales System zu teilen. Obwohl die positiven Antwortmöglichkeiten

eine 50-prozentige Zustimmung erhielten, wurde die Frage, ob den digitalen Outputs mehr Vertrauen geschenkt würde als analoge Handzetteln, nur von 9 % der Teilnehmer bejaht. Dieses Ergebnis spiegelt das derzeitige Bild auf Baustellen wieder, da oft neben der Einführung digitaler System, händische Dokumentationen und Aufzeichnungen parallel dazu weiter durchgeführt werden. Die Zustimmungen zu den positiven und negativen Aussagen sind in Tabelle 2.3 zusammengestellt.

**Tab. 2.3:** Zustimmungen in % zu Aussagen für digitales Wissensmanagement im Baubetrieb

Aussage	positiv	negativ
1. Datenaustausch	62 %	0 %
2. Digitale Daten	9 %	4 %
3. Datentransparenz	40 %	22 %
4. Allgemein	87 %	2 %
Gesamt	50 %	7 %

### 2.3.2 Erwarteter Nutzen

In einem zweiten Teil wurde der erwartete höchste Nutzen abgefragt. Auf die Frage: „Welchen Nutzen von digitalen Datenmanagementsystemen im Baubetrieb erachten Sie am höchsten?“ standen die Antwortmöglichkeiten, monetärer Nutzen, Qualitätserfüllung, Zeitgewinn und Ressourcenersparnis zur Auswahl. Diese Antwortmöglichkeiten fassen die wichtigsten Paraphrasen aus Tabelle 2.2 zusammen. Die Ergebnisse dieser Befragung sind in Tabelle 2.4 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Entscheidungsträger den Zeitgewinn oder die Ressourcenersparnis als wichtigsten Nutzen identifizieren und ein erhoffter monetärer Nutzen eine untergeordnete Priorität hat. Die Auswertungen in den einzelnen Gruppen der Interessenvertreter zeigt, dass Bauherren keine verbesserte Qualitätserfüllung erwarten, und Planer und die Bauaufsicht keinen monetären Nutzen für sich sehen. Bauunternehmen hingegen gaben alle vier Kategorien an, wobei der Zeitgewinn mit 40 % als wichtigster erwarteter Nutzen gilt. Sachverständige und Juristen erachteten die Ressourcenersparnis als vorrangig zu erwartenden Nutzen.

### 2.3.3 Eigenschaften von digitalen Systemen

Attribute von digitalen Systemen im Baubetrieb entsprechen nicht-funktionalen Anforderungstypen, die in Abschnitt 6.1.2 ausgeführt sind. Die wichtigsten Attribute, die in den

<sup>2</sup>Die Werte in der Spalte Allgemein entsprechen nicht den Mittelwerten in den einzelnen Gruppen, da bei der Befragung eine ungleichmäßige Gruppengröße entstand.

**Tab. 2.4:** wichtigster erwarteter Nutzen von Wissensmanagementsystemen in %

Kategorie	Allgemein <sup>2</sup>	Bauherr	Planung \ Aufsicht	Bauunter- nehmen	Sachver- ständige
monetärer Nutzen	9 %	17 %	0 %	13 %	0 %
Qualitätserfüllung	18 %	0 %	27 %	20 %	0 %
Zeitgewinn	35 %	33 %	27 %	40 %	33 %
Ressourcenersparnis	38 %	50 %	46 %	27 %	67 %

Expertengesprächen genannt wurden, konnten durch die Teilnehmer der Umfrage ausgewählt werden. Dabei beinhaltete die Umfrage zwei Schritte. Im ersten Schritt war eine Auswahl der drei wichtigsten Eigenschaften vorgesehen. In der zweiten Fragestellung wurden die drei unwichtigsten Attribute ausgewählt. Sofern Eigenschaften fehlten, konnte diese von den Teilnehmern hinzugefügt werden. Die vordefinierten Antwortmöglichkeiten in Rangordnung von den wichtigsten zu den unwichtigsten Eigenschaften ist in Tabelle 2.5 dargestellt. Der Rang ergab sich nach Subtraktion der Nennungen der zweiten Frage vom ersten Schritt. Der Übereinstimmungsfaktor gibt an, wieviel Prozent die Differenz zur gesamten Anzahl der Nennungen ausmacht<sup>3</sup> und gibt neben der Häufigkeit der Nennungen ein Maß an, wie sehr sich die Teilnehmer bei der Einteilung in wichtig und unwichtige Eigenschaften einig waren. Das Ergebnis zeigt, dass die Verständlichkeit der Systemdokumentation, insbesondere die Benutzerdokumentation, wie Hilfeoptionen während des Programmablaufs, für die Interessenvertreter eine wesentliche Eigenschaft ist. Im Alltag benutzen Beteiligte auf der Baustelle eine Vielzahl von eigenen Lösungen, wie Enterprise-Resource-Planning (ERP)-Software. Digitale Baustellendaten müssen daher mit Hilfe von geeigneten Schnittstellen direkt übertragbar sein. Sofern Webapplikationen und Programme zum Einsatz kommen, ist die Einsicht von Live-Daten auf allen Smart-Devices eine wichtige Eigenschaft, die zu berücksichtigen ist. Attribute zur Datensicherheit wurden von keinem Teilnehmer als wichtig oder unwichtig markiert. Es zeigt sich, dass das Bewusstsein dafür in der Bauindustrie nicht ausgeprägt ist und sicherheitsrelevante Themen für Baustellendaten eine untergeordnete Rolle spielen. Gerade für die Bauaufsicht ist es bemerkenswert, dass die externe Überprüfungsmöglichkeit der Algorithmen keine wichtige Eigenschaft zu sein scheint. Erst dadurch wäre eine Bewertung hinsichtlich der Qualität von automatischen Prozessen möglich. Es zeigt sich, dass geringe Antwortzeiten für übergeordnete Entscheidungsträger weniger wichtig sind, als für direkt beteiligte Personen, die im Rahmen des Projekt mit diesen Systemen intensiv arbeiten. Dadurch wurde dieses Attribut in dieser Befragung als unwichtig eingestuft. Für die Entwicklung neuer Datenmanagementsysteme sind neue Entwicklungen mit einem hohen Standard an Systemdokumentation auszustatten, möglichst viele Schnittstellen zu anderen Systemen zu ermöglichen, und den Zugriff auf Live-Daten ortsunabhängig auf allen Smart-Devices zu gewährleisten.

<sup>3</sup>Übereinstimmung =  $\frac{Nennung_{\text{positiv}} - Nennung_{\text{negativ}}}{Nennungen_{\text{gesamt}}}$

**Tab. 2.5:** Wichtigkeit von Attributen von Wissensmanagementsystemen

Rang	Attribut	Übereinstimmung	
1.	Qualität und Verständlichkeit der Systemdokumentation	81 %	wichtig
2.	Schnittstellen mit anderen Systemen	92 %	wichtig
3.	Ortsunabhängigkeit (für alle Smart Devices)	85 %	wichtig
4.	Einsicht auf Live-Daten	50 %	wichtig
5.	Automatische Erkennung und Behandlung von Fehlern (Bsp. Falscheingaben)	33 %	wichtig
6.	Hohe Anforderungen an Ausfallsicherheit und Robustheit	14 %	wichtig
7.	Datensicherheit (Verschlüsselung, Serverstandort)	100 %	neutral
8.	Niedriger Schulungsaufwand für den Gebrauch	-5 %	unwichtig
9.	Schnelle Wartung von Soft- und Hardware	-100 %	unwichtig
10.	Geringe Antwortzeiten (<1 Sekunden)	-61 %	unwichtig
11.	Externe Überprüfungsmöglichkeit der Algorithmen	-74 %	unwichtig

## 2.4 Automatisierungspotentiale

Im Zusammenhang mit digitalen Datenmanagementsystemen wird eine Arbeitserleichterung für die handelnden Personen auf der Baustelle angestrebt. Automatisierung mit Hilfe von IKT führt dazu, dass Benutzerschnittstellen abgebaut werden können. Als Synonym wird der Begriff „Industrie 4.0“ verstanden. Kagermann et al. verstehen darunter die vierte industrielle Revolution, die durch die Integration von cyber-physischen Systemen in die Produktion und die Logistik, sowie die Nutzung des Internets der Dinge in industriellen Prozessen gekennzeichnet ist [80]. Nach dieser Definition ergeben sich neue Arbeitsprozesse und Wertschöpfungen, die das Baugewerbe zunehmend revolutionieren.

Der Bericht zur „Substituierbarkeit von Berufen im Zuge der Automatisierung durch Industrie 4.0“ zeigt auf, dass der Wirtschaftszweig „Baugewerbe“ im Durchschnitt mit einer Automatisierungswahrscheinlichkeit von 59%<sup>4</sup> zu rechnen hat. Dies bedeutet, dass durch den potentiellen Destruktionseffekt 59 % der Tätigkeitsstrukturen innerhalb des Baugewerbes automatisiert werden können [108]. Wie sehr durch die Schaffung neuer Betätigungsfelder diese automatisierten Tätigkeiten kompensiert werden können, bleibt offen. Die hohe Automatisierungswahrscheinlichkeit führt außerdem nicht zwingend dazu, dass jede menschliche Arbeitskraft in einer Berufsgruppe hinfällig wird, sondern dass durch Automatisierung Zeit verfügbar wird, die für andere Tätigkeiten aufgewendet werden kann. Beispielswei-

<sup>4</sup>Die Studie für Österreich beruht auf der Datengrundlage von Frey und Osborne (2013) für die USA. Der Herausgeber weist drauf hin, dass die Ergebnisse als qualitativer Befund verstanden werden sollen.

se ermöglicht die Implementierung von digitalem Datenmanagement auf einer Baustellen, der verantwortlichen Bauleitung den Anteil für Dokumentationsstätigkeiten zu senken und verstärkt vernachlässigten Tätigkeiten nachzugehen. Ein genauerer Blick auf die einzelnen Berufsgruppen zeigt, dass Ingenieure einer durchschnittlichen tätigkeitsbasierten Automatisierungswahrscheinlichkeit von 35 % unterliegen, Hilfsarbeitern im Baugewerbe im Vergleich dazu mit 66 % [108].

Bei der Entwicklung von automatisierten Prozessen wird von zwei Entwicklungsszenarien ausgegangen. Mit dem Charakter eines Assistenzsystems werden beim **Werkzeugszenario** Systeme entwickelt, die qualifizierten Facharbeitern die Möglichkeit geben, fundierte Entscheidungen zu treffen. Der Gesamtprozess steht im Mittelpunkt bei der Entwicklung solcher Entscheidungshilfeprogramme. Die Anforderungsprofile an die Anwender sind geprägt von einem starken Überblickswissen und der Fähigkeit, Prozesse zu kontrollieren. Dem entgegen steht das **Automatisierungsszenario**, dass sich durch eine Dequalifizierung des Anwenders auszeichnet. Bei diesem Szenario steht die Minimierung von Fehlern bei Routinetätigkeiten während des Arbeitsprozesses im Mittelpunkt [164]. Abhängig von dem Beschäftigungsfeld auf der Baustelle sind beide Entwicklungsansätze zu verfolgen. So soll etwa das gewerbliche Personal in seinen routinemäßigen Tätigkeiten, wie etwa den Dokumentationspflichten oder der Steuerung von Arbeitsprozessen, durch das „Automatisierungsszenario“ unterstützt werden. Das Potential für geringere Einlernzeiten und höhere Produktionsleistung sei in diesem Zusammenhang erwähnt. Bauleiter und Techniker können in gleicher Weise bei routinemäßigen Arbeiten der Datenverarbeitung unterstützt werden. Die Entwicklung in dieser Führungsebene richtet sich jedoch verstärkt nach dem „Werkzeugszenario“ und der Unterstützung für den Entscheidungsfindungsprozess bei Spezialfällen. In diesem Zusammenhang wird die Wichtigkeit eines Prozesscontrollers [163] evident. Dieser besitzt die Fähigkeit, mit Technikern und Softwareentwicklern zusammenzuarbeiten, Schnittstellen zu anderen Bereichen, wie Disposition und Abrechnung, herzustellen, und die Implementierung und Wartung im Arbeitsprozess zu gewährleisten.

Das Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Chancen durch Digitalisierung, die in der Literatur hervorgehoben werden. Die meisten Studien und Quellen sagen eine Produktivitätssteigerung durch den Einsatz digitaler Techniken im Baubetrieb voraus. Einerseits wird diese Steigerung durch die Optimierung tradierter Prozesse, andererseits durch die Schaffung neuer Prozesse erreicht werden. Die Produktivitätssteigerung wird im Gleichklang mit der Senkung von Kosten, Erhöhung der Qualität und Zeitersparnis diskutiert. Die Umfrage bei den Entscheidungsträgern in der österreichischen Bauwirtschaft zeigt, dass insbesondere Ressourcenersparnis und Zeitgewinn erwartet werden, eine Senkung der Kosten hingegen wird durch die Experten nicht erkannt. Auf Nachfrage wurde durch die Teilnehmer vermutet, dass notwendige Investitionen diesen möglichen Vorteil abschwächen. Dem Thema Digitalisierung im Baubetrieb wird grundsätzlich positiv begegnet, wobei das Vertrauen in digitale Daten noch immer nicht ausgeprägt ist. Die Umfrage nach den wichtigsten Eigenschaften von Datenmanagementsystemen zeigt, dass Datensicherheit und externe Überprüfbarkeit



als nicht prioritär erachtet werden. Dies würde jedoch das Vertrauen in digitale Inhalte steigern. In der zukünftigen Entwicklung von Daten- und Datenmanagementsystemen ist die Qualität der Systemdokumentation und die Vielzahl an Schnittstellen zu anderen Systemen als die wichtigsten Elemente identifiziert worden. Studien zur Automatisierung mit Hilfe von IKT zeigen, dass insbesondere routinemäßige Arbeiten einem starken Automatisierungseffekt unterliegen werden. In der Entwicklung verfolgt man nicht nur dieses Szenario, sondern es werden Systeme als unterstützende Werkzeuge für qualifizierte Angestellte, im Sinne von Expertensystemen, gebildet. Im Baubetrieb verstärkt zur Anwendung kommen sogenannte Prozesscontroller die Kommunikationsschnittstellen in der Entwicklung zwischen Ingenieuren und IT-Technikern auflösen<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup>In der Entwicklung von Baustellentools bedient man sich Teams mit unterschiedlichen Expertisen, wobei der Prozesscontroller die Schnittstelle zwischen IT-Spezialisten und Prozess-Experten ist. Der gleichbedeutende Begriff für Prozesscontroller wird in der Softwareentwicklung als Product-Owner bezeichnet.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kapitel 3

## Bauverfahrenstechnik

Die Auseinandersetzung mit dem gegenständlichen Herstellungsverfahren ist die Grundlage für jegliche Entwicklung von Prozessunterstützungen in der Ausführungsphase. Die Ausführungsprozesse sind direkt an das Bauverfahren gekoppelt und bedürfen einer detaillierten Analyse, um darauf aufbauend Standardisierungen für Organisations- und Dokumentationsprozesse zu etablieren.

In diesem Kapitel wird die Verfahrenstechnik für die Herstellung von Injektionen vorgestellt. Häufig ist das Bauverfahren Injektion gekoppelt an dem dem Bauverfahren Bohren, da Zugangswege für Injektionskanäle in den Untergrund geschaffen werden müssen. Der Prozess setzt sich grundsätzlich aus den Bautätigkeiten „Umsetzen der Anlage“, „Herstellen des Bohrlochs“ und „Herstellen des Einpresskörpers“, zusammen. Das dargestellte Flussdiagramm in Abb. 3.1 zeigt diesen Zusammenhang auf Prozessebene. Aus baubetrieblicher Sicht sind die Hauptverfahren mit spezifischer Gerätetechnik in Verbindung zu bringen. Abhängig von räumlichen Gegebenheiten, Längen der Bohrlöcher und der Personaldisposition, laufen die Arbeiten seriell, parallel oder abwechselnd. Betrachtet man alle Arbeiten an einem Bauteil, stellt sich der Prozess wie in Abb. 3.1 dar.

Neben den zur Anwendung kommenden Injektionsprinzipien und den damit verbundenen Verfahren werden die gebräuchlichen Bohrverfahren vorgestellt. Auf die Injektionskomponenten und Sensortechnik wird im Detail eingegangen, damit die in Verbindung stehende Dokumentations- und Analyseabläufe determinieren werden können.

### 3.1 Der iterative Planungs- und Ausführungsprozess

*Eine Injektion wird gewiss nicht zuerst gänzlich digital geplant, dann digital optimiert und dann ausgeführt werden können. Die Planung einer Injektion endet stets mit der Ausführung des letzten Injektionsabschnitts [46, S. 226]. Ganz nach diesem Zitat beruht die Planung und*

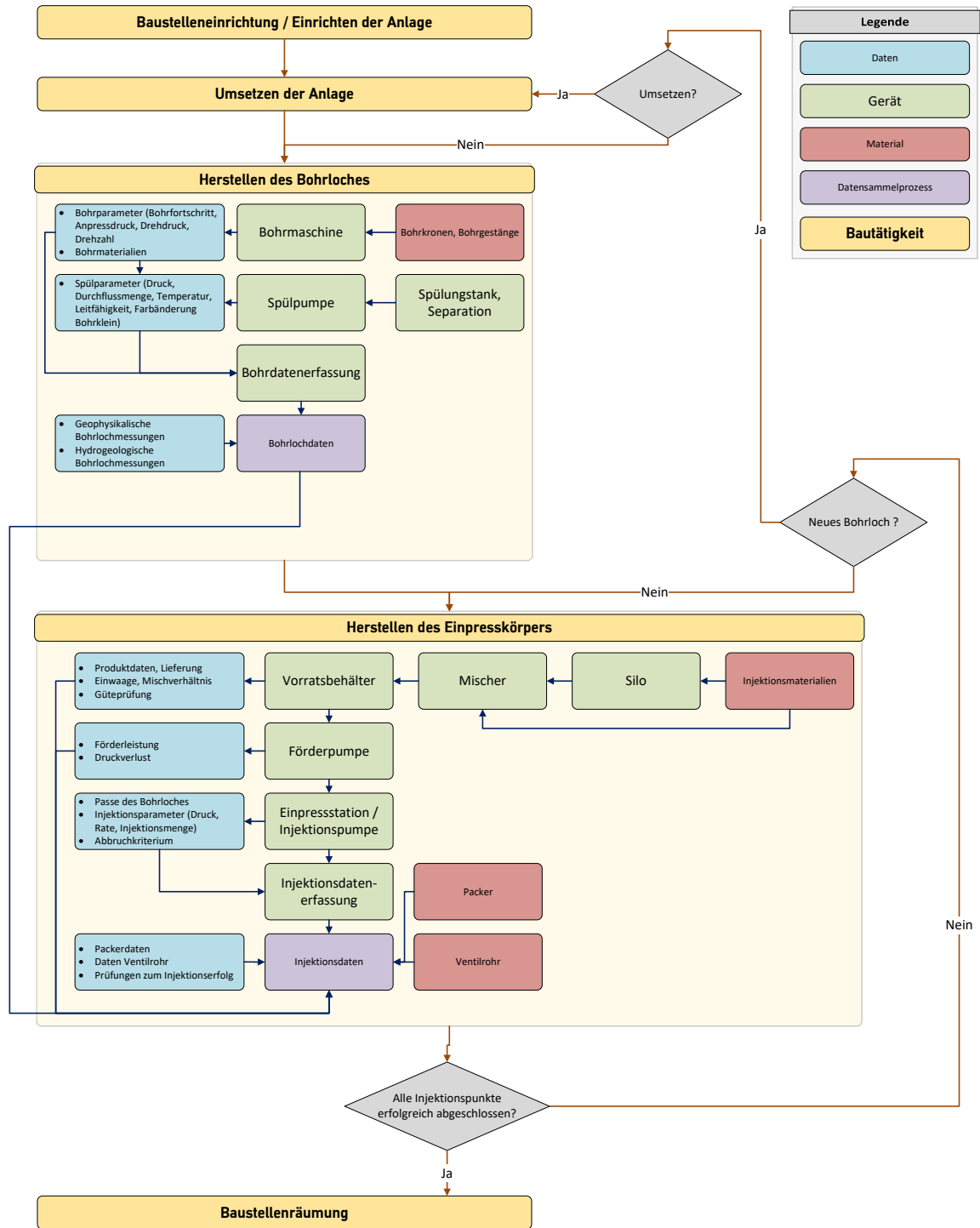


Abb. 3.1: Bohr- und Injektionsverfahren im Zusammenhang [117]

Ausführung von Injektionen auf einem interaktiven und iterativen Prozess. Mit zunehmenden Erkenntnissen in einem Projekt werden Injektionsmaßnahmen immer wieder verändert, angepasst und verfeinert, um ein definiertes Injektionsziel zu erreichen. Das Flussdiagramm zum Ablauf von Injektionsmaßnahmen, adaptiert in Abb. 3.2 gemäß dem Kommentar zur EN 12715 Injektionen, beschreibt diesen Sachverhalt. Sofern ein Injektionsbedarf bei einem geplanten Projekt festgestellt wurde, können, nach ausreichenden Erkundungsmaßnahmen, Baugrundmodelle mit injektionstechnisch relevanten Parametern gebildet werden. Auf dieser Grundlage werden zu Beginn der Ausschreibungsplanung drei grundsätzliche Entscheidungsprozesse mit folgenden Fragestellungen durchlaufen:

1. Ist eine Injektion aufgrund der geotechnischen Parameter erforderlich?
2. Sind Injektionen technisch machbar, damit die definierten Ziele (Festigkeiten, Durchlässigkeiten) erreicht werden können?
3. Sind die Injektionen wirtschaftlich sinnvoll?

Sofern diese drei Fragen positiv beantwortet werden können, müssen die detaillierten Randbedingungen erfasst und die Injektionsziele aktualisiert werden. Die Definition der Anforderungen umfasst die räumlichen Gegebenheiten, gesetzliche Rahmenbedingungen, Beschränkungen hinsichtlich der Auswirkungen auf die Umwelt und Bedingungen an das Injektionsgut. Als nächster Schritt im Ablauf ist die Wahl der Injektionsmethode und des passenden Materials zu treffen. Injektionstests im projektspezifischen Untergrund helfen, die Planungsannahmen zu bestätigen oder abzulehnen. Innerhalb dieser In situ-Tests wird der vierte Entscheidungsprozess durchlaufen, der zur Phase der Ausschreibungsplanung zuzuordnen ist.

4. Bestätigen die In situ-Tests die Planungsannahmen?

Sofern sich die Annahmen bestätigen, werden das prognostizierte Systemverhalten beschrieben und die Festlegungen für die Ausführung getroffen. Diese beinhalten beispielsweise Bohrraster, das Injektionsgut und gewählte Abbruchkriterien.

Die Kalkulationen der Bauunternehmen bauen auf dem prognostizierten Systemverhalten auf. Deshalb stellt dieses eine wichtige Vertragsgrundlage dar. Nach Abschluss des erfolgreichen Bauvertrags beginnen die Injektionen unter Baustellenbedingungen. Durch die Injektionsdaten und weitere Erfolgstests wird das beobachtete Systemverhalten kontinuierlich protokolliert. Stadler et al. [147] sprechen in diesem Zusammenhang vom *kontinuierlichen injektionsbegleitenden Prozess*. Dabei wird das prognostizierte Systemverhalten möglichst häufig mit dem

beobachteten Systemverhalten verglichen, und entschieden, ob diese in Übereinstimmung miteinander liegen.

#### 5. Entspricht das beobachtete dem prognostizierten Systemverhalten?

Als Entscheidungsgrundlage zum fünften Entscheidungsprozess werden baustellenspezifisch ein Datenmanagementsystem eingerichtet und Abgabezyklen von Injektionsdaten des Bauunternehmens an den Planer und Experten vereinbart. In diesem Entscheidungsprozess nimmt das digitale Datenmanagement zukünftig eine zentrale Rolle ein, da nur durch die regelmäßige Überprüfung der Prozesse, bis zum Ende von Injektionsmaßnahmen ein erfolgreicher Abschluss der Injektionen gewährleistet werden kann. Kommt es bei der periodischen Überprüfung des Systemverhaltens zu einer negativen Bewertung, so wird der Ablauf beginnend bei der Wahl der Injektionsmethode und des Materials wiederholt. Sofern danach keine Übereinstimmung eintritt, wird das Baugrundmodell aktualisiert und der Prozess von diesem Stadium aus wiederholt. Können danach die vierte oder fünfte Entscheidung nicht positiv beantwortet werden, so müssen die Entscheidungsprozesse eins bis drei erneut durchlaufen werden. Erlauben die angetroffenen Baugrundverhältnisse keine wirtschaftlich sinnvollen und technisch machbaren Injektionsmaßnahmen, müssen alternative Methoden ausgewählt werden. Durch den Prozess in Abb. 3.2 wird ersichtlich, dass die Überprüfung der Anforderungen in der Bauausführung ausschreibungsrelevante Prozesse beeinflussen können. Die geordnete Aufzeichnung und Analyse aller Ausführungsdaten ist daher essentieller Bestandteil und Werkzeug für die interaktive Planung und Vergütung der Injektionsmaßnahmen.

## 3.2 Grundsätzliche Injektionsprinzipien

In der ÖNORM EN 12715 [117] wird eine Einteilung nach den Injektionsprinzipien in zwei Gruppen vorgenommen. Man unterscheidet die Verfahren ohne und mit Baugrundverdrängung. Injektionen ohne Baugrundverdrängung werden auch verdrängungsfreie Injektionen genannt. Sie werden wiederum nach den Unterprinzipien Eindringinjektion und Hohlraumverfüllung untergliedert. Injektionen mit Baugrundverdrängung sind in der Baupraxis als Verdrängungsinjektionen bekannt. Sie werden nach dem Verfahrensprinzipien der Verdichtungsinjektion und hydraulischen Rissbildung untergliedert.

Poreninjektionen kommen vorwiegend zum Einsatz, um Lockergestein zu verfestigen oder abzudichten. Die im Boden vorhandenen Poren werden ohne Strukturänderung des Untergrundes und bei geringen Drücken mit Injektionsgut gefüllt. Dies führt zu einer Verkittung des Korngerüsts. Im Allgemeinen werden dadurch die Festigkeit, Dichte sowie Durchlässigkeit des Bodens erhöht. Kluft- und Kontaktinjektionen bilden im Festgestein das verfahrenstechnische Pendant zur Poreninjektion im Lockergestein. Das Injektionsgut wird dabei unter kontrollierten Bedingungen in offene Klüfte, Risse und Spalten im Fels sowie in Bauwerken injiziert, ohne

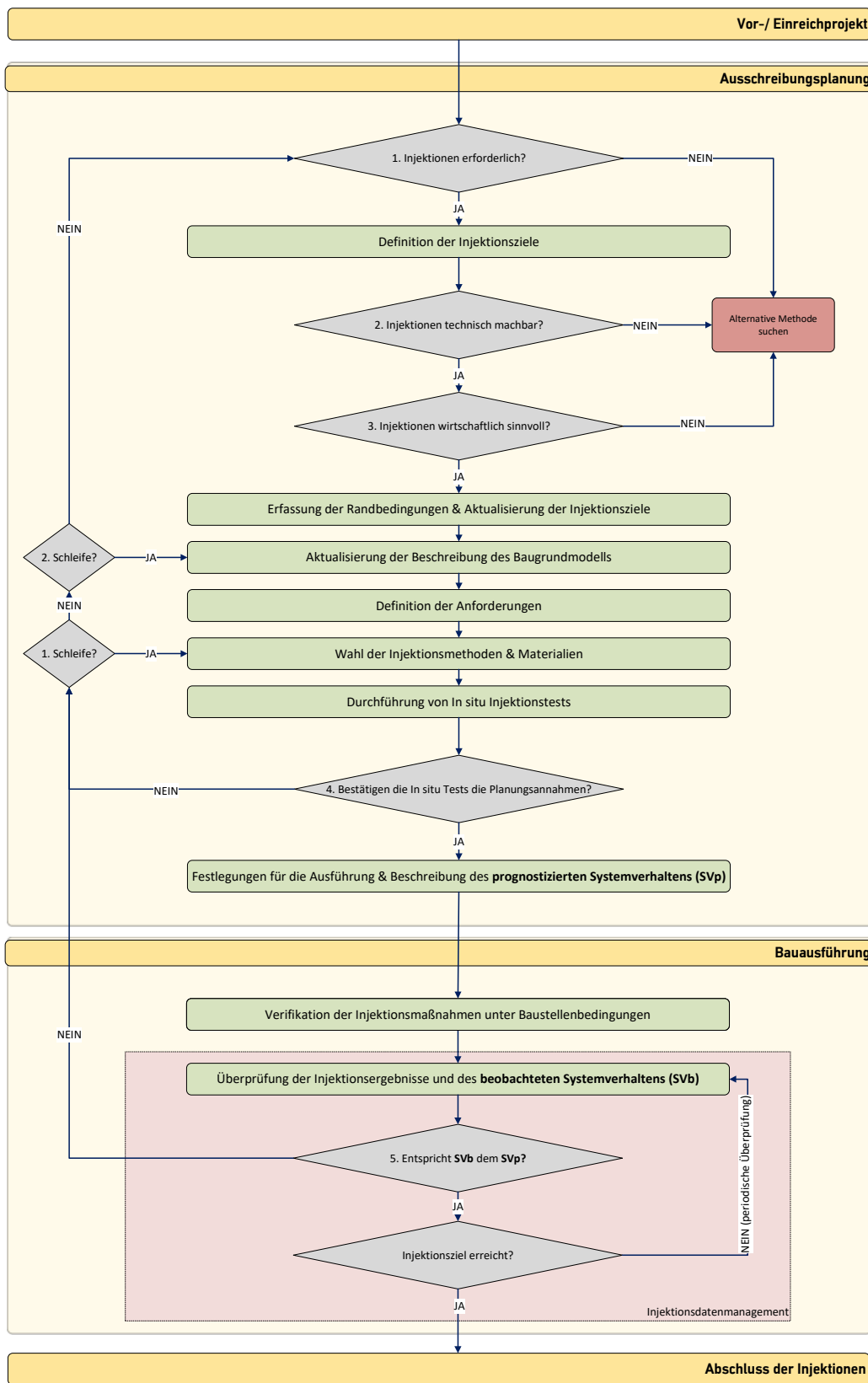
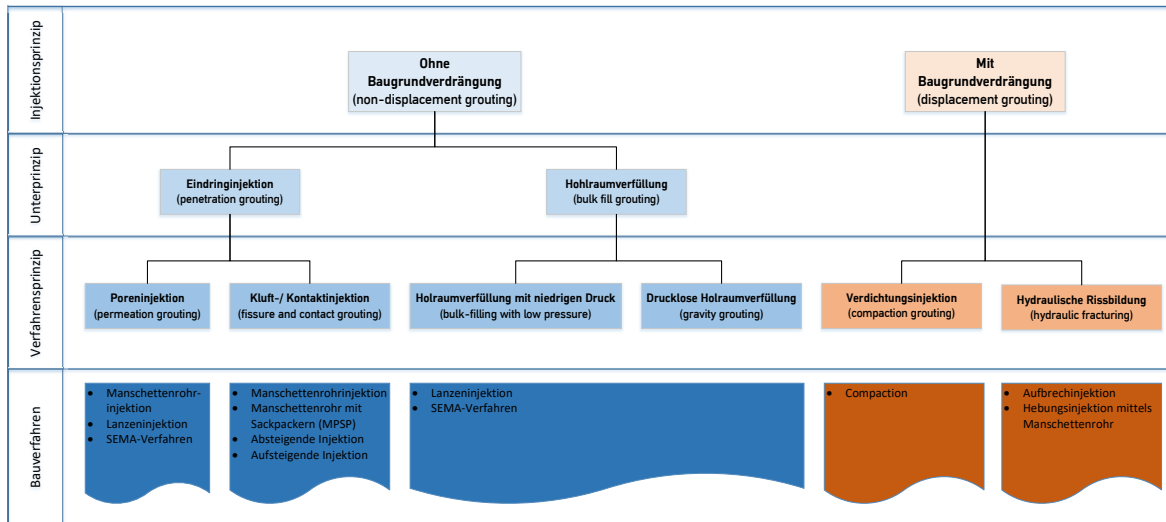


Abb. 3.2: Iterativer Planungs- und Ausführungsablauf mit fünf Entscheidungsprozessen adaptiert nach [147]



**Abb. 3.3:** Übersicht der Injektionsverfahren zusammengeführt aus [117] und [147]

diese dabei aufzuweiten oder neue Kanäle entstehen zu lassen. Die verfestigende und dichtende Wirkung steht dabei im Vordergrund. Hohlraumverfüllungen dienen dazu, natürliche und künstlich geschaffene Öffnungen im Untergrund aufzufüllen. Bei diesem Verfahrensprinzip werden hohe Mengen von Injektionsgut drucklos oder unter geringem Druck eingebracht.

Verdichtungsinjektionen gehören zu den Verdrängungsinjektionen, da der anstehende Boden durch dieses Verfahrensprinzip verdichtet und normal zur Bohrlochachse verdrängt wird. Das viskose Injektionsgut ist dabei so zu wählen, dass der Baugrund nicht durchdrungen wird. Im Baugrund bilden sich homogene kugelförmige Injektionskörper aus. Der umgebende Boden wird verdrängt und verdichtet. Das Verfahrensprinzip der hydraulischen Rissbildung wird eingesetzt um den Baugrund durch Aufsprengen der Poren zu verfestigen, abzudichten und weiterführend kontrolliert zu heben. Im Gegensatz zur Verdichtungsinjektion dringt das Injektionsgut in die Poren ein, die durch hohe Verpressdrücke bis 600 bar aufgeweitet werden. Bei der Erstverpressung bilden sich vertikale Lamellen aus, die den Boden verdichten. Bei einer weiteren Beaufschlagung bilden sich horizontale Lamellen aus, die zu einer zusätzlichen Hebung des Untergrundes führen. Sogenannte Hebungsinjektionen werden im Sprachgebrauch als Kompensationsinjektionen bezeichnet, da dieses Prinzip angewendet wird, um die, durch andere Bautätigkeiten hervorgerufene, Setzungen, zu kompensieren.

Weitere Unterscheidungen werden nach der Art des Untergrundes, dem Ziel der Behandlung, der Funktionsdauer ihrer Wirkung oder nach dem verwendeten Mittel vorgenommen. In Abb. 3.3 ist ein Überblick über die Injektions- und Verfahrensprinzipien dargestellt. Die Verknüpfung mit den einzelnen Bauverfahren zeigt, dass für unterschiedliche Prinzipien das gleiche Verfahren angewendet werden kann. Insbesondere die Manschettenrohrinjektion kann zur Erreichung unterschiedlicher Prinzipien eingesetzt werden.



### 3.3 Bohrtechnik

Dieses Kapitel bedient sich der Literaturquellen aus dem Bohrhandbuch von Reiser [131, Kapitel 12 und 14] , Kutzner [89, Kapitel 7.2] und Boley et al.[10, Kapitel 8.2]

Das Bohrverfahren ist in Abhängigkeit wesentlicher Randbedingungen zu wählen. Werden die Bohrungen für Aufschlusszwecke sowie für die Injektion verwendet, so müssen zumeist Rotationskernbohrungen angewandt werden. Dienen die Bohrungen ausschließlich dem Zweck der Injektion, so kommen Vollbohrtechniken zum Einsatz. Grundsätzlich werden die Bohrverfahren nach der Förderungsart des Bohrgutes unterschieden. Trockenbohrungen setzt man vorwiegend im Lockergestein ein, Spülbohrungen werden im Locker- und Festgestein gleichermaßen angewendet. Bei Spülbohrungen erfolgt der Austrag des Bohrmaterials kontinuierlich über einen Spülstrom. Dabei werden die Spülmedien Luft, Wasser oder in Sonderfällen Schaum verwendet. Bei Trockenbohrungen hingegen wird das Bohrgut abschnittsweise oder mit einer Bohrschnecke kontinuierlich an die Oberfläche befördert.

Die ÖNORM 12715 [117] gibt dazu folgende Gliederung der möglichen Bohrungen für Injektionen vor:

- Drehbohrverfahren
- Hammerbohrverfahren mit Außenhammer oder Imlochhammer
- Hammerbohrverfahren mit Verrohrung
- Greifer, Meißel und Bohr-Büchse hergestellte Bohrungen
- Rammen von Einpresslanzen
- Einrütteln von Verrohrungen oder Bohrgestängen

Die meisten Injektionsbohrungen werden mittels Spülbohrverfahren hergestellt. Es werden je nach den Randbedingungen Drehbohrungen, Hammerbohrungen (Imlochhammer oder Außenhammer) oder Kombinationsverfahren angewendet. In rambaren Böden, beispielsweise bei Lanzeninjektionen (siehe Abschnitt 3.4.2), werden Verrohrungen durch Rammen oder Einrütteln eingebracht. Durch die Bohrverfahren werden sehr unterschiedliche Richtungs- genauigkeiten erzielt. Bei horizontalen Bohrfächern sowie vertikalen Bohrungen ab 30 m Tiefe ist dies von besonderer Bedeutung. Die Genauigkeit wird bei vertikalen Bohrungen durch große Gestängedurchmesser, geringen Anpressdruck und optimale Abstimmung des Bohrstrangs und dessen Durchmesser positiv beeinflusst. Durchmesser von Manschettenrohrbohrungen liegen zwischen 100 und 150 mm. Im standfesten Fels werden Bohrungen mit einem Durchmesser zwischen 36 und 76 mm empfohlen. Bei Injektionsbohrungen im Fels ist eine Wasserspülung einer Luftspülung vorzuziehen. Damit können zu injizierende Klüfte und

Hohlräume geöffnet und gereinigt werden. Bei Druckluftspülung kann es hingegen zu einem Verstopfen der Struktur kommen.

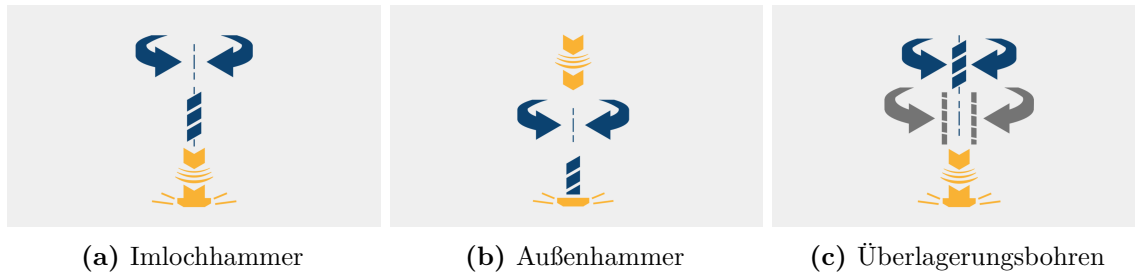
### 3.3.1 Drehbohrungen / Rotarybohrungen

Beim Spüldrehbohren wird der Bohrstrang durch einen Kraftdrehkopf angetrieben. Im Gegensatz dazu wird beim Rotarybohren dieser von einem feststehenden Drehtisch rotiert. Rotarybohrverfahren kommen aus der Tiefbohrtechnik und werden dementsprechend nur für sehr tiefe technische Bohrungen angewendet. Bei beiden Verfahren ist die Löseart des Gesteins jedoch drehend. Es werden Rotarybohrverfahren mit direkter Spülung (Druckspülung) und Rotarybohrverfahren mit indirekter Spülung (Saugbohren) sowie Sonderformen des Rotarybohrens, das Lufthebesystem, Counterflushbohrverfahren und Strahlsaugverfahren, unterschieden.

### 3.3.2 Hammerbohrungen / Drehschlagbohrungen

Außenhämmer mit Luftantrieb sind auf einer Bohrlafette geführt und bestehen aus einem Schlagteil mit Büchse und Schlagkolben, sowie einem Drehteil, der dem Gestänge die nötige Rotation verleiht. Bis zu einer Tiefe von 40 m arbeiten die Hämmer mit ca. 10 bar Druckluft und 500 bis 1500 U/min. Außenhämmer mit Hydraulikantrieb lassen sich durch den veränderlichen Kolbenhub besser an die Gesteinsverhältnisse anpassen. Der Druckluftbetrieb ist bei kleineren Stollenarbeiten und geringen Durchmessern weiterhin im Einsatz, während bei großen Bohrlöchern die Hydraulikhämmer vorzuziehen sind. Die Spülung und die Bohrkleinabfuhr können durch Wasser- oder Luftspülung erfolgen.

Beim herkömmlichen Überlagerungsbohren werden das Futterrohr und das Innengestänge gemeinsam von einem Hydraulikhammer angetrieben. Nachdem auf standfesten Fels getroffen wurde, kann das Bohrröhr abgesetzt werden. Danach wird nur durch das Innengestänge weitergebohrt. Damit die Futterrohre nicht gedreht werden müssen, bedient man sich der Exzentermethode. Der Freischnitt der Rohre wird dabei durch einen Exzentermeißel erzeugt, der einen größeren Außendurchmesser hat als das Futterrohr. Die Weiterentwicklung des Überlagerungsbohren stellt das Doppelkopfbohren dar. Bei Bohrungen über 30 m ist das Imlochhammerbohren dem Bohren mit Außenhammer vorzuziehen. Der Vorteil ist, dass große Bohrtiefen bis 150 m bei sehr hohem Bohrfortschritt unter genaueren Toleranzen als beim Außenhammer hergestellt werden können. Das Bohrprinzip besteht beim Imlochhammer aus einer drehschlagenden Bewegung. Der Bohrhämmer befindet sich bei diesem Verfahren am Ende des Bohrgestänges im Bohrloch und wirkt mit seiner Schlagenergie direkt auf die Bohrkronen. Bei der herkömmlichen Methode wird der Hammer durch Druckluft angetrieben. Die Druckluft wird über das Hohlbohrgestänge zugeführt und treibt den Hammer an, kühlt



**Abb. 3.4:** Bohrverfahren in der Injektionstechnik [105]

die Bohrkronen und steigt anschließend zwischen Bohrloch und Bohrgestänge nach oben. Durch die Luft wird das Bohrgut gleichzeitig ausgetragen. Die Rotation wird über den Drehkopf und das Innengestänge aufgebracht. Bohrdurchmesser ab 80 mm können mit diesem Verfahren hergestellt werden.

Das patentierte WASSARA- Imlochhammerbohren ist ein Tieflochhammer, der mit Wasserspülung angetrieben wird. Dieses Verfahren wird bei besonders harten und abrasiven Gesteinen angewendet.

### 3.3.3 Doppelkopfbohrungen

Für verrohrte Außenhammer- und Imlochhammerbohrungen sind zwei Drehantriebe notwendig. Der eine Antrieb dreht die Außenverrohrung in den Boden. Der zweite Antrieb dreht das Innengestänge des Tieflochhammers bzw. übt Drehschlagimpulse aus. Verstopfung des Ringraumes, durch den das Bohrgut transportiert wird, kann durch die gegenläufige Drehung der beiden Rohre verhindert werden. Bis Längen von 30 m werden außenliegende Bohrhämmer verwendet.

## 3.4 Injektionstechnik

Alle Bauverfahren lassen sich, abhängig von der angetroffenen Geologie und den Anforderungen der geologischen Planung, einem Verfahrensprinzip zuordnen. Beispielsweise kann eine Manschettenrohrinjektion etwa im Lockerboden wie auch im Festgestein eingesetzt werden. Abhängig von den eingesetzten Materialien und Injektionsmitteln kann die Injektion einem Verfahrensprinzip mit oder ohne Baugrundverdrängung zugeordnet werden. In der Injektionstechnik unterscheidet man folgende Bauverfahren:

- Manschettenrohrinjektion<sup>6</sup>
- Lanzeninjektionen
- Injektion über das Bohrrohr
- Injektion im unverrohrten Bohrloch (absteigende / aufsteigende Injektion)
- Mehrfachpacker-Manschettenrohrinjektion (MPSP)

Im Kapitel „Injektionen“, im Grundbautaschenbuch [169] werden die angeführten Injektionsverfahren der Art des Untergrundes und dem Verfahrensprinzip zugeordnet.

### 3.4.1 Manschettenrohrinjektion

In kohäsionslosen, körnigen Böden wird das Injektionsprinzip der Eindringinjektion angewendet. Beim Verfahrensprinzip der Poreninjektion dominiert das Bauverfahren der Manschettenrohrinjektion. Das anpassungsfähige Bauverfahren gliedert sich in fünf Phasen. Die Anordnung und die Komponenten einer Manschettenrohrinjektion sind der Abb. 3.5 zu entnehmen.

- **Herstellen des Bohrlochs** (Phase 1 - 2): Das verwendete Bohrverfahren richtet sich nach der Festigkeit des Baugrundes, sowie anderen baubetrieblichen Randbedingungen wie Bohrtiefe oder geforderte Genauigkeit. In Lockerböden wird eine verrohrte Bohrung durchgeführt, damit das Manschettenrohr im Schutz der Verrohrung eingebaut werden kann.
- **Einbau des Manschettenrohres und der Sperrflüssigkeit** (Phase 3): Manschettenrohre werden vor dem Injektionsvorgang eingebaut, um einen Einpresskörper zuverlässig in Abschnitten, sogenannten Passen, standardmäßig in einem Abstand von 33 cm, herstellen zu können. Eine Nachverpressung, unterschiedliche Abfolgen der Beaufschlagung sowie ein Einbau unterschiedlicher Injektionsmittel werden somit ermöglicht. Die Rohre selbst werden aus Kunststoff oder Stahl hergestellt

<sup>6</sup>In der Literatur auch als Ventilrohrverfahren angegeben [89, S. 235].

- **Auffüllen des Ringraumes mit Mantelmischung** (Phase 4): Das Manschettenrohr wird durch eine Mantelmischung im Bohrloch fixiert. Die Stützflüssigkeit wird bei geringen Drücken am tiefsten Horizont des Manschettenrohres eingebracht, bis es an der Oberfläche wieder austritt. Kurz danach oder gleichzeitig wird die Verrohrung ausgebaut. Dieses Sperrmittel sichert die Lage des Rohres und verhindert das spätere Aufsteigen des Injektionsguts im Ringraum. Dadurch wird die lokale Erzielung des geplanten Injektionsprinzips erreicht. Der geringe Zementgehalt der Mischung benötigt 24 Stunden bis 6 Tage Zeit um entsprechend auszuhärten.
- **Setzen des Packers und stufenweise Verpressen** (Phase 5): Das Setzen von Packern ermöglicht die positionsgenaue Errichtung des Injektionsköpers. Das Injektionsmittel tritt aus den mit Gummimanschetten verschlossenen Öffnungen aus und sprengt lokal die erstarrte Stützflüssigkeit auf. Danach wird in den umliegende Baugrund injiziert. Werden einzelne Tiefenstufen mehrmals angesprochen oder eine unregelmäßige Injektionsreihenfolge gewählt, so muss das Manschettenrohr zwischen den einzelnen Vorgängen gespült werden.

Manschettenrohrinjektionen werden in feinkörnigen und bindigen Böden für Aufbrech- und Hebungsinjektionen verwendet. Dabei werden im Regelfall in vertikalen Schächten horizontale Manschettenrohrfächer angeordnet. Eine Verpressung erfolgt oftmals auch in Kombination mit dem Tunnelvortrieb, um Setzungen durch kontrollierte Hebungsinjektion vorzubeugen.

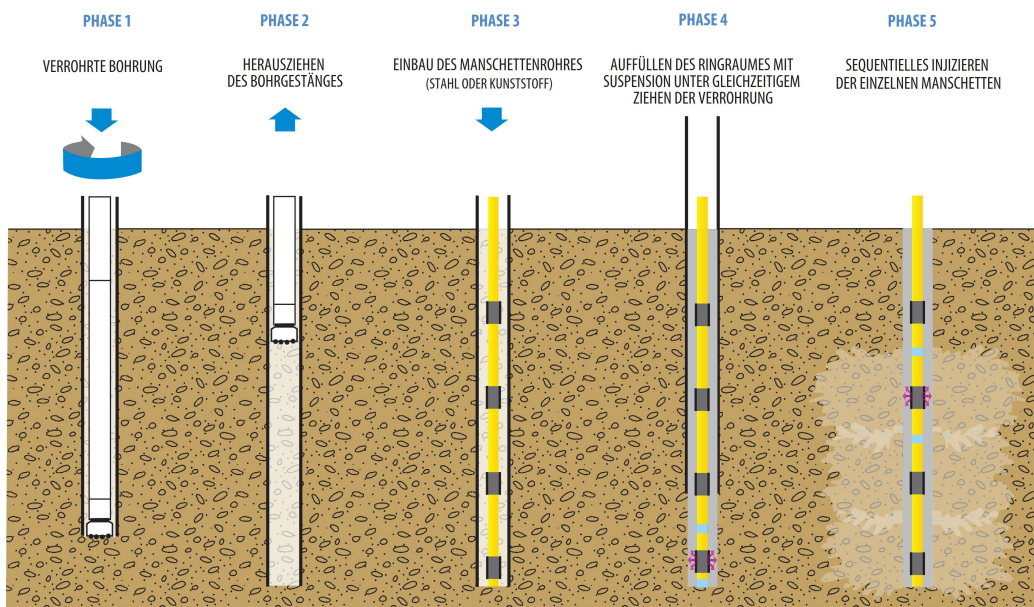


Abb. 3.5: Manschettenrohrinjektion mit Doppelpacker [154]

### 3.4.2 Lanzeninjektion

In besonders locker gelagerten Böden oder zur Auffüllung von Hohlräumen werden Lanzeninjektionen eingesetzt. Folgende Verfahrensschritte sind in rambbaren Böden bei der Herstellung einer Sohleninjektion notwendig:

- Einrammen oder Einrütteln der Injektionsspitze: Ein Rüttelventil mit daran befestigtem Injektionsschlauch wird im Rammrohr bis zur vorgesehenen Tiefe gerüttelt.
- Ziehen des Rammrohres: Das Rammrohr wird rüttelnd wieder gezogen. Der entstehende Ringraum um den Injektionsschlauch wird mit Boden verfüllt und wieder verdichtet.
- Injizieren über das Fußventil.

Bei nicht rambbaren Böden sind folgende Verfahrensschritte notwendig:

- Herstellen verrohrter Kleinlochbohrungen: Bohrungen mit einem Durchmesser von 80 bis 150 mm werden bis zur geplanten Tiefe hergestellt.
- Einbringen der Mantelmischung und Ziehen des Bohrrohres: Die Mantelmischung aus Wasser, Zement und Bentonit wird verfüllt, um die stützende Wirkung des gezogenen Bohrrohres zu übernehmen.
- Einbau der Injektionsleitung mit den Einstellventilen.
- Injizieren über das Einstellventil.
- Eventuell Spülen der Injektionsleitung für weitere Beaufschlagung.

### 3.4.3 Injektionen über das Bohrrohr

Bei Hohlraumverfüllungen in Karsthöhlen und bei Bergbausanierungen im Gebirge werden je nach Geologie verrohrte und unverrohrte Bohrungen hergestellt und der Hohlraum über das Bohrloch ausgefüllt. Neben dem Bauverfahren der Lanzeninjektion kommt es zur Anwendung der Bauverfahrens „Injektion über das Bohrrohr“. Dieses Bauverfahren zeichnet sich dadurch aus, das Injektionsgut in einem Arbeitsschritt gleichzeitig mit der Herstellung des Bohrloches in den Boden eingebracht wird. Das Injektionsgut wird dabei über das Bohrrohr oder Bohrwerkzeug selbst eingebracht. Beim Verfahrensprinzip der Verdichtungsinjektion in vorwiegend grobkörnigen Böden wird dieses Bauverfahren angewandt. Die notwendigen Arbeitsschritte setzen sich wie folgt zusammen:

- Abteufen des Injektionsrohres mit einem Bohrgerät oder einer Ramme.

- Einbringen des Injektionsmörtels über das unten offene Gestänge.
- Schrittweises Ziehen oder Abteufen des Gestänges und erneutes Einbringen des Mörtels.

#### 3.4.4 Injektion im unverrohrten Bohrloch

Injektionen im Fels haben vorwiegend das Ziel, eine dichtende Wirkung zu erzeugen und Bergwasser abzuhalten. Im standfesten Gebirge werden die Verpresswege mittels unverrohrter Drehschlagbohrung nach Abschnitt 3.3.2 hergestellt, um das Verfahrensprinzip der Kluft- und Kontaktinjektion anzuwenden. Nach der Herstellung des Bohrloches für die gesamte Verpressstrecke wird die Injektion vom Bohrlochtiefsten in Abschnitten von 1,5 m bis 6,0 m von unten nach oben durchgeführt. Dieses Bauverfahren wird als aufsteigende Injektion bezeichnet<sup>7</sup>, die in Abb. 3.6a<sup>8</sup> abgebildet ist. Zu Beginn wird ein Standrohr installiert und die Bohrung hergestellt. Für die schrittweise Verpressung der Injektion wird ein Einfachpacker verwendet, der die Verpressstrecke vom Bohrlochtiefsten, bzw. der letzten Injektion, nach oben begrenzt. Als Voraussetzung für dieses Verfahren muss das Bohrloch über die gesamte Länge ohne eine Stützflüssigkeit standfest sein.

Im gebräuchlichen Gebirge wird das Bohrloch abschnittsweise hergestellt, um das Nachbrechen der Bohrlochwandung zu verhindern. Injiziert wird absteigend, von oben nach unten. Dieses Verfahren zeichnet sich somit durch die Wechselwirkung zwischen Bohren und Injizieren aus. In Abb. 3.6b werden die Arbeitsschritte visualisiert, die eine absteigende<sup>9</sup> Injektion beschreiben. Zu Beginn wird ein Standrohr installiert und die erste Verpressstrecke aufgebohrt. Nach dem Ziehen der Bohrvorrichtung wird der Einfachpacker gesetzt und das gebohrte Loch vollständig aufgefüllt. Bevor der Bohrvorgang von der Oberfläche bis zu einem tieferen Horizont wiederholt werden kann, muss die Aushärtung des Injektionsmaterials abgewartet werden. Danach bohrt die Mannschaft die erhärtete sowie die neue Injektionsstrecke auf, um den Injektionsvorgang fortzusetzen. In der Abb. 3.6b sind die Arbeitsschritte der Bohrungen in blauen und die Vorgänge der Injektionen mit gelb-orangen Farben hervorgehoben.

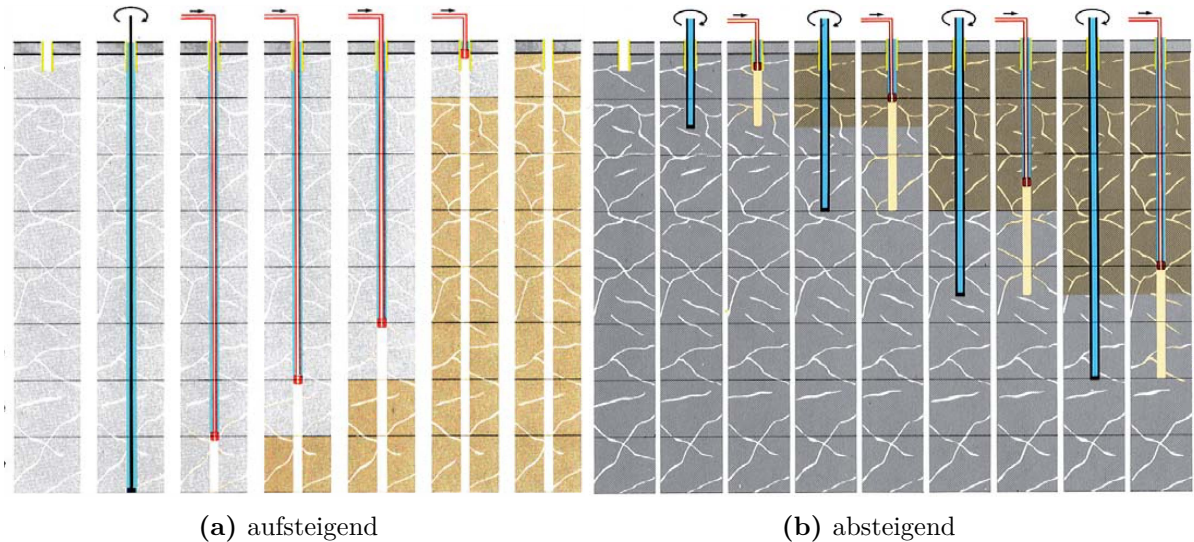
#### 3.4.5 Mehrfachpacker-Manschettrohrinjektion

Die Sonderform der Manschettrohrinjektion mit Sackpacker-Ventilrohren (MPSP) stellt eine Alternative zur absteigenden Injektion dar. Eine Ummantelung wie bei normalen Manschettrohren ist im Fels nicht zielführend. Die notwendige Verformung der Bohrlochwand zum Aufbrechen der Mantelmischung ist im Fels nicht gegeben. Statt einer Mantelmischung zwischen dem Ventilrohr und dem umliegenden Fels, sind einzelne Manschetten im Abstand

<sup>7</sup>Im internationalen Raum werden die Begriffe „ascending“, „up-stage“ oder „bottom-up“ verwendet.

<sup>8</sup>Die aufeinanderfolgenden Arbeitsschritte sind von links nach rechts zu lesen.

<sup>9</sup>Im internationalen Raum als „descending“, „down-stage grouting“ oder „top-down“ bezeichnet.



**Abb. 3.6:** Injektionen im unverrohrten Bohrloch [154]

zwischen 1,5 m und 3,0 m mit Gewebetaschen ausgestattet. Bei der Installation werden diese Gewebetaschen nach dem Einstellen des Ventilrohres durch Positionierung von Doppelpacker und Einbringen einer Suspension aufgeblasen. Einzelne Injektionsabschnitte werden dadurch separiert, ohne dabei eine Zirkulation des Injektionsgutes bis zur füllenden Kluft zu behindern [13].

### 3.5 Leistungswerte für Bohr- und Injektionstechnik

Jacob et al. [77] geben an, dass die Kalkulation und damit die verbundene Leistungswerte keine generelle Vergleichbarkeit in unterschiedlichen Projekten zulassen, da eine starke Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen und Bodenverhältnissen besteht. Daher greifen Spezialtiefbauunternehmen auf Erfahrungen von Baustellen mit ähnlichen Randbedingungen zurück. Mit sogenannten Alternativangeboten versuchen Unternehmen in den dynamischen Planungsprozess möglichst frühzeitig einzugreifen, um ihre Erfahrungen einzubringen sowie das Projektrisiko zu minimieren.

Bei größeren Injektionskampagnen ist es gebräuchlich, eigene Mannschaften für Bohrlöcher zusammenzustellen. Ein Trupp besteht in der Regel aus einem Bohrmeister und ein bis zwei Hilfskräften. Werden Spülbohrungen mit Betonit hergestellt, wird eine Arbeitskraft für die Spülpumpe eingesetzt. Die Wasserspülung kann zumeist durch den Bohrmeister automatisch bedient werden. Zeitversetzt werden danach die Injektionen durchgeführt. Der Personalbedarf pro Anlage mit drei Pumpen setzt sich aus einem Mischmeister und Pumpenfahrer sowie ein bis zwei Arbeitern zum Setzen der Packer zusammen. Sofern die Mischstationen automatisch betrieben werden können, entfällt der Mischmeister. Für Baugrundverbesserungen gibt Maybaum [101] die kalkulatorischen Leistungswerte für die Injektionen mit Manschettenrohren an.



**Tab. 3.1:** Bandbreiten von Leistungswerten für Bohrtechnik

Verfahren	Baugrund	inkludierte Tätigkeiten	LW in m/h
Drehbohrung als Spülbohrung	Lockerboden	Einbau von Injektionslanzen bzw. Manschettenrohren	5–40
Einrütteln von Verrohrung oder Bohrgestänge			25–65
Hammerbohrung	Festgestein	mit Verrohrung	5–17
		ohne Verrohrung	5–25

Für die Herstellung des Bohrlochs und den Einbau der Manschettenrohre ist eine Bandbreite von 60 bis 100 m pro Tag realistisch. Für das stufenweise Verpressen kann ein kalkulatorischer Mittelwert von 1,5 m<sup>3</sup>/h beim Einsatz einer Anlage mit drei Pumpen erreicht werden [101, S. 254].

Bauunternehmen greifen für ihre Angebotskalkulationen auf die Bandbreiten nach Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 zurück. Die Leistungswerte wurden innerhalb von Fachgesprächen mit Kalkulanten von unterschiedlichen Spezialtiefbauunternehmen verifiziert, und sollen als Größenordnung verstanden werden. Die letztlich angesetzten Leistungswerte sind von den Randbedingungen, wie dem Baugrund, abhängig. In den Bandbreiten sind die Zeiten für Umsetzen von Injektionspunkt zu Injektionspunkt bzw. von Bohrloch zu Bohrloch enthalten, sofern von einem kontinuierlichen Arbeitsverlauf ausgegangen werden kann. Umsetzarbeiten des Bohrgeräts von Bohrloch zu Bohrloch betragen im Regelfall 5 bis 10 min. Bei Umsetzen der Packer für abschnittsweise Injektionsarbeiten werden 3 bis 5 min angesetzt. Für den Einbau von Injektionslanzen oder Manschettenrohren berechnen Bauunternehmen in der Regel eine Zeit von 0,5 min/m. Bei einer Schicht von zehn Stunden pro Arbeitstag werden in der Kalkulation eine halbe Stunde für Arbeitsbeginn sowie 1,5 h am Schichtende für Reinigungsarbeiten abgezogen. Bei Lanzeninjektionen, wie beim Herstellen von Dichtsohlen, können im Vergleich zu Manschettenrohrinjektionen nach Tabelle 3.2 bis zu sechs Pumpen gleichzeitig durch eine Mannschaft betrieben werden. Dies führt zu vergleichsweise geringen Lohnkosten und Bauzeit für die Injektionsmaßnahmen. Im unverrohrten Bohrloch werden im Festgestein vier bis 18 l/min verpresst. Jedoch kann dieser Wert bei großen Klüften und Hohlräumen auf die Maximalleistung der Pumpe von bis zu 100 l/min ansteigen. Bei der Methode im unverrohrten Bohrloch ist nach Abb. 3.6b durch die abwechselnden Arbeitsvorgänge Bohren und Injektion geprägt. Injektionsrate und Bohrrate sind zwar in der gleichen Bandbreite, jedoch muss für Wartezeiten und das häufige Umsetzen bis zur dreifachen Arbeitszeit kalkuliert werden.

Tab. 3.2: Bandbreiten von Leistungswerten für Injektionstechnik

Verfahren	Baugrund	Anlagengröße	LW je Pumpe in l/min
Manschettenrohrinjektion	Lockerboden	max. 3 Pumpen	4–20
Lanzeninjektion		max. 6 Pumpen	6–20
Injektion über das Bohrrohr		1 Pumpe	10–50
im unverrohrten Bohrloch	Festgestein	max. 3 Pumpen	4–18
MPSP		max. 3 Pumpen	2–15

## 3.6 Komponenten in der Injektionstechnik

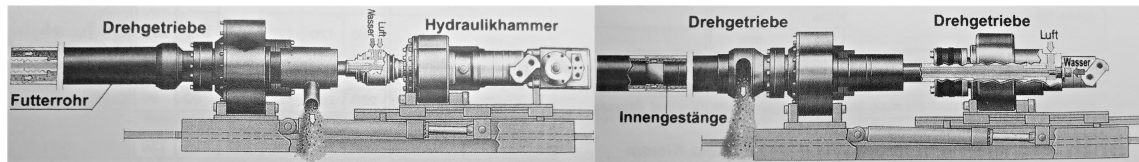
Die wichtigsten Geräte und Komponenten auf Injektionsbaustellen werden in diesem Kapitel dargestellt. Für das Datenmanagement bestimmend ist vor allem die Sensortechnik, da dadurch eine automatische Generierung der Daten ermöglicht wird.

### 3.6.1 Bohrgeräte

Die Baugerätetechnik für Bohr- und Injektionsarbeiten im Zusammenspiel mit der angeschlossenen Sensortechnik macht den maschinellen Herstellungsprozess erst möglich und steht somit am Beginn der Datenaufnahme für das Berichtswesen sowie weitere Analysen. Bohranlagen werden nach der Wirkungsweise in Geräte mit Kraftdrehköpfen, Bohrhämmern oder Doppelkopfbohranlagen unterschieden [131].

**Kraftdrehköpfe (KDK bzw. HDK)** Kraftdrehköpfe teilen werden in pneumatische und hydraulische Bohrgetriebe eingeteilt. Ihre Wirkungsweise ist drehend. Pneumatische Bohrgetriebe sind noch selten im Einsatz. Hydraulische Bohrgetriebe verfügen zumeist über drei Schaltstufen, die Drehmomenten bis zu 140 kN m erreichen.

**Bohrhämmer (PBH bzw. HBH)** Diese werden in pneumatische und hydraulische Bohrhämmer unterteilt. Ihre Wirkungsweise ist schlagend, drehend und drehschlagend. Pneumatische Bohrhämmer werden je nach Gewicht in 3 Klassen eingeteilt. Leichte Bohrhämmer bis 22 kg werden nur für kurze Bohrungen bis zu einem Durchmesser von maximal 40 mm eingesetzt. Mittelschwere Bohrhämmer bis zu einem Gewicht von 39 kg werden hauptsächlich für Nagelherstellungen in Verbindung mit einer Bohrlafette bei Bohrkronendurchmessern bis etwa 90 mm angewendet. Schwere Bohrhämmer bis zu einem Gewicht von 150 kg finden



(a) DKB mit Drehgetriebe und Hydraulikkammer

(b) DKB mit zwei Drehgetrieben

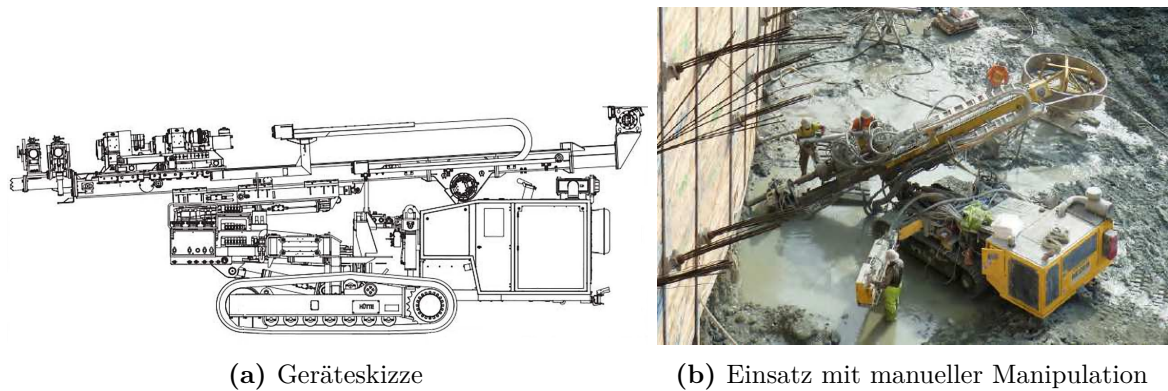
**Abb. 3.7:** Doppelkopf-Bohranlagen [131]

ihre Anwendung in Kombination mit einer Bohrlafette vorwiegend für Ankerbohrgeräte. Die hydraulischen Bohrhämmer werden klassifiziert nach dem maximal verfügbaren Drehmoment und dem eingebauten Kolbengewicht. Die Schlagenergie sowie das Drehmoment werden vom Einsteckende auf das Bohrgerät übertragen. Es sind Ausführungen mit ein oder zwei Motoren möglich. Hydraulikhämmer kommen bei Universalbohrgeräten zum Einsatz.

**Doppelkopfbohranlagen (DKB)** Diese Anlagen sind eine Kombination von Kraftdrehkopf und Hydraulikkammer, oder zwei Kraftdrehköpfen, wie Abb. 3.7 zeigt. Der zum Bohrloch nähere Antrieb dient der Mitnahme der Verrohrung, während der hintere Antrieb das Innengestänge und das jeweilige Abbauwerkzeug betreibt. Diese Wirkungsweise hat sich durchgesetzt, da sie in allen Untergründen einsetzbar ist. Durch die Kombination von Bohrgetriebe und Bohrhammer lassen sich alle Bohrmethoden einsetzen.

Für die Injektionsbohrungen werden Ankergeräte, Drehbohrgeräte wie auch Universalbohrgeräte eingesetzt. Als Trägergerät kommen grundsätzlich alle gängigen Geräte für Ramm- und Bohrarbeiten zum Einsatz. Als Laufwerke werden, außer bei Tunnelbohrgeräten, Raupenfahrwerke verwendet. Der Steuerstand ist ausschwenkbar angeordnet und zumeist mit einer Fernbedienung bestückt. Für die Stellung der Injektionsbohrungen im Raum ist es wichtig, dass die Bohrlafette geschwenkt werden kann. Abhängig von der Ausrüstung der Geräte und der Stellung der Lafette können unterschiedliche Schwenkbereiche erreicht werden. Die Zusatzausrüstung eines Hebekrans ist bei Bohrungen mit Außen- und Innengestänge sinnvoll, da die manuelle Manipulation, wie in Abb. 3.8b, des Ein- und Abhebens, zwei Mann erforderlich macht. Beim Doppelkopfbohren mit Adaptiton eines Gestängemagazins ist eine „Ein-Mann Bedienung“ möglich. Das Handling wird von zwei hydraulischen Greifern und einem Manipulator übernommen. Beispielhaft ist in Abb. 3.8a ein Universalbohrgerät von Hütte [71] mit einer Doppelkopfbohranlage dargestellt. An der Bohrlafette sind eine hydraulische Zentrier- eine Abfang- sowie eine Klemm- und Brechvorrichtung angebracht. Danach ist die Doppelkopfbohrvorrichtung auf einem Schlitten angebracht. Das Trägergerät ist auf einem Raupenfahrwerk montiert.

Die Bohrspülung wird durch die Medien Luft oder Wasser übernommen. Bei Luftspülung werden Kompressoren eingesetzt. Kommt es zur Anwendung der Wasserspülung, so werden in den meisten Fällen Spülpumpen verwendet, die als Mehrkolbenpumpen ausgeführt sind. Die standardisierte Ausführung besteht aus drei Kolben. Die erforderlichen Förderleistungen der



**Abb. 3.8:** Universalbohrgerät [71]

Pumpe richten sich nach der Größe des Bohrloches und Bohrgutes. Die Spülgeschwindigkeit im Bohrloch wird demnach so gewählt, dass diese mindestens 10 % über der Absinkgeschwindigkeit des abgebauten Materials liegt. Bei der Anwendung eines Wassara-<sup>10</sup> Tieflochhammers sind für den Abbau und den Betrieb des Hammers Hochdruckpumpen mit Förderleistungen bis 570 l/min und Betriebsdrücken bis 200 bar im Einsatz.

### 3.6.2 Mischanlagen

Die einzelnen Baustoffe werden auf der Baustelle zu einem fertigen Baustoff vermengt. Dabei kommen Containereinheiten zum Einsatz, die Mischanlagen, Registriergeräte und Pumpen zusammenfassen. Die Dosiereinheiten, Mischer und Rührwerke und der Vorratsbehälter für das fertige Injektionsgut werden als Mischanlage bezeichnet. Für Suspensionen werden Kolloidmischer eingesetzt, die bei Geschwindigkeiten einer Wirbelradscheibe von bis zu 1.200 U/min die einzelnen Bestandteile vermengen. Eine vollständige Vermischung ist gegeben, wenn alle Flüssigkeiten miteinander vermengt, die Oberflächen aller Feststoffpartikel mit Flüssigkeit benetzt und alle Luftblasen verdrängt wurden. Bei der Verwendung von Feststoffen, wie Zement, Feinzement, Sand und Bentonit, werden spezielle Wirbelradscheiben eingesetzt, für die Herstellung chemischer Injektionsmittel reichen einfach konzipierte Flügel [101]. Zwischen dem Mischer und den Injektionspumpen wird ein Vorratsbehälter angebracht, in dem das fertig gemischte Injektionsgut gepumpt wird. Der Vorratsbehälter wird abhängig von der Pumprate konzipiert und befüllt, damit der Verarbeitungszeitraum des Injektionsmittels nicht überschritten wird. Der Dosier- und Mischvorgang ist bei zementbasierten Materialien zumeist per Knopfdruck vollautomatisch.

<sup>10</sup>Dieser Begriff ist durch das Unternehmen LKAB geschützt.

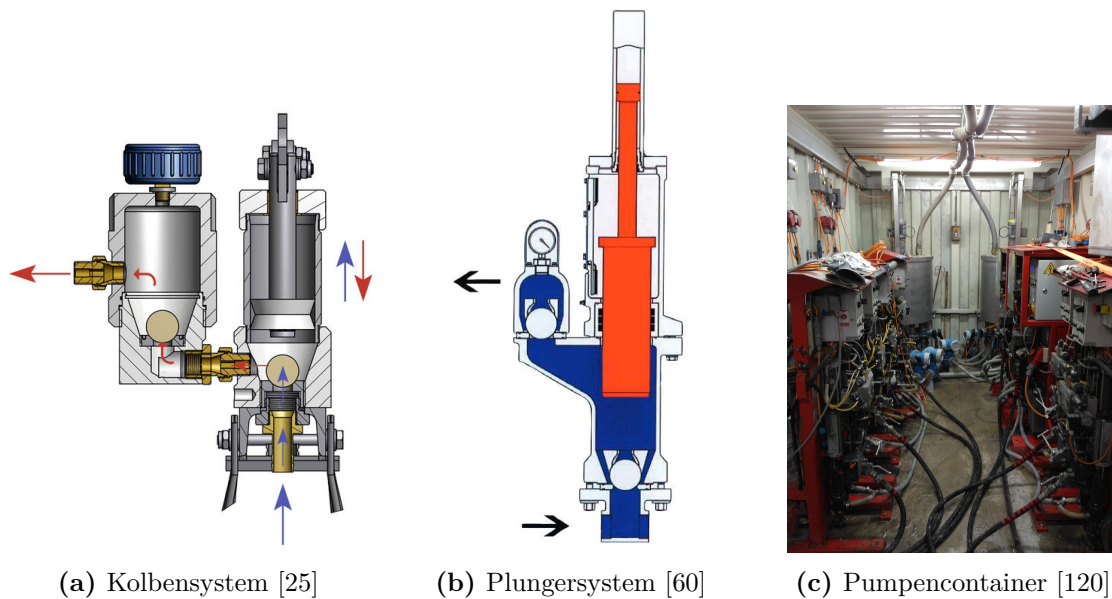


Abb. 3.9: Injektionspumpensysteme

### 3.6.3 Injektionspumpen

Injektionspumpen müssen in der Lage sein, Druck und Fördermenge unabhängig voneinander zu steuern. Die Abbruchkriterien arbeiten in einem geringen Toleranzbereich, den die Pumpe gewährleisten muss. Drücke von 1 bis 100 bar müssen bei Leistungen bis zu  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  erreichbar sein [60]. Als Injektionspumpen kommen vorwiegend Kolbenpumpen mit elektro-hydraulischem Wirkschema zum Einsatz [89]. In den meisten Fällen werden doppelt wirkende Kolbenpumpen eingesetzt, um Druckstöße zu begrenzen. Bei Hochdruckinjektionspumpen kommen Plungerpumpen zum Einsatz. Diese Tauchkolbenpumpen sind im Vergleich zu normalen Kolbenpumpen wartungsärmer, da der Tauchkolben nur über eine außenliegende Stopfbuchse abgedichtet wird. Abb. 3.9a und Abb. 3.9b verdeutlichen die Unterschiede der zwei Systeme. In Abb. 3.9c ist ein Pumpencontainer dargestellt, im Rückraum sind zwei Vorratsbehälter sichtbar, die acht Injektionspumpen versorgen. Diese Container können schnell eingerichtet werden und haben sich bei Spezialtiefbau-Unternehmen etabliert [120].

### 3.6.4 Packer

Zur Begrenzung der Injektionsstrecke im Bohrloch kommen Packer zum Einsatz. Grundsätzlich wird zwischen Einfach- und Doppelpackern unterschieden. Einfachpacker schließen das Bohrloch in eine Richtung ab, sodass die Verpresstrecke zwischen Sohle und Packer definiert ist. Doppelpacker hingegen besitzen zwei Dichtungselemente und werden vorrangig für Manschettenrohrinjektionen verwendet, um gezielte Ventilöffnungen anzusprechen. Die am häufigsten verwendeten Systeme werden hydraulisch oder pneumatisch verspannt und

gelöst [89]. Für temporäre Bohrlochverschlüsse kommen zudem Schraubpacker zum Einsatz, die mechanisch verspannt werden. Die Dichtigkeit des Packers ist wesentlich für den Injektionserfolg, weshalb die Abdichtungsfläche und die aufgebrachte Verspannung auf die späteren Injektionsdrücke angepasst werden müssen. Der Setzvorgang des Packers ist in der Prozesszeit „Umsetzen“ enthalten und reduziert die Nettoinjektionszeit.

### 3.6.5 Sensortechnik

Sensoren nehmen die wesentlichen digitalen Messgrößen im Injektionsprozess auf und stehen am Beginn des Datenmonitoringprozesses. Jedes Messgerät besteht dabei im Wesentlichen aus zwei Teilen, dem eigentlichen Messaufnehmer und dem Messumformer. Die Steuerungseinheiten greifen auf die Sensorik zu und sind mit den Datenerfassungseinheiten gemeinsam verbaut. Diese werden in Abschnitt 4.3 ab Seite 77 erläutert.

**Durchflusssensoren** Diese Sensoren sind an den Injektionspumpen angebracht, damit die Rate des zu verpressenden Injektionsguts ständig überwacht wird. Als Messgröße erfasst der Sensor die Geschwindigkeit des durchströmenden Mediums, entweder auf die Masse oder auf das Volumen bezogen. Durch Multiplikation mit dem Innendurchmesser der Leitung, wird auf den Massen- oder Volumenstrom geschlossen. Die Messergebnisse liefern die Basis für Abrechnung von Mengen, da vom erfassten Volumen der Injektion aufgrund des Mischungsverhältnisses auf die Massen rückgeschlossen werden kann. Die wichtigsten fünf Verfahren sind volumetrische Messungen, Wirkdruckverfahren, magnetisch-induktive Messungen, Coriolis-Messung und Ultraschall [65]. Kalorische Durchflussmessungen und Wirbelfrequenzmessungen kommen für feststoffbeladene Flüssigkeiten nicht zum Einsatz.

Bei den volumetrischen Messungen werden in der Injektionstechnik vorrangig Messflügel und Schwebekörper eingesetzt. Die Messflügel sind als Turbinenzähler oder Axial-Flügelradzähler ausgeführt und werden durch das strömende Medium in Rotation versetzt. Kommt ein Schwebekörper zum Einsatz so muss das Messgerät senkrecht angeordnet werden. Insbesondere für kleine Messbereiche geeignet, wird ein Widerstandskörper von unten nach oben umströmt. Durch das Kräftegleichgewicht stellt sich eine strömungsabhängige Höhe des Schwebekörpers ein. Eine elektronische Positionserfassung und digitale Auswertung ermöglichen einen direkten Schluss auf die Geschwindigkeit des Mediums. Die volumetrischen Messungen zeichnen sich durch einen einfachen und günstigen Aufbau aus. Außerdem sind die Prinzipien unabhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des Mediums [99].

Das Wirkdruckverfahren<sup>11</sup>, abgebildet in Abb. 3.10c, misst die Veränderung der Strömung eines Stoffes, die sich durch gezielte Verengung eines Querschnittes ergibt. Durch den gemess-

<sup>11</sup>Nach DIN 19201 als Differenzdruckverfahren bezeichnet.

senen Differenzdruck vor und nach der Verengung wird auf den Volumenstrom geschlossen [65].

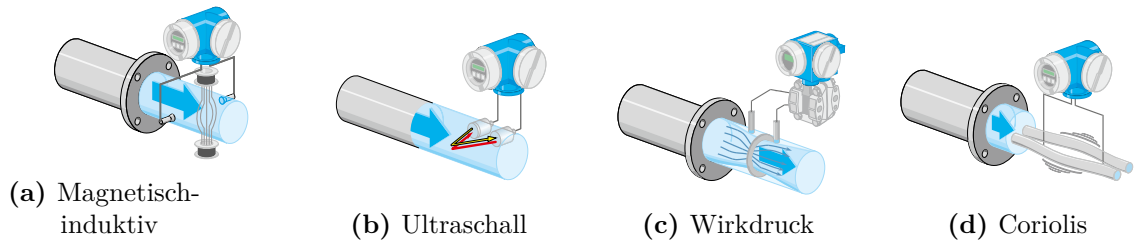
Die magnetisch-induktiven Durchflussmessungen sind bei Injektionsmittel die zuverlässigsten und am weitesten verbreiteten Sensoren. Sie werden in den einschlägigen Normen und Richtlinien empfohlen. Das Messprinzip bedient sich der elektromagnetischen Induktion. Der Sensor baut ein elektromagnetisches Feld normal zur Strömungsrichtung auf, das von den geladenen Teilchen der Flüssigkeit durchquert wird. Nach dem Faraday'schen Induktionsgesetz wird eine elektrische Spannung induziert, die wiederum direkt proportional zu Fließgeschwindigkeit ist [65]. Das Messprinzip, abgebildet in Abb. 3.10a, ist unabhängig von Druck, Dichte, Temperatur und Viskosität und damit im Baustellenalltag besonders gut geeignet [103]. Bei geringen Flussgeschwindigkeiten und Leitfähigkeiten<sup>12</sup> können diese Sensoren nicht angewendet werden.

In der Injektionstechnik selten zur Anwendung kommende Coriolis-Durchflussmesser ermöglichen die gleichzeitige Messung des Massenflusses, der Dichte und Temperatur. Die Messung nach dem Coriolis-Prinzip beruht auf dem Entstehen einer Kraft, die quer zu der Bewegungsrichtung des Mediums entsteht, sofern das Rohr relativ zu der Bezugsachse rotiert wird. In einem Messgerät befinden sich ein oder mehrere U-förmige Messrohre die durch eine Erregerspule in eine Schwingung um die unausgelenkte Rohrachse versetzt werden. Das Fluid, das durch die Rohre strömt, widersetzt sich dieser Schwingung und versetzt das Messrohr in eine Schwingung entlang des Rohres. Die Phasenverschiebung an den Senoren im Ein- und Auslauf sind ein direktes Maß für den Massenstrom. Der Aufbau des Sensors ist in Abb. 3.10d dargestellt. Sowohl die Dichte als auch die Durchflussmenge werden unabhängig voneinander durch die Rohrschwingung erfasst. Das Messprinzip wird in der Industrie seit den 1980er Jahren eingesetzt und eignet sich für Kleinstmengen und pulsierende Strömungen. Die Genauigkeit und die Erfassung von zusätzlichen Messgrößen ist ein Vorteile zum magnetisch-induktiven Durchflussmesser [15].

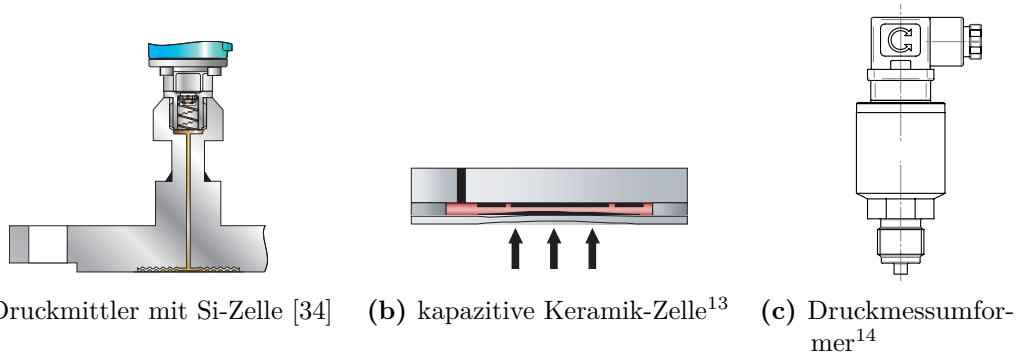
Ultraschallgeräte messen mittels akustischer Wellen die Geschwindigkeit des strömenden Mediums. Dazu können unterschiedliche Verfahren wie die Laufzeitmessung, das Driftverfahren, die Doppler-Messmethode oder das Reflexionsprinzip [65, S. 284] zum Einsatz kommen. Bei der Laufzeitmessung werden zwei Messsonden außen auf die Rohrleitung montiert. Dabei senden und empfangen die Sonden abwechselnd die Ultraschallsignale. Aus der Differenz der gemessenen Laufzeiten kann die Mediumsgeschwindigkeit berechnet werden. Beim Reflexionsprinzip, das in Abb. 3.10b abgebildet ist, liegen sich Sender und Empfänger nicht gegenüber.

Bei nicht leitenden Materialien, insbesondere bei chemischen Injektionsmitteln, werden mittels Näherungsschalter bei Kolbenpumpen die Hübe gezählt. Das Volumen ergibt sich über die Anzahl der Hübe. Der maximale Messfehler ist das Volumen eines Kolbenhubs.

<sup>12</sup>  $\leq 1\mu S/cm$  nach [65]



**Abb. 3.10:** Messprinzipien bei Durchflussmessung in der Injektionstechnik [35]



**Abb. 3.11:** Prinzipien und Ausführungsformen von Drucksensoren in der Injektionstechnik

Die Hubzählung wird als zuverlässige Methode bei untergeordneten Injektionstätigkeiten weiterhin verwendet.

**Drucksensoren** Druckmessgeräte formen die physikalische Größe Druck ( $p = \text{Kraft}/\text{Fläche}$ ) in ein elektronisches Signal um. Deshalb werden diese Sensoren auch als Druckmessumformer oder Transmitter bezeichnet. Es werden vorwiegend indirekte Messverfahren eingesetzt, die eine Verformung eines Körpers unter Druck messen. In der Injektionstechnik wird immer der Absolutdruck oder Überdruck in der Injektionsleitung gemessen. Unter Injektionsdruck versteht man jenen Druck der am Bohrlochmund wirkt, der Injektionspumpendruck wird im Gegensatz dazu direkt am Pumpenauslass gemessen.

Drucksensoren sind zumeist mit einer Membran ausgestattet, auf die der zu messende Druck wirkt. Die Durchbiegung ist ein Maß für den Druck und kann durch unterschiedliche Prinzipien gemessen werden. Als Membran kommen zumeist Silizium-Edelstahl<sup>15</sup> oder Keramiksensoren<sup>16</sup> zum Einsatz [34]. Bei abrasiven Injektionsmitteln ist es wichtig, dass die Membran des Druckmessumformers von der umgebenden Flüssigkeit geschützt wird, da diese zerstörend auf das Bauteil wirkt [99]. Es kommen deshalb bei Zementsuspensionen Druckmittler zum Einsatz. Der zu messende Druck wirkt auf die Prozessmembran des Mittlers.

<sup>13</sup>Absolutdruckzelle DAC-341, [www.anderson-negele.com](http://www.anderson-negele.com)

<sup>14</sup>Erscheinungsform eines Druckmessumformers mit kapazitiver Keramikmesszelle, [www.manometer-thermometer.de](http://www.manometer-thermometer.de)

<sup>15</sup>höhere Druckbereiche [99]

<sup>16</sup>niedrigere Druckbereiche [99]



Ein Druckmittlerfüllöl überträgt den Druck an die Membran des Sensors, wie in Abb. 3.11a dargestellt.

Die Veränderung der Membran wird durch unterschiedliche physikalische Prinzipien gemessen. In der Injektionstechnik finden sich vor allem induktive, kapazitive, piezoresistive und ohm'sche Prinzipien wieder. Bei der magnetoelastischen Messung wird ein Stab aus einem magnetischen Material in einer Spule mit dem Druck beaufschlagt. Durch die Längenänderung wird eine Änderung der Induktivität in der Spule erzeugt, welche ein Maß für die wirkende Kraft ist. Die kapazitive Messung ist sehr empfindlich und beruht auf der abstandsabhängigen Kapazität eines Kondensators. Diese wird in Form einer Elektrode und der elektrisch isolierten Membran gebildet, wie in Abb. 3.11b gezeigt ist. Die druckabhängige Auslenkung der Membran bewirkt eine lineare Änderung der Kapazität, welche wiederum ein Maß für den Druck ist.

Die piezoelektrische Messung beruht auf dem Prinzip, dass in bestimmten Materialien auf Druck Ladungen induziert werden, die in ein geeignetes Ausgangssignal umgewandelt werden können. Piezoresistive Messungen bedienen sich Widerständen auf Halbleiterbasis. Der spezifische Widerstand ist bei diesen Materialien sehr stark von der Dehnung abhängig. Die elektrische Widerstandsänderung wird über Dehnmessstreifen erfasst und ist wiederum ein Maß für den Druck. Ein gebräuchlicher Druckmessumformer ist in Abb. 3.11c dargestellt. Diese Ausführungsform hat eine keramische Membran ohne Druckmittler mit kapazitivem Messprinzip verbaut und wird für chemische Injektionsmittel angewendet.

### 3.6.6 Injektionsmittel

Die geologischen Bedingungen und der Zweck des Injektionsverfahrens bestimmen die Auswahl des richtigen Injektionsmittels<sup>17</sup>. Im Baustellenalltag werden die Mittel in zementbasierte, chemische und sonstige Injektionsmittel unterschieden. Normen und Fachbücher nehmen eine detailliertere Einteilung vor. In der Norm [117] findet sich die Gliederung in Lösungen, Suspensionen und Mörtel, die um die Gruppe der Emulsionen [140] ergänzt wird.

Unter Suspension wird die feine Verteilung eines nicht gelösten Stoffes in einer Trägerflüssigkeit verstanden. Dabei handelt es sich in der Injektionstechnik um Suspensionen auf Zementbasis, die als häufigste Injektionsmittel verwendet werden. Die Zusammensetzung besteht aus Wasser, dem hydraulischen Bindemittel Zement oder Feinstzement und geringen Zusätzen wie Bentonit. Die Bindemittel bestehen nicht nur aus reinem Zement, da diesen vielfach Zusatzstoffe wie Hüttensand oder Flugasche beigemischt sind. Die Zusatzstoffe sind in der Stoffraumrechnung zu berücksichtigen, da diese in großen Mengen beigefügt werden. Zusatzmittel, wie Verflüssiger oder Beschleuniger hingegen verändern die chemische oder

<sup>17</sup>gleichbedeutend mit Injektionsgut

physikalische Wirkung der Suspension und werden in so geringen Mengen beigefügt, sodass sie in der Stoffraumrechnung nicht berücksichtigt werden [81]. Suspensionen kommen zur Abdichtung und Verfestigung von Kies- und Sandböden, Klüften und Spalten im Fels zu Anwendung. Durch die Verwendung von Feinstbindemitteln kann der Einsatzbereich bis hin zu feineren Sandböden ausgeweitet werden.

Mörtel und Pasten sind Suspensionen mit sehr hohem Feststoffgehalt<sup>18</sup> und werden zur Verfüllung von Hohlräumen und Spalten angewendet.

In die Gruppe der Lösungen werden Mischungen aus Wasser, Wasserglas, Härter, Kunstharz und Kunststoffen verstanden. Das Einsatzgebiet ist die Abdichtung und Verfestigung von Sand- und Feinkiesböden [140].

Als vierte Gruppe der Emulsionen wird als ein fein verteiltes Gemisch zweier verschiedener Flüssigkeiten mit Stabilisatoren verstanden. Dies sind Mischungen aus Wasser, Bitumen, Emulgatoren und wasserunlöslichen Wasserglashärtern, die ihre Anwendung bei Fundamentverstärkungen, Sohlabdichtungen und Abdichtungen von Feinsandböden finden [90].

Suspensionen und Mörtel werden zumeist zu den zementbasierten Injektionsmitteln gezählt. Produkte, die den chemischen Injektionsmitteln zugeordnet werden, sind [82] [93]:

- Kolloidale Lösungen<sup>19</sup>
- Lösungen auf Wasserglasbasis<sup>20</sup>
- Acrylatgel
- Polyurethanharz
- Polyurethanschäume
- Silikatharz
- Silikatschäume
- Epoxidharz
- Microsilika
- Lignine<sup>21</sup>

Zur Gruppe der sonstigen Injektionsmitteln werden sogenannte biochemische Injektionsmittel, Tonsuspensionen, Kunststoffe und Bitumenemulsionen gezählt.

Die wichtigsten Parameter, die das Fließ- und Erstarrungsverhalten von Injektionsmitteln beschreiben sind die Viskosität  $\eta$  und die Fließgrenze  $\tau$ . In der Verarbeitungsphase haben die Injektionsmittel die Eigenschaften wie Newton'sche oder Bingham'sche Flüssigkeiten. Chemische Injektionsmittel mit niedriger Viskosität, wie Wasserglaslösungen für Weich- und

<sup>18</sup>Das Verhältnis von Wasser zu Bindemittel ist im Allgemeinen  $> 1$ .

<sup>19</sup>auch Kieselsole genannt

<sup>20</sup>auch Silikatgel oder Weichgel genannt

<sup>21</sup>kommen in Europa nicht zur Anwendung

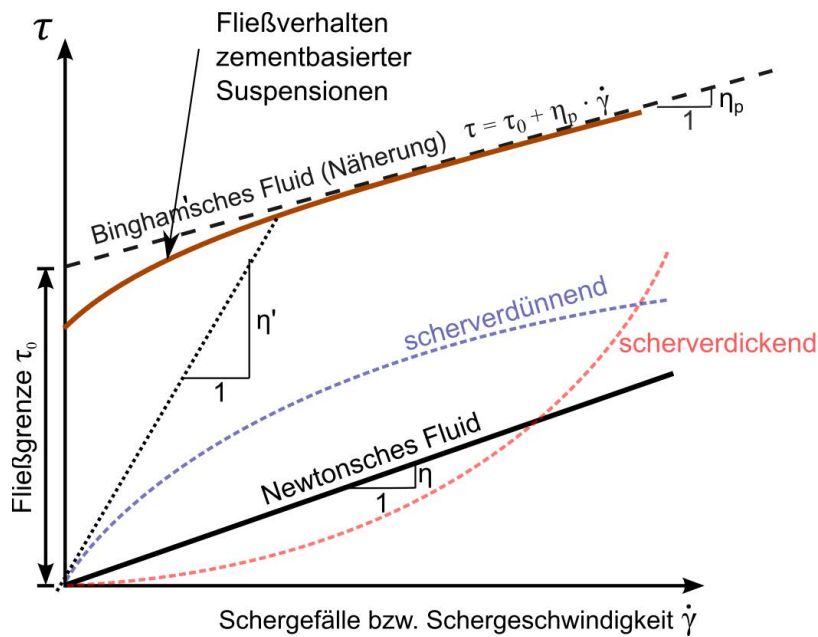


Abb. 3.12: Fließverhalten von Injektionsmitteln [81]

Hartgelinjektionen, und Wasser haben eine Fließkurve nach Newton, wo die Schubspannung  $\tau$  proportional zum Schergefälle<sup>22</sup>  $\dot{\gamma}$  ist. Die meisten Injektionsmittel müssen eine Anfangsschubfestigkeit  $\tau_0$  überwinden, um zu fließen. In weiterer Folge verhält sich die Schubspannung proportional zum Schergefälle  $\dot{\gamma}$  [89]. Das bedeutet wiederum, dass mit zunehmendem Schergefälle die Viskosität stark sinkt. In Abb. 3.12 wird die Steigung als  $\eta'$  bezeichnet und scheinbare Viskosität genannt. Zementsuspensionen sind solche Bingham'sche Flüssigkeiten. Diese müssen demnach eine Schubspannung  $\tau_0$  überwinden um zu fließen, darunter verhalten sie sich linear elastisch. Die Geradengleichung wird in der Form

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad (3.1)$$

beschrieben mit  $\eta_p$  als plastischer Viskosität, die als Vergleichswert in der Qualitätssicherung herangezogen wird [82].

### 3.7 Qualitätssicherung von Injektionsmitteln

In der ÖNORM B 4454: Erd- und Grundbau – Injektionen in Fest- und Lockergestein – Prüfungen werden die Arten der Prüfungen für Injektionsmittel beschrieben. Die Vorgangsweise der Prüfabfolge wird in Abschnitt 6.2 weiter ausgeführt. Die wichtigsten Parameter für die Prüfung von zementbasierten und chemischen Injektionsmitteln werden in Zusammensetzung, Stabilität, rheologische Kennwerte und Festigkeitsentwicklung unterteilt. Dabei werden im Labor und auf der Baustelle eine Vielzahl von Prüfungen durchgeführt. Für den

<sup>22</sup>wird im Sprachgebrauch als Schergeschwindigkeit oder Scherrate bezeichnet

späteren Abrechnungsprozess ist es wichtig, die Dichte zu überprüfen, da über diese auf die verrechnungsfähigen Ausgangsmaterialien geschlossen werden kann. Aus den einzelnen Materialien, die hinsichtlich ihrer Dichte bekannt sind, werden Mischungen auf der Baustelle hergestellt. Dabei ist es gängige Praxis, dass die Mischungsverhältnisse bei zementbasierten Injektionen in Massenanteilen der Zementmasse und chemische Injektionen in Volumsanteilen des Hauptbestandteil vermischt werden. Das rührt daher, dass zementbasierte Materialien in großen Gebinden erst auf der Baustelle mittels Wägung dosiert, chemische Injektionen aber bereits in fertigen Gebinden angeliefert werden. Aus der Stoffraumrechnung [8] ergibt sich für das zementbasierte Injektionsmittel die rechnerische Dichte nach Gleichung (3.2) mit den Hauptbestandteilen Wasser, Zement und Zusatzstoffen.

$$\rho_{injZ} = \frac{\sum m_n}{\sum V_n} = \frac{m_w + m_z + m_{zst}}{V_w + V_z + V_{zst}} \quad (3.2)$$

Bei zementbasierten Injektionsmitteln wird das Massenverhältnis von Wasser und Zement durch den Wasserzementwert (W/B-Wert) ausgedrückt. Die restlichen Massenbestandteile der Zusatzstoffe  $m_{zst}$  werden mit einer Prozentangabe  $\alpha$  von der Zementmasse  $m_z$  definiert. Daraus ergibt sich der Ausdruck in Gleichung (3.3), aus dem die Zementmasse gekürzt werden kann.

$$\rho_{injZ} = \frac{\frac{W}{Z}m_z + m_z + \alpha_{1\dots n}m_z}{\frac{W}{Z}m_z + \frac{m_z}{\rho_w} + \frac{m_z}{\rho_z} + \alpha_{1\dots n}\frac{m_z}{\rho_z}} = \frac{\frac{W}{Z} + 1 + \alpha_{1\dots n}}{\frac{W}{Z}\frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_z} + \alpha_{1\dots n}\frac{1}{\rho_{zst}}} \quad (3.3)$$

Bei Zementsuspensionen erfolgt die Abrechnung des hydraulischen Bindemittels und der Additive in Massen, weshalb aus dem verbrauchten Injektionsmittel, das in der Pumpe gemessen wird, auf die Einzelmaterialien geschlossen werden kann. Dazu wird die bemessene Menge der Pumpe  $V_{injZ}$  mit der bekannten Dichte  $\rho_{injZ}$  multipliziert. Aus dem Verhältnis der Massenanteile, die dem Zähler in Gleichung (3.3) entsprechen, wird auf die Einzelmaterialien, die im Leistungsverzeichnis angeführt sind, rückgeschlossen.

Beispielhaft ergibt sich für eine Zementsuspension mit einer Zementdichte  $\rho_z = 3,11 \text{ g/cm}^3$ , einem Wasserzementwert von 1,5 und einem Zusatzmittel in Zugabe von 1 % der Zementmasse mit  $\rho_{zst} = 1,20 \text{ g/cm}^3$  und der Wasserdichte  $\rho_w = 1,00 \text{ g/cm}^3$  eine rechnerische Zementsuspensionsdichte  $\rho_{injZ} = 1,37 \text{ g/cm}^3$ . Bei einem verpressten Volumen von beispielsweise 500 Litern wird mit der Dichte die Masse  $m_{ges} = 685,80 \text{ kg}$  berechnet. Im Verhältnis 1.5 für Wasser zu 1 Zement und zu 0,01 für Zusatzmittel errechnen sich die Mengen  $m_w = 409,86 \text{ kg}$ ,  $m_z = 273,24 \text{ kg}$ ,  $m_{zst} = 2,73 \text{ kg}$ .

Für chemische Injektionen mit volumenbasiertem Mischungsverhältnis vom Hauptbestandteil ergibt sich die Stoffraumrechnung nach Gleichung (3.4).

$$\rho_{injC} = \frac{\sum m_n}{\sum V_n} = \frac{m + m_1 \cdots + m_n}{V + \beta_1 V \cdots + \beta_n V} \quad (3.4)$$

Setzt man für die Massen  $m_n$  die Volumina mit den entsprechenden Dichten der Einzelbestandteile ein, ergibt sich der Ausdruck für die Injektionsdichte nach Gleichung (3.5). Die Dichte der Injektionsmischung errechnet sich proportional zu den Mischungsverhältnissen  $\beta$ , sofern diese nach Volumenanteilen ausgedrückt sind.

$$\rho_{injC} = \frac{V\rho + \beta_1V\rho_1 \dots \beta_nV\rho_n}{V + \beta_1V \dots + \beta_nV} = \frac{\rho + \rho_1\beta_1 \dots \rho_n\beta_n}{1 + \beta_1 \dots + \beta_n} \quad (3.5)$$

Chemische Injektionsmaterialien können über die Stoffraumrechnung berechnet oder durch Durchflussmessungen im Ansaugstutzen der einzelnen Komponenten gemessen werden. Zweikomponentige Harze sind nach Kilogramm oder Litern im Gesamten abzurechnen. Aus der Multiplikation der Dichte  $\rho_{injC}$  und dem gemessenen, verpressten Gesamtdurchfluss  $V_{injC}$  ergibt sich die abrechenbare Gesamtmasse. Für die Anwendung von Acrylatgel zur Bodenverfestigung wird Wasser zu den angelieferten Komponenten gemischt. Der Anteil des Wassers muss vor der Abrechnung wieder abgezogen werden, da dieses bauseits zur Verfügung gestellt wird. Chemische Injektionsmittel werden zumeist durch die Hersteller so eingestellt, dass diese auf der Baustelle einfach zu mischen sind. Aus diesem Grund ergibt sich aus den Produktbeschreibungen sehr häufig ein Mischverhältnis nach Volumenteilen von 1:1.

Beispielsweise wird die Komponente A eines Injektionsharzes mit der Dichte  $\rho = 0,98 \text{ g/cm}^3$  mit einer Komponente B mit der Dichte von  $\rho = 1,09 \text{ g/cm}^3$  vermischt. Bei gleichen Volumenanteilen ergibt sich eine Dichte  $\rho_{injC} = 1,035 \text{ g/cm}^3$ . Dieser Rechenalgorithmus ist bei der Abrechnung einzuhalten. Die in der Ausschreibung geforderte Dichte ist regelmäßig auf der Baustelle zu überprüfen, da sie der entscheidende Parameter für die Abrechnung ist.

### 3.8 Abbruchkriterien

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die wichtigsten Abbruchkriterien in der Injektionstechnik. Darunter werden die Bedingungen verstanden, unter welchen die Injektionsmaterialien in den Untergrund gepumpt werden. Es wurden in den letzten Jahrzehnten viele unterschiedliche Kriterien entwickelt, die in der Ausführung einzeln oder in kombinierter Form angewendet werden. Die Parameter einzelner Kriterien sind in der Planung vorzugeben, und verfolgen je nach Zweck unterschiedliche Rahmenbedingungen. Ein besonderes Augenmerk ist im Zusammenhang mit den Abbruchkriterien auf die Dokumentation und Ausführung des Prozesses zu legen. Erst durch die Begutachtung der Verläufe ist es den Ingenieuren möglich, die gewählten Kriterien hinsichtlich ihrer Wirkung zu bewerten. Ein Überblick über die Herleitungen und Theorien kann in der Diplomarbeit von Gabriel Abbruchkriterien bei Felsinjektionen [47] sowie im Kommentar zur EN 12715 Injektionen [147] nachgelesen werden.

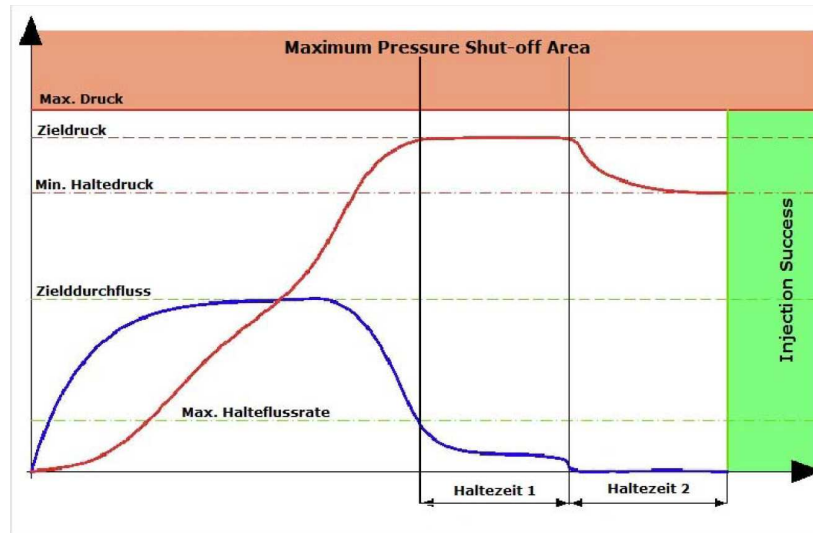


Abb. 3.13: Haltekriterium einer Injektionssteuerung [138]

### 3.8.1 Abbruchkriterien im Lockergestein

Injektionsvorgänge im Lockergestein sind durch vier unterschiedliche Kriterien steuerbar. Bei der **Volumenbegrenzung** wird der Vorgang nach Erreichen des festgelegten Volumens beendet. Dieses wird aus dem Porositätsraum des zu erreichenden Untergrundes mit einem Aufschlag für Verluste ermittelt. Bei Herstellung des Injektionskörpers in Passen werden die berechneten Mengen in Abstimmung mit den Inhomogenitäten des Bodens und der Anzahl der Bohrlöcher aufgeteilt.

Die **Druckbegrenzung** richtet sich bei Verfestigungsinjektionen nach dem Aufbrechdruck des Bodens, der in Test ermittelt wird. Der Injektionsdruck wird dabei durch die Sensoren am Bohrlochmund gemessen und liegt in der Regel bei Raten von 5 bis 15 l/min zwischen 6 und 20 bar. Eine Präzisierung des Druckkriteriums ist das **Haltekriterium**, das in vielen Injektionssteuerungen integriert ist. Dabei regelt die Pumpensteuerung auf eine maximale Haltedurchflussrate nach dem Erreichen des Zieldrucks. Beginnend mit diesem Zeitpunkt wird dieser Druck für eine definierte Haltezeit konstant gehalten und die Durchflussrate entsprechend reduziert. Nach Ablauf der ersten Haltezeit, dargestellt in Abb. 3.13, wird eine zweite Periode definiert, in der der Durchfluss gestoppt wird und der Abfall nicht unter einen minimalen Haltedruck fallen soll [120]. Der Druck, der sich nach Abstellen des Durchflusses einstellt, nennt man Injektionsruhedruck. Bei Unterschreitung des gewählten Verhältnisses zwischen Ruhedruck und Injektionsdruck wird der Zieldruck erneut angesteuert und die erste sowie zweite Haltezeit durchlaufen. Dieses Abbruchkriterium ermöglicht, dass sich der Untergrund in der ersten Haltezeit auf die Umgebungen anpassen und daraufhin der Druckabfall bewertet wird. Dieses Haltekriterium entspricht einer vereinfachten Form der Transient-Pressure-Analysis, dass durch Stadler [146] entwickelt wurde.

Das Kriterium **Abbruch bei Hebungen** wird durch Messung von Oberflächenpunkten oder mit Tiefenpegeln kontrolliert. Die Messungen haben regelmäßig zu erfolgen um beginnende Verformungen zu identifizieren, die eine erreichte Sättigung des Bodens anzeigen. **Austritte an der Oberfläche**, die visuell zu erkennen sind, beenden die Injektionstätigkeiten durch manuellen Abbruch. Vermehrt kommt im Lockergestein auch das GIN-Kriterium zum Einsatz.

### 3.8.2 Abbruchkriterien im Festgestein

Im Festgestein kommen zusätzlich zu den Kriterien im Lockergestein das GIN-Kriterium sowie die q/p-Methode regelmäßig zum Einsatz. Das Verhältnis zwischen Durchflussrate und Injektionsdruck ist ein Indikator für die Sättigung der verfüllten Klüfte. Je nach Pumpensteuerung sinkt entweder die Durchflussrate, sofern der Druck konstant gehalten wird, oder der Druck steigt bei konstanter Durchflussrate. Aufreißvorgänge im Fels können über die lokalen Ausreißer der q/p-Kennlinie, dargestellt in den Injektionsprotokollen, identifiziert werden. Bei Felsinjektionen geht man im Regelfall zu Beginn von einem **q/p-Verhältnis** von 3 bis 5 l/(min bar) aus. Ab einem Wert kleiner 0,2 l/(min bar) wird von einer Sättigung ausgegangen. Moderne Darstellungen von Injektionsprotokollen enthalten den Verlauf dieses Verhältnisses, da es als Grundlage für andere Methoden und zur Einschätzung des Injektionserfolges herangezogen wird.

Ein im deutschsprachigen Raum sehr verbreitetes Injektionskriterium ist die Injektionsvorgangskontrolle mit der **GIN-Methode**. GIN steht für Grouting-Intensity-Number und drückt eine Injektionsintensität im Fels aus. Abb. 3.14 zeigt den Arbeitsbereich von Druck und Durchfluss, der einerseits durch Volumen- und Druckbegrenzung, andererseits durch die GIN-Kurve begrenzt ist. Der Wert ist definiert als  $GIN = p \cdot V$ , wobei das Injektionsvolumen  $V$  pro Meter Bohrloch verstanden wird. Der GIN-Wert ist demnach als Druck  $p$  in bar und Liter Injektionsmittel pro Meter Bohrloch anzugeben. Dieser Wert ist mit der bekannten Bohrlochlänge oder Beaufschlagungslänge im Einzelfall zu multiplizieren, um das Volumen zu erhalten. Der GIN-Wert kann durch mathematische, experimentelle oder Beobachtungsmethoden ermittelt werden und liegt zwischen 500 und 2500 bar l/m [98] [47]. Dadurch wird verhindert, dass ungünstige Kombinationen aus hohen Injektionsvolumina und -drücken während des Vorgangs auftreten, die zu einem Aufreißen des Felses führen würden. Die möglichen Abbruchpfade bei Begrenzung durch GIN sind in Abb. 3.14 dargestellt.

Im internationalen Raum kommen bei Felsinjektionen weitere Abbruchkriterien zum Einsatz [47]:

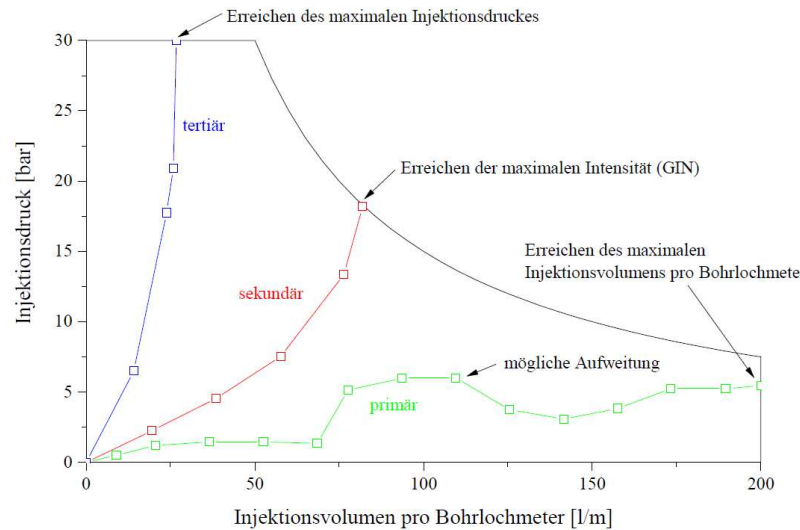


Abb. 3.14: GIN-Diagramm und Abbruchpfade [47]

- **Apparent-Lugeon-Methode:** Mit Hilfe der kontinuierlichen Berechnung eines scheinbaren Lugeon-Wertes aus bereits durchgeführten Injektionsvorgängen wird ein Zielwert definiert, und gegebenenfalls eine Suspensionsmischung angepasst.
- **Aperture-Controlled-Grouting:** Dieses Kriterium stellt eine Weiterentwicklung der GIN-Methode sowie der Apparent-Lugeon-Methode dar. Die Injektionsplanung wird dabei anhand von numerischen Modellen im Untergrund durchgeführt. Den Injektionsdaten aus der Ausführung werden daraufhin Mischungen und notwendige Verpressvolumen zugeordnet.
- **Transient-Pressure-Analysis:** Dabei wird die Injektion durch den Druckabfall nach Pumpenstopp interpretiert und ausgewertet.
- **Pressure-Sensitive-Grouting:** Stellt eine Weiterentwicklung der Transient-Pressure-Analysis-Methode dar. Bei der Bewertung geht die Druckabfallgeschwindigkeit sowie die Änderung des Ruhedruckes zusätzlich in die Bewertung ein. Mit Hilfe von standardisierten Regeln werden weitere Entscheidungen getroffen.
- **Real-Time-Grouting-Control:** Im Mittelpunkt dieser Methode steht die rechnerische Reichweite der Suspension in der kleinsten und größten Kluft. Durch rechnerische Ermittlung der aktuellen Kluftöffnungsweiten und der Ausbreitung aus den Injektionsdaten können die Ziel-Reichweiten in der kleinsten Kluft und die Grenz-Reichweiten in der größten Kluft definiert werden. Werden diese Grenzwerte während des Injektionsvorgangs erreicht so wird der Herstellungsvorgang abgebrochen.

Die Injektionszeit pro Beaufschlagung ist maßgeblich vom gewählten Injektionskriterium abhängig, weshalb die Kenntnis darüber entscheidend für den Bauablauf ist. Änderungen der Injektionskriterien und die Kenntnis über den Abbruchgrund bei parallel gültigen Kriterien



sind daher im Bauablauf zu dokumentieren. In der Literatur werden eine Vielzahl von Abbruchkriterien genannt und weiterhin erforscht. Zur Zeit haben sich jedoch nur wenige davon im Baustellenalltag etabliert. Die Apparent-Lugeon-Methode wird beispielsweise im amerikanischen Raum angewendet. Vorversuche mittels Wasserapressversuchen und eine kontinuierliche Suspensionsmittelüberprüfung werden für die Bewertung zusätzlich benötigt. Einfache Abbruchkriterien wie Volumen- und Druckbegrenzung sowie die GIN-Methode kommen im deutschsprachigen Raum zum Einsatz, da die Bewertung direkt aus den Prozessgrößen gewonnen werden kann.

Das Kapitel 3 zeigt die wichtigsten Injektionsprinzipien, Bohr- und Injektionsverfahren auf, und gibt einen Überblick über die Bauprozesse. Die Sensortechnik für Druck und Durchfluss ist für die Steuerung und Abrechnung der Injektion von entscheidender Bedeutung, wie die vorgestellten Abbruchkriterien und die Qualitätssicherung in Abschnitt 3.7 zeigen. Aus der Beschreibung ist zu erkennen, dass die Soll-Parameter der Planung in einem kontinuierlichen Prozess mit den Daten der Ausführung verglichen werden. Neben den Herstellungsdaten ergibt sich die zweite Datenquelle aus der Qualitätssicherung der Injektionsmaterialien. Auf diesen beiden Quellen bauen alle weiteren Dokumentations- und Abrechnungsvorgänge sowie Anpassungen der Planung in der Ausführung auf.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kapitel 4

## Datenmanagement

In diesem Kapitel werden Grundlagen im Zusammenhang mit dem Datenmanagement erläutert. Die Produktanalyse etablierter Systeme in der Injektionstechnik spiegelt den aktuellen Entwicklungsstand wider. Datenmonitoring wird traditionell bereits bei anderen stark mechanisierten Bauverfahren, wie dem Rohrvortrieb, angewendet. Datenmonitoring ist dabei auf die Überwachung einzelner Herstellungsprozesse begrenzt. Datenmanagement umfasst darüber hinaus alle Tätigkeiten, die für eine kontextbezogene Nutzung bis hin zu einer strukturierten Ablage von Daten notwendig sind. Die weitere Datenverarbeitung ist stark von der Abhängigkeit von Tabellenprogrammen geprägt. Die daraus entstehenden Nachteile geben Anreize für Neuentwicklungen.

Die Kenntnis des Entwicklungsstandes in der Bohr- und Injektionstechnik und ein Einblick in Studienarbeiten zu Datenmanagement anderer Bauverfahren bilden den Ausgangspunkt für die Automatisierung und Digitalisierung von Dokumentationsprozessen. Die angewendeten Systeme finden sich in den Prozessdiagrammen im Kapitel 5 wieder. Die Funktionen der Systeme beeinflussen die Routinen im Arbeitsalltag. Gemeinsam mit den Analysen der Baustellenprozesse und den Anforderungen der Interessensvertreter in den folgenden Kapiteln ergeben sich die neuen Handlungsfelder. Daraus hervorgehende standardisierte, systemgeleitete Prozesse in der Ausführung tragen in Zukunft zur Effizienzsteigerung in Bauprojekten bei.

### 4.1 Daten – Information

Begriffe und Definitionen werden in den Fachrichtungen der Baubranche und Informationstechnologie unterschiedlich spezifiziert. Eine klare Abgrenzung der wichtigsten Begriffe wird daher in weiterer Folge vorgenommen.

### 4.1.1 Daten

Bei der Verarbeitung von Messdaten, vom anfänglichen Signal bis hin zur Information, müssen mehrere Schritte durchlaufen werden. Hofstadler et al. adaptierten die Wissenstreppe nach North für den Baubetrieb [66]. In Abb. 4.1 ist ersichtlich, dass operatives Wissensmanagement in Bezug auf Dokumentation von Baustellendaten durch ein codiertes Signal als Zeichen beginnt. Zeichen sind demnach ohne Bedeutung, noch tragen sie eine bestimmte Information. Erst durch eine Syntax oder Interpretation werden Zeichen zu Daten. Daten sind kontextfreie Angaben, die durch eine Bedeutungseinbindung zu Informationen werden. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal von Daten und Informationen ist somit der Erkenntnisgewinn. Datenverarbeitung ist daher ein Teil der Informationsverarbeitung [64].

Kompetenz und Expertise in der Bauausführung bauen auf Informationen auf, die durch Vernetzung zu Wissen werden und anschließend durch Anwendungsbezug zu Know-how führen. Durch Handlungsmotivation und positives Feedback wird Expertise generiert. Digitale Lösungen im Baustellenalltag kommen insbesondere in diesen Phasen des Wissensmanagements zu liegen, da sie Informationen kontextbezogen ordnen, vernetzen und einen automatisierten Anwendungsbezug herstellen. Gesicherte Entscheidungsgrundlagen führen zu schnellerem Handeln und Aufbau von Expertise.

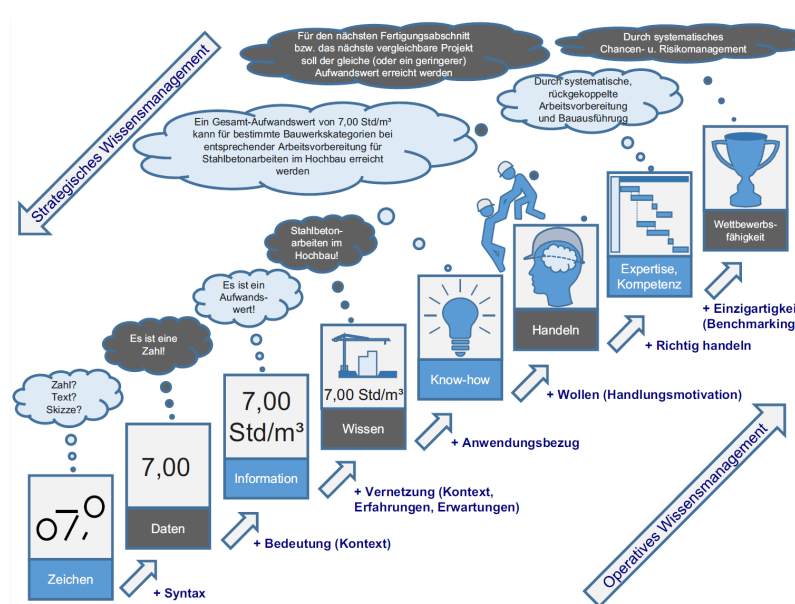


Abb. 4.1: Anwendung der Wissenstreppe nach North auf den Baubetrieb [66]

### 4.1.2 Datenqualität

Datenqualität (DQ) wird unterschiedlich definiert und unterliegt noch keiner allgemeingültigen Definition. Es kommt jedoch immer auf den eigentlichen Verwendungszweck der Daten an. Nach Wang et al. wurden in einer Befragung 179 Qualitätsattribute selektiert. In einem zweiten Fragebogen und durch deskriptive statistische Auswertung ordneten die Wissenschaftler diesen Attributen eine Wichtigkeit zu. In einer Zweiphasen-Sortierung bildeten sich in einem ersten Schritt 20 übergeordnete Dimensionen. Durch Zuordnung und gewählten Übereinstimmungsrate von 70 % wurden 15 zuverlässige Dimensionen in vier Zielkategorien systematisiert [158].

#### Kategorien der Datenqualität

Der Begriffsrahmen von Datenqualität lässt sich demnach in vier Kategorien unterteilen [63].

- Intrinsische DQ beinhaltet nicht nur die Dimensionen Zuverlässigkeit und Objektivität. Wesentliche Bestandteile der intrinsischen Datenqualität ist demnach, ob die Daten einer Glaubwürdigkeit unterliegen, also plausibilisierbar sind, und ob dem Datenursprung Vertrauen geschenkt wird. Die Reputation der Daten ist stark vom subjektiven Empfinden abhängig.
- Kontextuelle DQ richtet sich nach dem Ziel der Datenverarbeitung. Demnach ist die kontextuelle DQ eng mit der spezifischen Fragestellung verbunden. Dimensionen wie der Mehrwert, die Relevanz, die Zeitlichkeit, die Vollständigkeit sowie die Quantität der verfügbaren Daten beschreiben diese Kategorie.
- Repräsentationelle DQ wird durch ihre eindeutige Interpretierbarkeit und die Form der Darstellung beschrieben. In diesem Kontext kann die Visualisierbarkeit der Daten als Kriterium beschrieben werden. Begriffe für die vier Dimensionen in dieser Kategorie sind die Interpretierbarkeit, Verständlichkeit<sup>23</sup>, kompatible Konsistenz sowie Prägnanz.
- Zugriffsqualität ist durch die umfassende Verfügbarkeit und durch den Zugriffsschutz gekennzeichnet.

Die Kategorien der Datenqualität geben Anknüpfungspunkte zu den Anforderungsprofilen und der Modellierung der Datenstruktur für das gegenständliche Datenmonitoring. Bereits in der Befragung aus Abschnitt 2.3 ist zu erkennen, dass den digital erfassten Daten weniger Glaubwürdigkeit geschenkt werden. Der Einbau von sichtbaren Plausibilitätschecks in Systemen könnte diesen Umstand verstärken. Die kontextuelle DQ ist im Spezialtiefbau eng damit verbunden, dass man am Beginn der Planung und Datenaufnahme stringente Nomenklaturen

<sup>23</sup>In der englischsprachigen Veröffentlichung wird diese Dimension als „Ease of understanding“ definiert.

verfolgt und Rückfallebenen für Sensorenausfälle einplant, um die Daten vollständig zeitlich und räumlich zuordnen zu können. Der Zugriffsschutz ist durch gewählte Verschlüsselungen zu gewährleisten.

## 4.2 Datenmonitoring in der Injektionstechnik

Nach einem geschichtlichen Abriss werden die Level des Computermonitorings in der Injektionstechnik vorgestellt. Die in der Literatur zu findende Einteilung wird vom Autor durch eine Klassifizierung, die auf die Schnittstellenthematik eingeht, ergänzt.

### 4.2.1 Geschichtliche Entwicklung

Der Grund für das genaue Monitoring in der Injektionstechnik ist, dass auf der einen Seite Leistungen und Mengen dokumentiert, und auf der anderen Seite Planungsparameter überprüft werden. Durch die Analyse bereits ausgeführter Punkte werden Planungen baubegleitend abgeändert. Direkte Erfolgsergebnisse kommen selten zum Einsatz, weshalb die Daten vom Herstellungsprozess sowie der Materialtests genau analysiert werden müssen. Regelmäßigkeiten und Anomalien im Zusammenspiel mit der Geologie können dabei nur erkannt werden, sofern die Herstell- und Materialdaten zeitlich und örtlich zuordenbar sind. Aus diesen Daten ließe sich eine Abrechnung generieren oder allfällige Notwendigkeiten von vertraglichen Anpassungen erkennen. Diese sind nur auf Grundlage eines systematischen Datenmonitorings möglich, das den finanziellen und technischen Misserfolg frühzeitig erkennen lässt. Als wesentlicher Bestandteil einer besseren Kommunikation werden diese Monitoringsysteme verstanden [121].

Die geschichtliche Entwicklung von Computer-Monitoringsystemen beginnt in den frühen 1980er Jahren. Davor wurden die Injektionsmengen über die Zählung von Zementsäcken oder durch Beobachtung des Silostandes ermittelt. Dementsprechend entwickelten sich die ersten Ratenmessungen aus der Notwendigkeit einer genaueren Abrechnung. Mitte der 1960er Jahre wurden die ersten gewöhnlichen Wasserzähler für die Messung herangezogen, die jedoch nicht für zementbasierte Flüssigkeiten geeignet waren. Nach der Erfindung des ersten induktiven Durchflussmessers<sup>24</sup> im Jahre 1952, setzte man diese in Australien bei Pilotprojekten erstmals ein. Durch die erste Veröffentlichung von Houlby kamen Durchflussmessungen in den frühen 1980er Jahren flächendeckend zum Einsatz [70]. Davor las das Baustellenpersonal die Flussraten ab und trug die Momentanwerte in ein Baustellenbuch ein. Bis in die 1970er Jahre wurden die Injektionsprotokolle analog erfasst, wobei ein Papierdatenschreiber meist Druck und Menge auf zwei Linien druckte. In Amerika entwickelte sich zu dieser Zeit das Aperture-Controlled-Grouting, bei dem die Anzeige des Verhältnisses von Durchflussrate und

<sup>24</sup>siehe dazu Abschnitt 3.6.5, Seite 54

Druck als Grundlage dienen. Mit dem Aufkommen von chemischen Injektionsmitteln, die erheblich teurer sind, musste sich die Injektionstechnik den Anforderungen des Auftraggebers hinsichtlich der Genauigkeit anpassen. Anfang der 1980er Jahre entwickelten sich Systeme, die Messsignale auf Bandaufnahmegeräten speicherten und mittels eines Mikrocomputers druckten. Zu dieser Zeit wurden in Amerika und Europa eine Vielzahl von Dämmen saniert, bei denen hohe Anforderungen an die Durchlässigkeit und Qualität der Ausführung gestellt wurden. Diesem Umstand zur Folge optimierten sich die Injektionsprotokolle und beschleunigte sich der Entscheidungsprozess. Die Qualität der Injektionsmittel erhöhte sich, indem neue Produkte auf den Markt kamen, die im zeitlichen Erstarrungsverhalten gesteuert werden konnten. In der weiteren Entwicklung wurden neuer Abbruchkriterien erforscht, die eine ständige Überwachung der Injektionsvorgänge aller Pumpen zur Folge hatte. Bohrlöcher wurden zum ersten Mal in stereografischen Projektionen abgebildet und unterstützten den Interpretationsprozess. In den frühen 1990er Jahren kam anschließend erste Soft- und Hardware auf den Markt, die eine Interpretation von Injektionserfolgen und Wasserapressversuchen verbesserte, insbesondere durch die Einführung von optischen und akustischen Bohrlochfernsehern. Zu Beginn der 1990er Jahre etablierte sich zeitgleich mit der flächendeckenden Einführung von Computern das GIN-Kriterium. In Europa entwickelten die Bauunternehmen Soletanche, Bachy und Rodio die ersten umfassenden Monitoringsysteme, von denen heute noch Programme in der Weiterentwicklung vorhanden sind<sup>25</sup>. Das erste Monitoringsystem hieß Paguro<sup>26</sup>. Dieses System konnte zum ersten Mal Injektionsprozesse anweisen wie auch überprüfen, und die Parameter Druck, Volumen und Flussrate kontinuierlich messen und steuern. Die Messdaten wurden in automatisch generierten Protokollen sowie Leistungsparametern zusammengefasst und vom System ausgegeben [19].

2003 formulierten Dreese et al. die Vorteile der damaligen Systeme. Sie stellten voran, dass folgende zwölf Potentiale im Bezug auf Kosten, Qualität und Zeiteinsparung im Vergleich zu herkömmlichen Methoden identifiziert werden können [32]:

- Messen im Sekundenintervall im Vergleich zu analogen Messung je Minute
- Erfassung von kritischen Druckspitzen
- Zuverlässigere Messungen durch automatische Messung und Kalibrierung
- Einsatz von höheren Drücken
- Nachvollziehbarkeit von Änderungen des Bauverfahrens und Materials, sowie die damit verbundene Interaktion mit dem Baugrund
- Erleichterung von Mehrfachinjektionen je Bohrloch
- Verhinderung von großen Verformungen und Beeinflussungen von bestehenden Bauteilen
- Beschleunigung und schnellere Ausführungszeiten

<sup>25</sup>siehe dazu Tabelle 4.4

<sup>26</sup>Paguro steht für PArameter GroUting ROdio.

- Zentrale Steuercontainer begünstigen kontinuierliche Ausführungsprozesse
- Reduktion der Überwachung der Geräteeinheiten
- Darstellung der zeitlichen Herstellungsverläufe
- Verstärkte Konzentration auf die Analyse der Parameter anstatt des Datenbeschaffungsprozesses

Seit diesem Zeitpunkt wird Computermonitoring in der Injektionstechnik als probates Mittel angesehen. Die Systeme wurden seit 2000 beispielsweise durch Daten zu Materialeigenschaften und mit automatisch berechneten Parametern, wie dem Apparent-Lugeon Wert ergänzt. Wie in Abschnitt 4.3.2 zu erkennen, sind die heutigen Lösungen vielfältig und auf die einzelnen Bedürfnisse des Injektionsverfahrens individualisiert. Entwicklungen werden einerseits von internen Abteilungen großer Bauunternehmen selbst angetrieben, andererseits von externen Technikunternehmen weiterentwickelt. Auf Grund der unterschiedlichen Anforderungen und der Evolution von Monitoringsystemen sind heute mehrere Level von Systemen am Markt verfügbar [14].

#### 4.2.2 Einteilung nach Technologie

Dreese et al. [32] kategorisierten die Technologie zur Steuerung und Erfassung von Injektionsdaten in drei Stufen und gab dazu Projektkosten an, ab denen ein gewisser Standard in Bauvorhaben integriert werden sollte. Diese Kategorisierung in Level wurden an die aktuelle Technologie von Owen [121] und Carter et al. [19] angepasst. Eine vierte Entwicklungsstufe ergänzt die folgend angeführte Einteilung und repräsentiert den zukünftigen Stand der Technik. Ein Blick auf die heutigen Baustellen zeigt, dass immer noch alle drei Level der Technik angewendet werden und sich die technischen Lösungen von Handprotokollen bis hin zu Webplattformen erstrecken. Die eingesetzte Methode ist letztendlich von der Komplexität des Bauvorhabens und den ausgeschriebenen Anforderungen des Auftraggebers abhängig.

##### Level 1 – Messstab und Manometer

Diese Technologie war der Stand der Ausführungstechnik vor 1997. Auftraggeber gehen in Verträgen oftmals noch immer von diesem Stand aus und vor allem bei kleinen Maßnahmen wird diese Technologie weiterhin eingesetzt [32, S.5]. Diese rudimentäre Methode misst den Verbrauch einer Injektionspasse durch Ablesung des Füllstandes im Vorratsbehälter. Der Druck wird durch Ablesen am Manometer in 5 bis 15 Minuten-Intervallen aufgenommen. In den manuellen Protokollen berechnet der Techniker am Ende des Vorgangs die durchschnittliche Pumprate. Im Baucontainer überträgt der Techniker diese Werte manuell auf einen Plan, indem die Lage des Bohrloches räumlich dargestellt ist. Automatisierung im Dokumentationsprozess ist nicht gegeben, da jeder Übertrag und jede Analyse händisch durchgeführt werden



muss. Zusätzliche Information und Qualitätsmerkmale zeichnet die Qualitätssicherung nicht automatisch auf. Zur Zeit lässt sich insbesondere bei der Herstellung von Dichtsohlen diese Methode immer noch finden, obwohl sie bereits 2003 von den Experten als veraltet bezeichnet wurde und demnach nicht länger zulässig für größere oder technisch schwierigere Projekte erscheint. Sofern diese Methode ausgeschrieben ist, müssen alle Analysen von der fachlichen Bauaufsicht wahrgenommen werden. Owen [121] gibt bei der Beschreibung diese Levels an, dass Erfassung, manuelle Eingabe in die Datenbanken und weiterführende Analysen sehr zeitaufwändig und arbeitsintensiv sind. Deshalb leidet diese Technologie unter dem Einfluss von Inkonsistenzen und menschlichen Fehlern.

## Level 2 – Datenspeicher und Echtzeit-Anzeige

Dieses Level der Technologie automatisiert die Datenspeicherung und gibt die Möglichkeit der Mitverfolgung zeitlicher Verläufe von Druck und Menge während der Ausführung. Die Steuer- und Speichereinheiten messen dabei die Raten und Drücke in regelmäßigen Abständen. Das Messintervall ist je nach Produkt von einer Sekunde bis 15 Sekunden festgesetzt. Fortgeschrittene Systeme dieses Levels berechnen Druckverluste, den effektiven Druck und andere Parameter wie den Apparent-Lugeon-Wert und erlauben dem Bediener der Steuereinheit, Material und andere geometrische Parameter zuzuordnen. Für den Export berechnet das System bereits die Gesamtmenge der Beaufschlagung. Als Ergebnis des Dokumentationsprozesses werden Injektionsprotokolle ausgegeben. Auswertungssoftware, die einer manuellen Bedienung bedürfen, verarbeiten diese Daten und berechnen, sofern enthalten, die relevanten Abrechnungssummen, wie Injektionszeit oder verpresstes Material. Weitere Analysen, Visualisierungen und Modelle des Ist-Standes werden manuell eingegeben und generiert. Dreese et al. [32] bezeichnen dieses Level als deutliche Verbesserung, zeigen aber auf, dass kein kontinuierlicher Verbesserungsprozess implementiert werden kann, solange die Daten nicht automatisch weiterverarbeitet werden. Bei großen Projekten sind die täglich anfallenden Informationen von Wasserapressversuchen und Herstellungsdaten nicht überschaubar. Das Finden von Mustern oder Anomalien auf dem Übersichtslageplan im Baucontainer ist insbesondere im Hinblick auf die zeitliche Ressourcenbindung von Technikern unmöglich zu bewältigen. Bei Projekten mit einem Auftragsvolumen über 270 000 €<sup>27</sup> oder besonderen technischen Herausforderungen sollte Level 2 als Mindestanforderung vom Auftraggeber gefordert und ausgeschrieben werden<sup>28</sup>.

<sup>27</sup>Dreese et al. gaben im Jahre 2003 den Wert von 250 000 \$ an. Der historische Wechselkurs Ende des Jahres betrug 0,7918 €/€/\$ (<https://bit.ly/2QSSA43>). In Anbetracht der Entwicklung des Baupreisindex für den Tiefbau der Statistik Austria bis Ende 2018 (<https://bit.ly/2zZ15RF>) von 1,354 % ergibt sich dadurch folgende Berechnung:  $250\,000 \$ \cdot 0,7918 \text{ €/€}/\$ \cdot 1,354 \% = 268\,024 \text{ €}$ .

<sup>28</sup>Die Kosten für die Steuerung und Datenbeschaffung sowie die notwendigen Einrichtungskosten sind dabei berücksichtigt.

### Level 3 – Integrierte Analysysteme

Datenmonitoring am Stand der Technik beinhaltet zumindest vier Hauptfunktionalitäten. Dies sind eine Echtzeit-Datenanzeige der Information von ausgeführten Arbeiten, eine zentrale Datenbank zur Speicherung und Verarbeitung aller gesammelten und berechneten Daten, eine Verlinkung mit CAD-Programmen für die Visualisierung der Information auf dem Letztstand sowie die Analysefunktion durch benutzerabhängige Abfragen der Datenbank und die Generierung von täglichen Reports. Eine Visualisierung in AutoCad ermöglicht dem Anwender eine Übersicht darüber, ob die Injektionsfestlegungen ordnungsgemäß erfüllt wurden. Planer und Ausführenden wird damit ein schnellerer Entscheidungsfindungsprozess ermöglicht [14]. Dieses Level repräsentiert den heutigen Stand der Technik. Die Systeme integrieren dabei alle Herstellungsparameter und geben diese in Echtzeit über eine Computerschnittstelle aus. Mengeninformationen und Ist-Injektionsprofile werden aus den Herstellungsdaten generiert. Die Daten liegen in diesem Level elektronisch vor und können damit an Experten zur Auswertung weitergegeben werden. Voll integrierte Systeme enthalten [121]:

- Automatisches Loggen von Daten mit Sensoren
- Grafische Verläufe der Bohrlöcher mit Mengeninformationen sowie Mischungsänderungen
- 3-D Visualisierungen von Daten
- Schnittstelle zu CAD-Programm
- Benutzerabhängige Anzeigen von Daten und Resultaten
- Filterfunktionen und Möglichkeit der variablen Datenbankabfragen
- Automatische, bereichsabhängige Injektionsprotokolle und Übersichten
- Verweise zu Projektdaten mit Videos von Bohrlochfahrten, Fotos und Plänen
- Verarbeitungsgeschwindigkeit von wenigen Minuten und vollständige Baustellenfunktionalität

Die ökonomischen und technischen Vorteile eines Systems mit Technologie des Levels 3 können bei Projekten mit hohem Ausführungsrisiko oder Projektkosten ab 980 000 €<sup>29</sup> voll ausgenützt werden [121]. Obwohl dieses Level bereits der Stand der Technik ist, werden die Systeme noch nicht standardmäßig auf Injektionsbaustellen gefordert oder integriert.

<sup>29</sup>Owen gaben im Jahre 2017 den Wert von 1 000 000 \$ an. Der historische Wechselkurs betrug zum Veröffentlichungszeitpunkt 0,9377 €/€ (https://www.finanzen.net/devisen/dollarkurs/historisch). Die Entwicklung des Baupreisindex für den Tiefbau bis Ende 2018 (https://bit.ly/2zZ15RF) von 1,043 % ergibt dadurch folgende Umrechnung:  $1\,000\,000\ \$ \cdot 0,9377\ \text{€}/\$ \cdot 1,043\ \% = 978\,021\ \text{€}$ .

## Level 4 – Vernetzung mit geologischen Modellen

Diese Technologiestufe bildet einen zukünftigen Entwicklungsschritt ab. Sensortechnik, Computertechnik und eingesetzte Injektionsgüter sind zuverlässig für den heutigen Baubetrieb entwickelt worden. Der limitierende Faktor ist ferner, insbesondere bei Felsinjektionen und inhomogenen Böden, das Verhalten des Baugrundes während der Injektion zu verstehen [19] und zu analysieren. Durch die Integration von Discrete Fracture Modelling (DNF) bei der Planung und Kontrolle von Abbruchkriterien und die Vernetzung mit den aktuellen Herstellungsdaten könnte der Injektionserfolg besser vorausgesagt werden. Dreidimensionale Visualisierung von Injektionswegen im Baugrund würden das Verständnis für die Injektion verbessern und unzulässige Schlüsse aus zweidimensionalen, bunt kodierten Zusammenfassungen ausschließen [19].

### 4.2.3 Einteilung nach Schnittstellen

Datenmanagementsysteme sind durch Unterschiede in ihrer Funktionalität und Schnittstellen im Datenfluss gekennzeichnet. Zur Einteilung von Datenmanagementsystemen im Kontext der Digitalisierung und Automatisierung von Dokumentationsprozessen wurde vom Autor eine Matrix entworfen, die zur Kategorisierung und Einschätzung der Systeme auf der Baustelle dient [166]. Der Datenfluss auf Baustellen kann grob in drei Phasen unterteilt werden.

Direkt auf den Geräten und unter der Verantwortung des gewerblichen Personals entstehen die Rohdaten. Abhängig von Umfang und Technologie-Level werden die Daten von Sensoren und den Steuerungseinheit abgelesen und in Handprotokolle übertragen oder durch elektrische Sensoren erfasst und direkt bzw. indirekt weitergegeben. Diese erste Stufe lässt sich unter „Messung“ zusammenfassen. Die bildlich beschrifteten Spalten stehen für Schnittstellen, die in dieser Matrix eine wesentlich Rolle spielen. Unter direkten Schnittstellen wird verstanden, dass Daten ohne zusätzliche manuelle Tätigkeiten übergeben werden können. Beispielsweise kommen bei der Entwicklungsstufe des teilweise digitalen Datenmanagements transportable Speichermedien zum Einsatz. Die Datenakquisition ist daher durch eine indirekte Schnittstelle unterbrochen. Auf den Baustellen werden die aufgenommenen Daten doppelt in analoger und digitaler Form abgelegt. Dabei kommt es zu Redundanzen und Problemen in der Zuordnung. Diese Phase wird als „Speicherung“ verstanden und beinhaltet alle Aktivitäten, die beim Übertragen, Aufbereiten, Vervielfältigen und der Archivierung von Daten entstehen. In einer dritten Phase werden die Analyseprozesse gefasst. Im Spezialtiefbau, und insbesondere in der Injektionstechnik, sind diese Prozesse immer mit Visualisierungen des Baufeldes verknüpft. Der Datenzugriff erfolgt je nach Entwicklungsstufe und verwendeter Methode direkt oder indirekt. Rudimentäre Auswertungen unter Zuhilfenahme von Tabellenkalkulationsprogrammen greifen zumeist auf Daten zu, die durch einen händischen Übertrag aus Handprotokollen erzeugt wurden. Es handelt sich dabei um analoge Daten. Proprietäre Software, wie in Abschnitt 4.3




Datenfluss	1. Messung		2. Speicherung		3. Analyse & Visualisierung	
Entwicklungsstufe	Methode		Methode		Methode	
1. analog	analog	indirekt	analog	indirekt	Tabellenkalkulation	x
2. teilweise digital	digital	direkt / indirekt	einzelne Datensets	direkt / indirekt	proprietäre Software	Exportdatei
3. digital	digital	direkt	Datenbank	direkt	real-time Analyse	direkt

Abb. 4.2: Digitales Datenmanagement in drei Entwicklungsstufen

dargestellt, ermöglicht den Ausdruck von Zusammenfassungen durch Zugriff auf einzelne Datensets eines limitierten Auswahlbereiches. Echtzeitanalysen können nur durch direkte Verknüpfungen zu einer zentralen Datenbank erfolgen. An der Schnittstelle zur weiteren Nutzung der Daten und Auswertungen für Bauplanung und ERP-Systeme werden, sofern eine Schnittstelle definiert wurde, Export- und Importfiles ausgetauscht. Eine direkte Schnittstelle zu cloudbasierten BIM-Lösungen stellt den höchsten Entwicklungsstand bei dieser Schnittstelle dar, die zur Zeit jedoch noch nicht realisiert werden konnte.

Die Entwicklungen unterteilen sich durch die beschriebene Verknüpfung von Methode und zugehöriger Schnittstelle in eine analoge, eine teilweise digitale und eine digitale Stufe, wie die Abb. 4.2 zeigt. Die detaillierte Beschreibung des Datenflusses findet sich in Kapitel 5 ab Seite 97.

In den Fachgesprächen wurde der Entwicklungsstand im Spezialtiefbau auf Baustellen aufgenommen und analysiert. Dabei war zu erkennen, dass die subjektive Einschätzung der Befragten stark von den objektiv wahrgenommenen Situationen abweichen. Aus den Bewertungen der Fachgespräche sowie Begutachtungen auf Baustellen wurde die Zuteilung zu den Entwicklungsstufen in Tabelle 4.1 ermittelt. Dabei ergab sich, dass Bauprojekte in Bezug auf das Datenmanagement als teilweise digitalisiert bezeichnet werden können. In der Messung werden die Daten größtenteils durch Sensorik digital erfasst. Die meisten Beteiligten am Bau geben jedoch an, dass eine Rückfallebene mit Handzetteln verwendet wird, weshalb Daten weiterhin indirekt einer Speicherung zugeführt werden. Die analoge Erfassung von Daten, gleichbedeutend mit dem Level 1, wird in der heimischen Branche nicht mehr verwendet, da die Daten für eine Abrechnung zu unpräzise wären. Die Speicherung wird im Sinne des tradierten Dokumentationsprozesses vorwiegend in einzelnen digitalen Datensets durchgeführt. In der Analyse wird vorwiegend in Tabellenkalkulationsprogrammen gearbeitet, die wie Datenbanken betreut werden. Fachgespräche zeigten, dass die Daten nach dem Abrechnungsprozess nicht weiter verwendet und Aufwandswerte projektspezifisch abgeschätzt werden. Schnittstellen zu den weiteren ERP-Systemen bestehen nicht.

**Tab. 4.1:** Einschätzung der Interessensvertreter zu den Entwicklungsstufen in %

Entwicklungsstufe	Messung	Speicherung	Analyse
analog	0%	15%	36%
teilweise digital	78%	64%	50%
digital	22%	21%	14%

## 4.3 Produktanalyse in der Injektionstechnik

Die angeführten Listen der Injektions- und Bohrsteuerungen sind unter Experten im internationalen Raum bekannt und werden je nach Verfahren und Größe des Projektes angewendet. Sofern Unternehmen ausreichende Information zur Verfügung stellen konnten, wurden die Systeme in diese Beschreibung aufgenommen. Es wird zwischen Datenmonitoring für Bohr- und Injektionstechnik unterschieden, da die Bauverfahren getrennt aufgezeichnet und gesteuert werden.

### 4.3.1 Datenerfassungen in der Bohrtechnik

In diesem Abschnitt werden Datenerfassungssysteme in der Bohrtechnik beschrieben, die Herstellungsparameter während des Bohrvorgangs aufzeichnen. Alle großen Bohrgerätehersteller bieten bereits Flottenmanagementsysteme an, die sich in der Auswertung der Gerätedaten auf die Produktivität konzentrieren. Bei Abdichtungsinjektionen im Tunnelbau werden Bohrwagen verwendet, die in neueren Ausführungen bereits mit einer Bohrdatenaufzeichnung (engl.: Measurement while Drilling) (MWD) ausgerüstet sind. Stellvertretend dafür wird das System der Sandvik AB mit dem Namen **TCAD+** erwähnt. Das Paket ermöglicht die Eingabe der Bohrlochparameter und die Auswertung der Herstellungsdaten. Sofern in der Tunnelröhre eine Wifi-Verbindung besteht, können die geplanten Bohrlöcher eingespielt und Herstellungsparameter digital vom Bohrwagen geladen werden. Normalerweise funktioniert der Übertrag mittels USB-Stick. Mit der Software **iSURE** werden anschließend Bohrprotokolle im Textverarbeitungsformat erstellt. Die Reporte umfassen mit dieser Aufzeichnung die geometrische Position des Bohrlochmundes, die Penetration sowie weitere Bohrlochdaten wie Anpressdruck, Rotationsgeschwindigkeit und Spülmenge.

exges **BDE**<sup>30</sup> [137] ist von der Funktionalität und der Datenübertragung genau wie das Injektionssystem **IDE** aufgebaut. Für weitere Erklärungen siehe dazu Abschnitt 4.3.2 auf Seite 80.

<sup>30</sup>BDE steht für Bohrdatenerfassung

Das umfassendste Messgerät für Bohrungen der Firma Jean Lutz nennt sich **DIALOG** und ermöglicht die Aufzeichnung der Bohrparameter, der Bohrneigungen und der Lage mittels Global Positioning System (GPS). Die Daten der Messungen werden in einem internen Speicher gesichert und können mittels USB-Stick oder kabelloser Verbindung zum Server übertragen werden. Das Gerät verfügt über die Hardwareschnittstellen W-Lan, Mobilfunk und Bluetooth. Die Webapplikation **System Vision** ermöglicht eine direkte Kommunikation mit dem Gerätefahrer und eine Übergabe der herzustellenden Bohrpunkte mit den definierten Soll-Parametern. Die Software macht die Bohrdaten in Echtzeit ersichtlich und meldet Warnungen [78].

Die Bohrdatenerfassung des Geräteherstellers Soilmec S.p.A. nennt sich **DMS** und besteht aus drei Komponenten [144]. Das „DMS on board“ fungiert als Kontrolle und Aufzeichnung von Produktionsdaten des Bohrvorhabens sowie der Gerätedaten, wie beispielsweise dem Standort mittels GPS, oder der Kennwerte des Dieselmotors. Sämtliche durch die Norm vorgeschriebenen Bohrparameter können aufgezeichnet werden. Zusätzlich kann eine Bohrabweichungsmessung integriert werden. Je nach Funktionalität werden die Daten per USB-Stick übertragen oder an den Webserver überspielt, der durch die Webapplikation „DMS Manager“ verbunden ist. Der Manager dient als Flottenmanagement und Datenbank für die weitere Bearbeitung in der PC-Software. Eine E-Mail-Funktion sendet die Daten direkt an Stakeholder. Die Software **DMS PC** analysiert die Daten und stellt die Reports für die Qualitätssicherung zur Verfügung. Bei Schlitzwänden ist es möglich, die Herstellungsdaten in einem 3D-Modell darstellen zu lassen. Mit einer weiteren Funktion kann für das Bohrgerät ein Produktionsplan erstellt werden.

Das Bohrdatenerfassungssystem der Firma KLEMM Bohrtechnik GmbH, **MBS 5** [87], verfügt über eine Aufzeichnungskapazität von 1 GB. Bei einer Abtastrate von einer Sekunde bei 20 Aufzeichnungskanälen ergibt sich eine Kapazität von mindestens 300 Stunden. Der Recorder ist mit einem Farbdisplay mit 7,1 Zoll Anzeigegröße ausgestattet. Die Datenübertragung erfolgt mit einem USB-Stick oder kann durch das Gerätemanagementsystem des Unternehmens online zur Verfügung gestellt werden. Für die Auswertung der Daten kommt die Dokumentationssoftware **BReport** zum Einsatz. Diese erstellt Ausdrücke und Exporte im Drawing Interchange File Format (DXF) oder File Interchange Format der Joint Photographic Expert Group (JPEG).

Das Unternehmen LIM SAS bietet beim Bohrverfahren den gleichen Logger an wie bei der Injektionstechnik. In diesem Fall werden keine Vorgänge gesteuert, sondern die durch die Bedienung des Bohrmeisters beeinflussten Bohrvorgänge aufgezeichnet. Im Gegensatz zu den Ausführungen in der Injektionstechnik wird bereits eine vollständig webbasierte Software mit dem Namen **GEO-LOG<sub>4</sub>** angeboten [97]. Das Format .bor [96] wurde durch das Unternehmen spezifiziert und macht es durch die Namensstruktur möglich, Parameter einem Bauverfahren zuzuordnen.

**Tab. 4.2:** Auswahl bestehender Bohrdatenlogger und Datenerfassungen

Unternehmen	Logger	Auswertungssoftware
DAT instruments Srl	DAT WideLog	Easy DAT
JEAN LUTZ SA	DIALOG	System Vision
Klemm Bohrtechnik GmbH	MBS 5	BReport
Liebherr GmbH	PDE	PDR2
Lim SAS	PocketLIM 5G	GEO-LOG <sub>4</sub> -DIAG
Sandvik AB	iSURE©	TCAD+
soilmec	DMS on board	DMS PC
Züblin Spezialtiefbau GmbH	exges BDE	Microsoft Excel

Die Bohrdatenerfassung **PDE** für Spezialtiefbaugeräte der Firma Liebherr GmbH zeichnet Betriebsdaten aus der Gerätesteuerung wie auch Daten externer Sensoren auf. Die Daten werden nach Beendigung eines Bohrvorganges auf eine CompactFlash Speicherkarte gespeichert. Mit der Software **PDR2** wird die Auswertung und Reporterstellung im Baustellencontainer ermöglicht. Die Daten werden entweder mit der Speicherkarte übertragen oder mit dem Telematik Flottenmanagement direkt eingespielt. Die Reports speichert die Software im Portable Document Format (PDF) ab. Rohdaten können als Excel-Datei exportiert werden [95].

Durch die Nachrüstungsoptionen von DAT instruments Srl, wird ein bestehendes Bohrgerät mit Sensoren ausgestattet, um eine kontinuierliche Bohrprozessaufzeichnung zu ermöglichen. Die Baugeräte werden mit einem 18,5 Zoll großen Touch-Screen bestückt. Die Datenaufzeichnung verfügt über ein integriertes Wifi-Modul, der Datenübertrag wird mittels USB-Stick oder kabelloser Verbindung hergestellt. In der Software **Easy DAT** werden die Protokolle gedruckt und Exporte im Extensible Markup Language (XML)- oder Comma Separated Values (CSV)-Format ermöglicht.

Die Auflistung der ausgewählten Produkte zeigt, dass auf den Baustellen die Bohrdaten in unterschiedlichster Art und Weise weiterverarbeitet werden. Die Tabelle 4.2 verdeutlicht, dass die Datenverarbeitung von Tabellenkalkulationsprogrammen oder unternehmenseigener Auswertungssoftware und Webplattformen ausgeführt wird. Man bemerkt, dass alle Produkte in Form und Art das geforderte Berichtswesen der Norm widerspiegeln, darüber hinaus durch unterschiedliche Import- und Exportfiles eine Vernetzung mit späteren Prozessen der Bauausführung, wie beispielsweise der Abrechnung, nur durch manuelle Tätigkeiten erfolgen kann.

### 4.3.2 Steuerungen und Datenerfassungen in der Injektionstechnik

In diesem Abschnitt werden die vorherrschenden Steuerungs- und Datenerfassungseinheiten in der Injektionstechnik beschrieben. Diese Systeme steuern und überwachen den Prozess während der Herstellung und ermöglichen durch ergänzende Softwarelösungen eine Verwendung der aufgezeichneten Baudaten.

**exges IDE** [138] ist die Datenerfassungseinheit für Injektionen<sup>31</sup> der Firma Züblin Spezialtiefbau GmbH. Die Einheit besteht aus einem SCADA-System<sup>32</sup>, das die übergeordnete Überwachung, Visualisierung und Steuerung regelt, und einer speicherprogrammierbaren Steuerung<sup>33</sup>, die Sollwerte einzelner Parameter überprüft und einstellt. Es können je Steuermodul maximal acht Pumpen bedient werden. Die Abb. 4.3 zeigt die Einheit in einem Hartschalenkoffer verbaut und mit Tastatur und Bildschirm bestückt. Die notwendigen Sensoranschlüsse befinden sich auf der Außenseite. Die Software für die Injektionstätigkeiten ermöglicht eine Vordefinition der Parameter mit der die Pumpen angesteuert werden. Diese können über ein Importfile im CSV-Format eingespielt werden. Eine Pumpenübersicht in Echtzeit dient zur Mitverfolgung von aktuellen Prozesse. In der Software ist ein Modul für die Datenauswertung integriert, das PDF-Dateien erzeugt oder CSV-Daten für die weitere Dokumentation und Abrechnung zur Verfügung stellt. Werden Injektionsprozesse nicht nach den vordefinierten Abbruchkriterien beendet, so muss ein Beendigungsgrund eingegeben werden. Dieser „Stoppcode“ bzw. der ausschlaggebende Abbruchgrund wird in der weiterführenden Dokumentation angegeben. Die Software für das Bohren ist in gleicher Weise aufgebaut.

**HWS** [5] nennt sich die Steuerung des Unternehmens Häny AG, und vereint die Mischer und Pumpenbedienung in einem System. Die zementbasierten Rezepturen für das Injektionsmaterial sowie der Mischprozess selbst können bei dieser Steuerung vordefiniert werden. Wasser und andere flüssige Komponenten können über Magnetventile, Trockenkomponenten über Förderschnecken, oder gänzlich manuell dosiert werden. Bei der automatischen Mischung wird über die integrierte Wiegezeile im Mischer eine Optimierung des Mischvorgangs erreicht. Die Steuerung besteht aus einem Panel-PC mit Touch-Screen sowie Schaltern für die manuelle Bedienung. Die Durchflussmessung erfolgt mit induktiven Durchflussmessern oder Hubzählung bei Kolbenpumpen. Es können ergänzend zu den Abbruchkriterien der Steuerung zusätzlich zehn Beobachtungen, beispielsweise beim manuellen Abbruch, vordefiniert werden. Beim Beenden eines Injektionsvorgangs besteht die Möglichkeit diese durch eine manuelle Kommentierung zu ergänzen. Für eine Fernwartung oder zum Übertrag der Daten auf einen eigenen VPN-Server können die Daten mittels Mobilfunk, Ethernet-Verbindung oder Wireless-Verbindung übertragen werden. Die Chargenprotokolle der Steuerung sowie die Injektionsprotokolle des Herstellungsprozesses werden mittels USB-Stick für eine weitere

<sup>31</sup>IDE steht für Injektionsdatenerfassung

<sup>32</sup>SCADA steht für Supervisory Control and Data Acquisition

<sup>33</sup>Oftmals wird die Abkürzung SPS, oder die englische Bezeichnung Programmable Logic Controller (PLC) verwendet.





Abb. 4.3: Steuer- und Datenerfassungseinheit exges









GROUTING SYSTEMS 		User: SUP	
		Level: 6 29.05.2017 11:53:43	
<b>Datenverwaltung</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li></li> <li></li> <li></li> <li></li> <li></li> <li></li> <li></li> <li>Login</li> <li>Logout</li> <li>Reset</li> </ul>	<b>Exportiere auf USB-Stick</b>	<b>Protokoll</b>	
	<b>Bitte USB-Stick einstecken</b>	Größe [Mb] 0,117	Anzahl Dateien 1
	<b>Chargenprotokoll auf USB-Stick kopieren</b>	<b>Chargenprotokoll</b>	
	<b>PQ-Reg auf USB-Stick kopieren</b>	Neue Datei	Neue Datei Täglich
	<b>Archive auf USB-Stick kopieren</b>	<b>P/Q-Registrierung</b>	
	<b>Rezepturen</b>	Neue Datei	Neue Datei Täglich
	<b>Exportiere Rezeptur auf USB-Stick</b>	<b>Archiv</b>	
	<b>Importiere Rezeptur von USB-Stick</b>	Größe [Mb] 0,000	Anzahl Dateien 0
	<b>Lösche alle Protokolle (inkl Archive)</b> <small>(gedrückt halten bis rot -&gt; grün)</small>		
	<b>Datenverwaltung</b>		

Abb. 4.4: Übersicht der Datenverwaltung in der Steuerungseinheit [5]

Bearbeitung übertragen, siehe dazu Abb. 4.4. In der Software **PQ-Registration** der Firma SPÄNI Elektro-Mechanik AG können Importfiles erstellt werden, die einer Arbeitsanweisung gleichkommen, und die Steuerungsparameter der Injektion, Bohrlängen, sowie die Mischung für einzelne Passen vordefinieren. Im selben Programm werden die Herstellungsparameter, die mittels USB-Stick als Datei im XML-Format eingelesen werden, bearbeitet und Übersichtstabellen im CSV-Format sowie Injektionsprotokolle im PDF-Format erstellt. Zur Auslesung der Chargenprotokolle wird ein vordefiniertes Microsoft Excel-Arbeitsblatt verwendet, das die Datei ausliest und aufbereitet.

**LOG SG** [106] heißt die Speicher- und Kontrolleinheit des Unternehmens Mühlhäuser-Obermann GmbH. In der letzten Version wird ein Industrie-PC als Einbaugerät verwendet, der es ermöglicht, bis zu 22 Pumpen gleichzeitig zu bedienen. Die Steuerung kann mit

Handheld-Lesegeräten, W-Lan oder mittels des Mobilfunknetzes ferngesteuert werden. Die Steuerung ermöglicht eine Anzeige der Messwerte während der Messung, eine automatische Pumpenabschaltung, die Registrierung und Auslesung der Daten mittels USB oder Internetkommunikation. Zur weiteren Bearbeitung der Daten wird die Auswertungssoftware **LOG Access** zur Verfügung gestellt.

Das Datenaufzeichnungsgerät der Firma STS Scheltzke GmbH trägt den Namen **RMS-2-B** [150] und ist für die Steuerung von maximal zwei Injektionspumpen ausgelegt. Das System besteht aus einem 10,4 Zoll großen Touch-Screen und einer Steuerung. Diese ermöglicht eine Mengenerfassung und Fördermengenregelung. Die Regelungsparameter Maximaler Förderdruck und Maximale Fördermenge sind in der Steuerung anzuwählen. Das Haupteinsatzgebiet findet die Steuerung bei Verfüllungen und Injektionen, aber auch bei Spülbohrungen und Bodenmischverfahren. Die Abbruchkriterien Druck, Menge und maximales Volumen sind demnach integriert. Die Daten des Messsystems werden im American Standard Code for Information Interchange (ASCII)-Format abgespeichert. Die Auslese der Dokumente erfolgt über Befehlseingabe am Touch-Screen der Steuerung. Die Daten werden anschließend auf einen USB-Stick übertragen. Das Unternehmen bietet für die weitere Bearbeitung der Daten die Auswertungssoftware **NINJA2** [59] an. Damit wird ermöglicht, die Daten im Baubüro in Form von Injektions-, Stellen- und Tagesprotokollen zu generieren. Die Herstellungsverläufe werden im Grafikformat Portable Network Graphics (PNG) abgespeichert. Mit einem Erweiterungsmodul ist eine Projektverwaltung auf Basis einer SQL-Datenbank möglich, die wiederum einen Excel-Export ermöglicht. Eine Funktion in diesem Modul gewährleistet die genaue Betrachtung der Protokolle mittels einer Zoom-Funktion. In der Projektverwaltung können mehrere Maschinen mit dieser Steuerung überwacht werden.

Das Unternehmen JEAN LUTZ SA, mit dem Hauptsitz in Frankreich, entwickelt und vertreibt Steuerungsgeräte, Sensorik und Software für den Spezialtiefbau. Dafür werden eine Vielzahl an Messinstrumenten für die Aufzeichnung von Bohr- und Injektionsparametern zur Verfügung gestellt. Für den Injektionsvorgang werden unterschiedliche Messinstrumente für zwei bis zwölf Pumpen und die Mischanlage angeboten. **CINTAC 15** [78] ermöglicht die Steuerung der Sollwerte und Toleranzen des Fertigungsprozesses. Dabei werden die Warenbestände und der tägliche Verbrauch verwaltet. Im Pumpmodus wird die Durchfluss- und Druckregelung dokumentiert. Das Unternehmen gibt an, dass das System optional mit einem Dichtemesser ausgestattet werden kann und die Kalibrierung sowie die Funktionsstörung aller Sensoren erkannt und dokumentiert wird. Die Daten werden im internen Speicher gesichert und bei Verbindung mit dem Internet an den unternehmensinternen Server übertragen und per Mail versendet. Für die Auswertung wird die Software **EXPVD** benötigt, die Parameter und Protokollierung der Einzelvorgänge im PDF-Format abbildet.

Das deutsche Unternehmen Gamperl & Hatlapa stellt Messdatenerfassungen für den Spezialtiefbau her und bietet mit dem Monitor **DaVis 12** die Möglichkeit, vier Pumpen gleichzeitig zu steuern. Es können die Abbruchkriterien Druck oder Zielvolumen implementiert werden,

die Parameter am Bildschirm während der Überwachung werden als Trends von Druck und Volumen sowie der kumulierten Menge angezeigt. Der Touch-Screen mit 12 Zoll verfügt über die Hardwareschnittstellen CAN-Bus, Ethernet und USB für die weitere Übertragung. Mit der Auswertungssoftware **GUH<sup>MA</sup>** werden die am Monitor gespeicherten Daten ausgewertet. Die Übertragung auf den Computer erfolgt dabei mit einem USB-Stick. Die Software generiert mit den Daten die Protokolle der Einzelpunkte als PDF. In einer zusätzlichen Funktion können Tagesberichte mit dem Verbrauch und der tatsächlichen Arbeitszeit als MS Excel oder PDF exportiert werden. Zusätzlich bietet das Unternehmen eine online Datenbank an, in die bei Internetverbindung zum Monitor Schlüsselparameter nach Beendigung eines Vorgangs hochgeladen werden. Die Protokolle der **GUH<sup>MA</sup>**-Software werden den Injektionspunkten zugeordnet. Die Datenbank bietet außerdem eine Statistik der Arbeits- und Geräteleistungen sowie eine Standorterfassung auf einer interaktiven Karte [49].

RST Instruments Ltd. aus Kanada hat kompakte Messstationen für Poren- und Verdichtungsinjektionen entwickelt [21, 153]. Die Systeme tragen daher den Namen **Permeation / Compaction Grout Monitor**. Die Stationen sind dabei mit WLAN ausgestattet, womit eine Verbindung zu einem Feldcomputer ermöglicht wird. Die Applikation gewährleistet eine permanente Aufzeichnung der Parameter, ohne diese jedoch zu steuern. Die Daten werden im ASCII-Format gespeichert und lassen sich durch Tabellenkalkulationsprogramme weiterverarbeiten. Zum Ordnen und Ablegen der Daten bietet das Unternehmen die Webapplikation **Vista Data Vision** an. Das Datenmanagementsystem eignet sich insbesondere als einheitliche Plattform für eine Vielzahl von Datenloggern. Als Grundlage fungiert eine relationale MySQL Datenbank. Funktionalitäten, wie Benachrichtigungen per Kurznachricht bei Unregelmäßigkeiten, Reportfunktionen und ein File-Konvertierer für Datenformate fremder Datenlogger, werden durch die Software zur Verfügung gestellt.

Das italienische Bauunternehmen TREVI Spa verwendet die Injektionsanlagen und das Steuerungssystem des Tochterunternehmens soilmec, das ein eigenes System mit dem Namen **GPC-Grouting Parameter Control** anbietet. Die Steuereinheit misst die Parameter und sendet diese anschließend an eine zentrale Recheneinheit, die Werte der technischen Spezifikation mit den Herstellungsparametern vergleicht. In der Übersichtsinformation [154] wird angegeben, dass zukünftige Parameter automatisch auf Grundlage der Ist-Daten angepasst werden. Ein Berichtswesen ist in der Software implementiert, das Ausdrücke und Tabellenübersichten zur Verfügung stellt.

Ein Beispiel einer Steuerung von Gelinjektionen für kleine Injektions- und Dosierungsanlagen ist das System des Unternehmens DESOI GmbH. **Flow Control II** misst den Mengenverbrauch mit Hubzählung oder Durchflusssensoren, zwei Komponenten-Mittel werden unabhängig voneinander überprüft, um eine exaktes Mischungsverhältnis zu garantieren. Die Datenübertragung erfolgt mit USB-Stick. Das Auswertungsprogramm basiert auf einer MS Excel Arbeitsmappe [25].

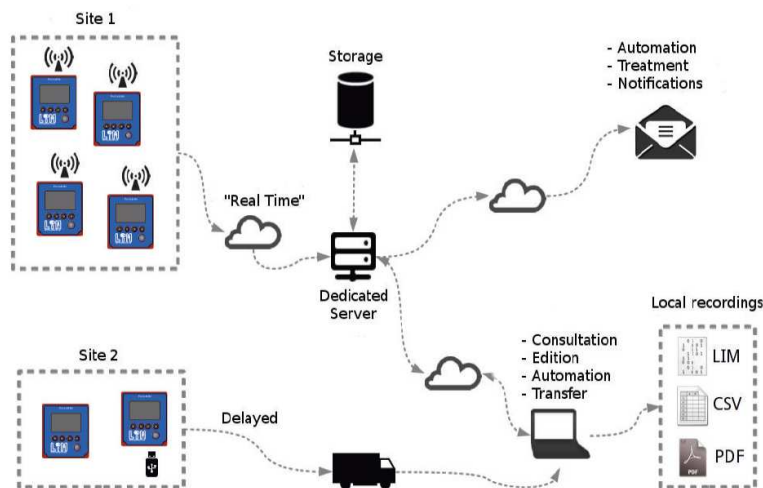


Abb. 4.5: Datenübertragung und Bearbeitung am Beispiel LIM [97]

Das System **IPER PVP System TS** des italienischen Herstellers Geo Misure Srl ermöglicht die Steuerung, Speicherung und Kontrolle von bis zu acht parallelen Injektionsvorgängen. Dabei werden alle Parameter während der Injektion gemessen und angezeigt. Der Vorgang wird automatisch durch die Integration des GIN-Kriteriums, sowie druck- und mengenabhängige Abbruchgrenzen gesteuert. Durch die Verbindung mit Mobilfunk oder einem Baustellenetzwerk können die Anweisungen eingespielt und bereits vorhandene Datensets weiterverarbeitet werden. Der Bildschirm verfügt über zwei USB-Anschlüsse für den Fall, dass eine manuelle Datenübertragung notwendig ist. Zur Weiterverarbeitung der Daten wird die Software **VISUAL-SGD** verwendet. Dadurch werden statistische Kenngrößen und Ausdrücke mit den Herstellungsverläufen zur Verfügung gestellt. Injektionsprotokolle sowie Übersichtslisten über definierte Zeiträume werden durch die Software ermöglicht [50].

Das Unternehmen aus Frankreich, LIM SAS vertreibt Datenlogger und Auswertungssoftware. In der Systemkonfiguration für Injektionsvorgänge können zusätzlich bis zu vier Pumpen durch die Parameter Druck, Volumen oder GIN gesteuert werden. Der Datenlogger besteht aus einem CAN-Bus-System für die Sensoren, einem internen Speicher von 2 GB und einem automatischen Datentransfer zum PC mittels USB-Stick. Das Übertragungsservice **LIM@MAIL** ermöglicht eine schnittstellenlose Übertragung mittels Mobilfunk oder Wifi. Die Software bietet eine Übersicht aller in Verwendung stehender Datenlogger, das Management von Datenfiles und den automatischen Versand von Files per E-Mail Adresse. Die Übersicht in Abb. 4.5 zeigt, dass die Datensets von einem Benutzer mit der PC-Software **LIMSoft** bearbeitet werden können. Reporte werden im PDF-Format erzeugt, Datenexporte als Textdatei [97].

Die Systeme von DAT instruments Srl besteht aus einem Logger, der bis zu vier Pumpen gleichzeitig steuern und aufzeichnen kann. Die Datenübertragung erfolgt über USB-Stick oder ein Online-Ablagesystem des Unternehmens. Dieses ordnet die PDF-Ausdrücke den Projekten zu und übermittelt Informationen per E-Mail an die Baustellenorganisation. Die

**Tab. 4.3:** Auswahl bestehender Injektionssteuerungen und Auswertungssoftware

Unternehmen	Steuerung	Auswertungssoftware
DAT instruments Srl	JET AME 4000	JET S 104
DESOI GmbH	Flow Control	Microsoft Excel
Gamperl & Hatlapa GmbH	DaVis 12	GUH <sup>MA</sup>
Geo Misure Srl	IPER-PVP-System-TS	Visual-SGD
Häny AG	HWS	P&Q Registration
JEAN LUTZ SA	CINTAC 15	EXPVD
Lim SAS	PocketLIM 5G	LIMSoft
MAI International GmbH	MAI©LOG	Microsoft Excel
Mühlhäuser-Obermann GmbH	LOG SG	LOG Access
RST Instruments Ltd.	Grout Monitor	Vista Data Vision
STS Scheltzke GmbH	RMS	Ninja2
TREVI S.p.A.	GPC	GPC-Software
Züblin Spezialtiefbau GmbH	exges IDE	Microsoft Excel

Software **JET S 104** ermöglicht die eigene Auswertung von Messdaten und einen Export in MS Excel. Das Unternehmen MAI International GmbH hat einen Datenlogger, der eine Injektionspumpe pro Aufzeichnungsgerät steuert. Mit Compact-Flash Speicherkarte werden die Daten auf einen PC übertragen und können anschließend in MS Excel ausgewertet werden.

Die Auflistung der beschriebenen Systeme in Tabelle 4.3 zeigt, dass eine breite Produktpalette von Steuerungen und Datenerfassungseinheiten am Markt angeboten werden. Die Steuerungen unterscheiden sich im Wesentlichen in der Möglichkeit der Bedienung gleichzeitiger Vorgänge. Hier werden Lösungen für eine bis 15 Pumpen angeboten. Die Datenübertragungsart für die weitere Bearbeitung am Computer wird in den meisten Fällen mittels eines mobilen Datenträgers, wie USB-Stick bewerkstelligt. Module, die eine Weitergabe über direkte Schnittstellen, wie Mobilfunk, Wifi oder Ethernet ermöglichen, werden teilweise zusätzlich angeboten und in die bestehenden Lösungen integriert. Vereinzelt gibt es Webservices, die Protokolle geordnet ablegen, eine Datenvernetzung aber nicht möglich machen. Die Vielzahl an Produkten bewirkt, dass unterschiedliche Übergabeformate zum Einsatz kommen.

In der Datenverwaltung ist auffallend, dass die Unternehmen das Hauptaugenmerk auf die Erstellung von Berichten lenken und eine weitere Verwendung der Daten als sekundär betrachtet wird. Der Produktvergleich für die Systeme der Bohr- und Injektionstechnik aus Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 zeigt, dass die Auswertung der Berichte in unterschiedlichen

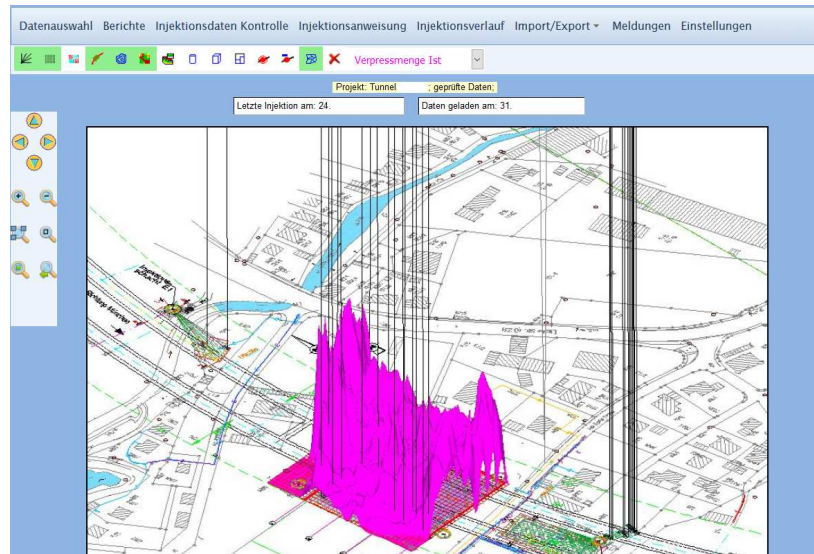


Abb. 4.6: Visualisierung einer Hebungsinjektionen im Grout Control [52]

Auswertungssoftware getrennt erfolgt und kein System besteht, dass alle Dokumentation und Berichterstattung zentral wiedergibt und verwaltet.

### 4.3.3 Bestehende Analysysteme

Die vorgestellten Monitoringsysteme bedienen sich der Datenerfassungseinheiten, um komplexe Injektionsverfahren zu überwachen. Sie grenzen sich von den Steuerungs- und Erfassungseinheiten ab, indem sie bereits aufbauend auf den Herstellungsdaten einfache Analysen zur Verfügung stellen.

**gtcGroutControl**© der Ingenieurgesellschaft für Informations- und Planungstechnologie aus Bochum hat sich auf die Verformungsmessung in Echtzeit bei Kompensationsinjektionen spezialisiert. Die Verformungen des Baugrundes werden dabei mit Druckschlauchwaagen oder Vermessungssystemen wie Theodolit oder Totalstation aufgenommen. Das System gibt einen Überblick über alle Injektionsdaten und verknüpft diese mit den Verformungsmessungen. In diesem Zusammenhang kann ein Vorschlag einer Injektionsfestlegung für den Planer erstellt werden. Eine Schnittstelle zu einem Bohrlochvermessungssystem ist laut Hersteller im System enthalten. Abb. 4.6 zeigt einen Ausschnitt einer 3D-Visualisierung aus dem Programm. Diese bedient sich im Hintergrund bestehender 2D-Pläne und ermöglicht eine schnelle Zuordnung der Injektionsdaten. Das Datenmanagement erstellt Arbeitsberichte in MS Excel, XML-, PDF- und HTML-Format und archiviert die Datensätze für spätere Abfragen. Arbeitsanweisungen für die Steuerungseinheit kann in Papierform oder direkt über das Netzwerk an den Injektionscontainer weitergegeben werden [52]. Das Programm ist in der Webapplikation **gtc Visual** integriert. Diese stellt ein Datenbanksystem mit webbasiertem Zugang dar. Dabei wird eine Visualisierung der Messwerte in Form von Tabellen

und Bewegungsgrafiken bereitgestellt. Eine Alarmfunktion bei Überschreitung von Messwerten ist in der Webplattform integriert.

**SOFIA** steht für Software für Injektionsdatenauswertung und wird vom Bauunternehmen Züblin Spezialtiefbau GmbH entwickelt und vertrieben. Es wird für Kompensationsinjektionen benutzt, indem ein Schlauchwaagensystem mit einem Computer verbunden ist. Messpunkte und die Injektionspunkte der einzelnen Ventile eines Manschettenrohres werden koordinativ erfasst. Während der Ausführung der Kontaktinjektion beobachtet man die Schlauchwaagen bis sie gerade ansprechen. Dieser Zustand wird dem System zurückgegeben. Sofern es in weiterer Folge der Bautätigkeiten zu Setzungen kommt, erstellt SOFIA Injektionsanweisungen, die anschließend als Injektions-Arbeitsanweisungen in die Steuerung importiert werden können. Messdaten und tatsächliche Verpressmengen werden in das System übertragen. Dieser Prozess wiederholt sich, bis die Setzung neutralisiert ist<sup>34</sup>.

**IntelliGrout** ist ein patentiertes Real-time-Monitoring, das die Verfahren von Bohren und Injektion kontrolliert und die aufgenommenen Herstellungsdaten analysiert. Die amerikanischen Bauunternehmen Gannet Fleming und Advanced Construction Techniques (A.C.T.) haben das patentierte System erstmals 2003 vorgestellt [32]. Dieses ist insbesondere für Linienbaustellen konzipiert und wurde für die Sanierung großer Dämme ausgelegt [161]. Das Programm integriert die Daten der Steuerungseinheiten der Injektion und stellt eine Ist-Darstellung und Analyse der Injektionsdaten als Plot zur Verfügung. Die Daten werden in einer zentralen Datenbank gespeichert und die Visualisierung der Daten wird im Computer Aided Design and Drafting (CADD)-Format hergestellt. Diese werden wöchentlich auf einer Website, die für Projektverantwortliche freigeschaltet ist, abgelegt [162, S.36].

**iGrout** ist ein Kontrollsystem von Bohr- und Injektionsprozessen für Geräteanlagen, die häufig den Standort wechseln müssen. Das System wurde, ähnlich wie IntelliGrout, insbesondere für Abdichtungsinjektionen bei Dammsanierungen entwickelt. Die Steuerungen der mobilen Geräte werden mit Wifi-Sendeinheiten ausgestattet. Ein zentraler Baustellenserver sammelt die entstehenden Daten. Die Parameter Tiefe, Druck der Injektion und des Packers, sowie Menge werden dabei aufgezeichnet. Die Mitverfolgung von sechs Prozessen gleichzeitig ist möglich. In den Vorratsbehälter der Mischanlage wird ein Sensor angebracht, der den gemischten Mengenstand kontrolliert, und dem Personal signalisiert, wann eine weitere Mischung herzustellen ist. Ein weiterer Sensor misst den Druck nach dem Pumpenauslass. Die Daten werden in einer SQL-Datenbank gespeichert und für Reports genutzt. Durch die mögliche Zuordnung zu Bohrpunkten können Visualisierungen einzelner Bohrprofile erstellt werden. Ein Webinterface ermöglicht den Download von Protokollen und Tagesberichten im MS Excel-Format, die danach für die Abrechnung maßgebend sind. Eine Funktion mit Zeitstempel ermöglicht dem Personal während der Beobachtung von Wasserabpressversuchen oder Injektionen, Kommentare hinzuzufügen. Ein Lugeon-Vergleichswert für das aktuelle Injekti-

<sup>34</sup>Die Funktion des Systems wurde durch Mitarbeiter der Mechatronikabteilung der Züblin Spezialtiefbau GmbH. erklärt.

onsmittel wird durch Berechnung mit der aktuellen Marshzahl dargestellt. Die Visualisierung erfolgt mittels AutoCAD [58].

**CAGES** [33] steht für Computer Aided Grouting Evaluation Software und wurde entwickelt, um die Abdichtungsfunktion von Injektionsmaßnahmen zu beurteilen [109]. Das kanadische Unternehmen ECO Grouting Specialisits Inc. entwickelt und vertreibt dieses Produkt. Einerseits werden damit die aktuellen Operationen ständig überwacht, andererseits die Durchlässigkeit des Baugrundes ermittelt. Dabei können bis zu acht Injektionspumpen gleichzeitig überprüft werden. Die Datenbank ermöglicht einen Ausdruck der Reports als PDF-Datei. Die Berechnung der Durchlässigkeit beruht auf der Gegenüberstellung der Ausgangs-Transmissivität und den vorgeschriebenen Lugeon-Zahlen. Dies kommt dem Abbruchkriterium Apparent-Lugeon, dargestellt in Abschnitt 3.8 gleich. Das Überwachungssystem macht eine gleichzeitige Injektion von Zonen mit ähnlichen Eigenschaften möglich. Die Software berechnet ständig die Lugeon-Zahlen, den Injektionsradius und das injizierte Volumen. Über die Injektionsprotokolle hinausgehende Visualisierungen werden nicht angeboten.

Das weltweit tätige Unternehmen Soletanche Bachy hat eine Vielzahl von selbstentwickelter Software im Portfolio, das in Kombination als Analysesystem für Hebungsinjektionen agiert. Die Schnittstellen der Programme sind in Abb. 4.7 dargestellt. **ENPASOL** ist die Bohrdatenerfassung, die Bohrprofile auf Grundlage der Herstellungsdaten erstellt. In Gegenüberstellung mit der Bodenerkundung können die Annahmen zur Baugrundbeschaffenheit des Injektionskonzeptes verifizieren werden. **SPICE** ist das zentrale Datenmonitoringsystem zur Steuerung der Injektionen [129]. Im Programm Castaur werden die 3D-Modelle erstellt und die Bohraufteilung sowie die erwarteten Injektionsmengenaufnahmen ermittelt. Im Modul Sphinx werden die Abbruchkriterien den einzelnen Passen zugeordnet und die Injektionsanweisungen erstellt, die in der Steuerung ausgeführt werden. Im Scan-3D können die Injektionsdaten in Schnitten oder 3D-Modellen visualisiert werden. Das Geoscope ist eine Webplattform, die Setzungskurven darstellt und die Reaktion auf die Injektionsmaßnahmen des iterativen Planungsprozesses zur Verfügung stellt. Die Auswertung erfolgt im Programm Cognac, die Ergebnisse werden im Anschluss wiederum im 3-D Modell den einzelnen Injektionsventilen zugeordnet [84].

**eguana SCALES** nennt sich ein in Entwicklung befindendes Produkt, das sich aus dem gegenständlichen Forschungsprojekt „Baudatenmonitoring für den Spezialtiefbau“ ergeben hat und in ersten Modulen umgesetzt wurde. Das Programm wird im Detail in Abschnitt 7.3 ab Seite 197 beschrieben sowie in Kapitel 8 hinsichtlich der Vorteile evaluiert.

Die Marktanalyse zu den Systemen in der Injektionstechnik in Tabelle 4.4 zeigt, dass die eigentlichen Datenmonitoringsysteme im Zuge von großen Projekten entwickelt wurden. In technischer Hinsicht konnten dabei Systeme für Dammsanierungen und Hebungsinjektionen, insbesondere im innerstädtischen Bereich, als Haupteinsatzgebiet identifiziert werden. Die Systeme wurden mit Hauptaugenmerk darauf entwickelt, dass Aussagen über den technischen



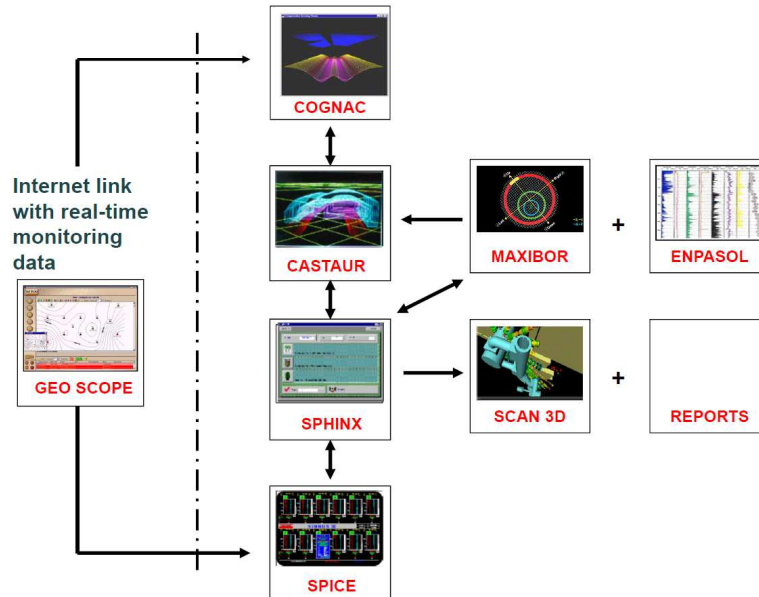


Abb. 4.7: Schnittstellen der Software von Soletanche Bachy [84]

Tab. 4.4: Auswahl bestehender Monitoringsysteme in der Injektionstechnik

Unternehmen	Datenmonitoring	Anwendungsbereich
ECO Grouting Specialists Inc.	CAGES 12.0	Abdichtungsinjektionen
eguana GmbH	SCALES	Daten- und Prozessmanagement
Gannett Fleming Inc.	IntelliGrout©	Abdichtungsinjektionen
GeTec GmbH	gtcGroutControl©	Hebungsinjektionen
Hayward Baker Inc.	iGrout	Abdichtungsinjektionen
Soletanche Bachy	SPICE	Datenmanagement
Züblin Spezialtiefbau GmbH	SOFIA	Hebungsinjektionen

Erfolg der Maßnahmen möglich sind. Modelle zur kombinierten, automatischen Bewertung der Qualität von Injektionsmitteln in Verbindung mit den Herstellungsparametern der Injektion und zeitgleicher Visualisierung werden in den Veröffentlichungen der Universität Tianjin [174], [38] diskutiert. Dabei werden vier Funktionen, die in einer Webplattform integriert sind, vorgestellt. Neben den 3D Planungen und einer Vorhersage der geologischen Randbedingungen der Injektionslöcher wird in einem Modul auf die Analysemethoden der Injektionsparameter eingegangen. Die Datenbank, die über eine Webplattform abgerufen werden kann, ordnet den geplanten Bohrlöchern, deren Ausführungsdaten zum Bohren und Injizieren, digitale Bohrlochbilder und Daten von Wasserabpressversuchen zu. Das Monitoring und Alarmsystem stellt erste Analysen, wie durchschnittlich verbrauchte Zementmasse pro Meter zur Verfügung. Bauzeitliche Analysen und Auswertungen zu den Anlagezeiten und Optimierungen des Bauablaufes werden im System nicht berücksichtigt. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Injektionsprogrammes werden die Daten nicht weiterverarbeitet.

#### 4.4 Datenmanagement mit Tabellenkalkulationsprogrammen

Die Einschätzung der Entwicklungsstufen in Tabelle 4.1 sowie die Produktanalyse von Auswertungssoftware in Tabelle 4.3 zeigt, dass die Nachbearbeitung und Analyse von Injektionsdaten weiterhin von einer starken Abhängigkeit von Tabellenkalkulationsprogrammen wie MS Excel geprägt ist. Für einen kontinuierlichen Datenverarbeitungsprozess ergeben sich dabei einige Nachteile. In der Veröffentlichung von Panko [122] werden die häufigsten Rechenfehler von Tabellenkalkulationen angeführt. Der Artikel gibt an, dass 88 % aller Tabellen mit mindestens einem Fehler besetzt sind. Das hat auf die Gesamtaussage der Rechenoperation teilweise weitreichende Folgen. Es ist zu erkennen, dass Benutzer, die rudimentäre Bedienungen wie Schreiben durchführen, rund 0,5 % aller Datenpunkte mit Fehlern besetzen. Dieser Prozentsatz steigt nach Panko auf 5 % an, sofern logische Aktivitäten damit verbunden sind, wie etwa das Entwerfen einer eigenen Excel-Arbeitsmappe.

Im Gegensatz zu Programmen sind Tabellenkalkulationen hinsichtlich ihrer Überprüfung langwierig, was zur Folge hat, dass viele selbstgenerierte Berechnungen nicht getestet und in einem ungeprüften Stand auf Baustellen herangezogen werden. Die Fehler teilen sich in qualitative und quantitative auf. Die quantitativen Fehler berechnen ein Modell falsch auf Grundlage von fehlerhaften Formeln und Zellenverknüpfungen. Qualitative Fehler, wie missverständliche Eingabehilfen oder die Möglichkeit des Überschreibens von Formeln, führen zu Beginn nicht zu falschen Berechnungen, haben jedoch fehlerhaften Ergebnisse zur Folge. Quantitative Fehler unterteilen sich in Planungs- und Ausführungsfehler [123]. Auf Baustellen wird problemspezifisch eine schnelle Möglichkeit der Datenverarbeitung benötigt. Aus diesem Grund wird eine Excel-Tabellenkalkulation herangezogen, ohne diese ausführlich zu planen. Die richtigen Algorithmen und Funktionen werden nicht für Allgemeinfälle überdacht. In der Ausführung kommt es zu Flüchtigkeitsfehlern, indem beispielsweise auf falsche Zellen

referenziert wird, Bereiche nicht vollumfänglich einbezogen werden, oder Tippfehler passieren. Diese Fehler können teilweise automatisch überprüft werden oder lassen sich durch Kontrollen beheben. Im Gegenteil dazu kommt es, insbesondere bei verschachtelten Funktionen, zu Speicherfehlern, da der Entwickler Teile in der Formel vergisst. Dieser Wegfall von Funktionsteilen kann nachträglich kaum detektiert werden. Bauleiter oder Projektverantwortliche nehmen ihre sogenannten „Master-Dateien“ ins nächste Projekt mit. Das hat wiederum zur Folge, dass die individuellen Lösungen nur vom Ersteller verstanden und überprüft werden können. Die Kalkulationen sind dabei unflexibel und schwer auf neue Verhältnisse anzupassen. Die fehlende Systemdokumentation in den Excel-Arbeitsmappen führt dazu, dass Berechnungsformeln beim wiederholten Einsatz nicht überprüft werden können.

Gewerkspezifisch wiederholen sich die Prozesse in der Arbeitsvorbereitung, Ausführung und Dokumentation bei jedem Projekt. Die Entwicklung von internetbrowserbasierten Programmen nehmen im Baubetrieb zu. Die Programme ermöglichen diverse Schnittstellen, vom Bauprozess zu übergeordneten Geschäftsprozessen unterschiedlicher Interessenvertreter und verarbeiten Daten unabhängig vom Standort, in zentralen Datenbanken. Im Vergleich zu den Excel-Arbeitsmappen weisen Webapplikationen folgende grundlegende Vorteile auf:

- Die Nutzung ist von mehreren Beteiligten gleichzeitig möglich.
- Die Daten sind zur Zeit des Zugriffs am aktuellen Stand.
- Die Konsistenz der Daten wird sichergestellt und Redundanzen werden ausgeschlossen.
- Die Systeme sind nicht auf ein Betriebssystem begrenzt und müssen nicht installiert werden.
- Die Applikation vergibt unterschiedliche Benutzerrechte und ermöglicht damit die Vertraulichkeit der Daten. Rechte des Dateninhabers können sichergestellt werden.
- Der Dateneingabeprozess wird durch geführte Prozesse standardisiert und die Nutzbarkeit dadurch erhöht.
- Die Protokollierung der benutzerspezifischen Änderungen verbessert die Nachvollziehbarkeit.
- Eine optimierte Darstellung ist für alle Endgeräte möglich.
- Updates und Versionierungen werden global übernommen.
- Auf der Baustelle entfällt das Versenden des Reports mittels Mail und die Ablage auf Dateiservern.
- Geeignete Schnittstellen ermöglichen anderen Systemen, die unternehmensweite Geschäftsprozesse abwickeln, den automatisierten Zugang zu relevanten Daten.
- Verbesserte Performance bei Verwendung von relationalen Datenbanksystemen, da nicht der gesamte Datenbestand geladen werden muss.

- Standardisierung von Dokumentations- und Analyseprozessen.

Die letztliche Entscheidung, unter welchen Umständen sich die Entwicklungskosten und Instandhaltung der Programme im Vergleich zu Excel-Arbeitsmappen amortisieren, hängt im Wesentlichen vom Zusammenspiel und der übergeordneten Unternehmensstruktur ab. Die aufgelisteten Vorteile lassen sich nur zum Teil qualitativ bewerten. In heutigen Bauunternehmen werden die sogenannten Anwendungsfälle mit Zeitersparnissen in der Ausführung gegengerechnet.

## 4.5 Datenmanagement bei anderen Bauverfahren

Bei anderen Bauverfahren, wie beispielsweise dem maschinellen Tunnelvortrieb oder dem Düsenstrahlverfahren, werden bereits seit Beginn der Entwicklung Daten zur Steuerung und für die Qualitätskontrolle erhoben und gespeichert. Die Bestandsanalyse wurde im Zuge dieser Forschungsarbeit auf Datenmonitoringsysteme anderer Gewerke ausgeweitet, um einen neutralen Vergleich zu ermöglichen und Erkenntnisse für die Modellbildung heranziehen zu können<sup>35</sup>.

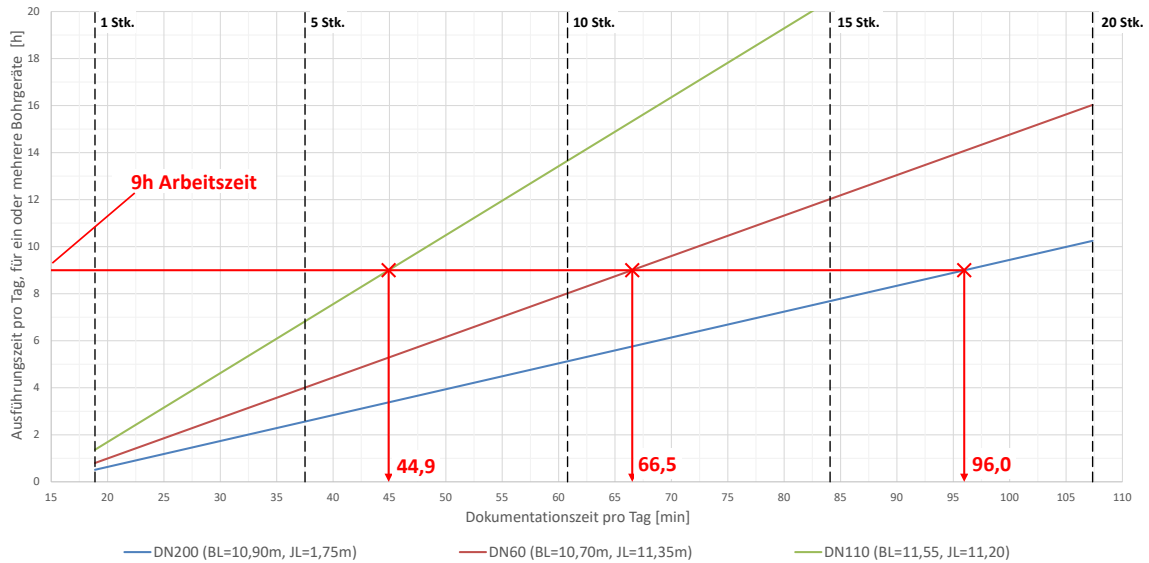
Braumann [12] ermittelte den aktuellen Stand der Datenmonitoringsysteme im Rohrvortrieb. Dabei identifizierte er, dass die Speicherung der Gerätedaten in numerischen Wertetabellen stattfindet, zur Weiterverarbeitung dieser, Datenträger übergeben werden und Analysen vorwiegend in Tabellenprogrammen stattfinden. In der Branche wird die Einführung einer zentralen Datenbank diskutiert, die für alle Interessensvertreter in verschiedenen Hierarchien zum Einsatz kommen soll. Die digitale Überwachung der Baumaßnahmen in Echtzeit ist beim Rohrvortrieb bereits in den Leistungsverzeichnissen festgehalten. In der Ausführung wird dem Auftraggeber zumeist eine Lesefunktion gegeben, die jedoch ohne zusätzliche Auswertungsfunktionen und Interpretationshilfen zu Komplikationen in der Kommunikation führen. Softwareprodukte für Vortriebsmaschinen ermöglichen darüberhinaus Leistungs- und Bauzeitprognosen. Die untersuchten Systeme liefern eine standort- und benutzerabhängige Nutzung der Daten über Internetbrowser. Die automatischen Berichterstattungen, Echtzeitüberwachungen der Vortriebsmaschine, Benachrichtigungen bei Grenzwertüberschreitungen und die Integration weiterer externer Datenquellen können gewährleistet werden. In einem System gibt es die Möglichkeit der Selbstgestaltung von Dashboards zur benutzerspezifischen Anpassung der Softwareoberfläche. Die Diplomarbeit von Braumann zeigt, dass exportierte Berichte, immer durch Bautechniker manuell auf die Projektspezifika angepasst werden. Die durchgeführte Befragung zu Anforderungen für moderne Datenmonitoringsysteme bei Auftraggeber und Auftragnehmer ergab die Modellierung in eine dynamische und statische Berichterstattung. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die heutigen Systeme nicht auf die

<sup>35</sup>Die zitierten Arbeiten in diesem Kapitel wurden im Zeitraum von 2015 bis 2018 durch den Autor geleitet und betreut.

Anforderungen der einzelnen Stakeholder angepasst sind. In einem Pflichtenheft wurden die geforderten Parameter, die Art der Berichterstattung, die zeitlichen Benachrichtigungsintervalle und die Darstellungsformen ausgewertet. Des Weiteren müssen für eine umfassende Bewertung des Bauverfahrens betriebswirtschaftliche Daten des Bautagesberichts und Prüfungen der Prüflabore digitalisiert und mit dem Datenstamm verknüpft werden. Durch die Integration der beschriebenen Punkte erwarten sich die Beteiligten im Rohrvortrieb eine Verkürzung der Dokumentationszeiten, ein schnelles Erkennen von Fehlern und reduzierte Reaktionszeiten darauf, eine automatische Kontrolle des Materialbestands, eine automatisierte Abrechnung, eine Prozesserfassung und dadurch resultierende Optimierung des Bauprozesses [11].

Lengauer [94] beschreibt in ihrer Arbeit die Systemunterschiede bei der Erfassung und Auswertung von Herstellungsdaten des Bauverfahrens Düsenstrahlverfahren. Dabei können zwei Trends in der Entwicklung unterschieden werden. Bei der Soft- und Hardware bilden sich in der Spezialtiefbaubranche zwei Gruppen. Große Unternehmen setzen auf interne Entwicklungen und entwickeln ihre eigene Soft- und Hardwarekomponenten. Die zweite Gruppe kauft Module zur Steuerung und Auswertung zu und passt diese je nach den Bedürfnissen und Bauherrenanforderung an. Aufzeichnungen der Qualitätsmessungen sind nicht digitalisiert und können daher nicht mit den Herstellungsdaten verknüpft werden [94, S.110]. Anhand eines entwickelten Entscheidungsbaum konnte der Digitalisierungsgrad in den Unternehmen aufgenommen werden. Bei der Befragung zeigte sich, dass Organisationen, die in eigene Entwicklungen investieren, auf Baustellenbedürfnisse besser angepasst sind. Digitale Rückkopplungen zur begleitenden Planung und zentrale Datenbanken sind nicht Stand der Technik. Der händische Übertrag und die Nachbearbeitung von Protokollen sowie die manuelle Verwaltung führen zu erhöhtem Aufwand in der Dokumentation. Ein optimierter, vollständiger digitaler und automatisierter Datenfluss wurde von der Autorin in einem digitalen Datenmanagement in fünf Stufen beschrieben. Beginnend bei der automatischen Messung und Speicherung, steht die Analyse und Visualisierung der Baustellendaten im Mittelpunkt moderner Systeme. Eine Optimierung des gesamten Bauablaufes kann nur erfolgen, wenn die Daten mit Baustellendaten anderer Bauverfahren vernetzt und in einer globalen Datenbank für alle Interessenvertreter verfügbar gemacht werden. Geeignete Softwarelösungen, die diesen Prozess unterstützen, sind zum Erhebungszeitpunkt noch nicht entwickelt worden. Die Studie zeigt Entwicklungspotentiale, die in diesem Gewerk noch vorhanden sind. Es ist zu erkennen, dass ausführende Unternehmen, die Messungen und Speicherung der Daten vornehmen, eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung von Systemen übernehmen und in den Experteninterviews zukunftsorientiert die Weiterverwendung von Daten diskutieren.

In der Forschungsarbeit von Honeder [68] wurden die Ausführungs- und Dokumentationsprozesse beim Düsenstrahlverfahren in Detailtätigkeiten visualisiert und analysiert. Bei der Aufnahme des tradierten Dokumentationsprozesses auf Musterbaustellen wurde die starke Prägung des Prozesses von manuellen Übertragungen und Bearbeitungen erkannt. Die Daten werden nur in Form von Protokollen der Abrechnung beigelegt. Der Fluss der Dokumentation bis hin zur Bearbeitung bei der Abrechnung kann dabei in drei Abschnitte kategorisiert



**Abb. 4.8:** Dokumentationszeit pro Tag in Abhängigkeit der Elementabmessung und der Ausführungszeit [68]

werden: Vorbereitungs-, Übertragungs- und Nachbearbeitungszeit. Die Zeiten des Dokumentationsprozesses konnten durch Messungen ermittelt werden. Bei der datensatzabhängigen Dokumentationszeit zeigte sich, dass die Kategorie der Übertragungs- und Abgleichszeiten den größten Anteil der Aufwände einnehmen. Der Anteil der Übertragungszeiten haben einen 20-fach größeren Anstieg im Vergleich zu den Vorbereitungs- und Nachbearbeitungszeiten. Dieses Ergebnis hat zur Folge, dass sich Bauunternehmen bei der Optimierung auf diesen Bereich konzentrieren sollten. Im Zuge der Analysen wurden Aufwandswerte des Ausführungsprozesses unterschiedlicher DSV-Bauteile im Verhältnis zu den Dokumentationszeiten gebracht, wie beispielhaft in Abb. 4.8 dargestellt ist. Durch den Zusammenhang wird ersichtlich, wie viele Bauteile bei einer durchschnittlichen produktiven Arbeitszeit durch das gewerbliche Personal erstellt werden können und welche Dokumentationszeiten für die Bautechnik entstehen. Dabei ergibt sich, dass eine tägliche Dokumentationszeit von bis zu 18 %<sup>36</sup> der täglichen Ausführungszeit entstehen kann [68].

Der konventionelle Tunnelbau ist der Injektionstechnik in seiner Eigenschaft der baubegleitenden Planungsanpassung sehr ähnlich. Die Baugrundreaktionen werden während der Ausführung aufgenommen und beeinflussen die weiteren Ausführungsprozesse. Auf Tunnelbaustellen ergeben sich mehr als 20 unterschiedliche Dokumentationsprotokolle die beginnend beim Vortrieb bis hin zum Labor, sowie im Magazin und in der Werkstatt entstehen. Bei Erhebungen auf Tunnelbaustellen wurde der Datenverarbeitungsprozess der einzelnen Protokolle ermittelt. Expertengespräche mit dem Baustellenpersonal, Shadowing-Methoden sowie Workshops wurden angewendet um den Dokumentationsprozess auf der Baustelle besonders exakt verfolgen und zeitlich bewerten zu können [136]. Aufbauend auf dem Bewertungskonzept

<sup>36</sup>Dieser Wert ergibt sich bei einer täglichen Ausführungszeit von neun Stunden für die Herstellung von DSV-Körpern von 200 cm [68, S.103].

für digitales Baustellenmonitoring [166] wurde der Datenfluss nach Abb. 4.2 auf Seite 76 in die Prozesscluster Aufnahme, Speicherung und Analyse geteilt. Dabei wurde festgestellt, dass 75 % der aufgewendeten Zeit, die mit den Dokumentationstätigkeiten verbunden ist, auf die Aufnahme und Speicherung entfällt. 25 % der Zeit fällt für weiterführende Analysen an<sup>37</sup>. Es zeigt sich, dass allein nur durch den Entfall redundanter Speicherungen bei einem konventionellen Tunnelvortrieb rund 200 Stunden pro Monat eingespart werden könnten. Die Modellrechnung stellt dar, dass der Anteil der freiwerdenden Zeit Lohnkosten von rund 11 500 € pro Monat in den unterschiedlichen Anstellungsverhältnissen bindet. Nicht zuletzt deshalb gilt, bei der Entwicklung von neuen digitalen Systemen auf eine zentrale Speicherung und definierte Schnittstellen zu achten.

Die angeführte Zusammenfassung der Forschungsarbeiten zu Datenmonitoringsystemen zeigt den Ist-Stand der Dokumentationstätigkeiten auf Baustellen, gegenständliche Entwicklungen sowie Potentiale, die durch Entwicklung zentraler Datenplattformen entstehen. Bei der zünftigen Planung und Modellierung von Programmen sollten unternehmensinterne Weiterentwicklungen der Steuerungseinheiten sowie Anforderungen aller Beteiligten berücksichtigt werden. Dies reduziert zeitaufwändige Arbeiten und projektspezifische Anpassungen in der Ausführung.

---

<sup>37</sup>Der Prozentsatz ergibt sich aus der Darstellung in [136, S.120].



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



# Kapitel 5

## Status quo

In diesem Kapitel werden die tradierten Injektionsprozesse im Baustellenbetrieb mit Hilfe von graphischer Notation visualisiert, beschrieben und diskutiert. Diese Prozessmodelle bilden in Verbindung mit den in Abschnitt 6.3 definierten Anforderungen die Grundlage für die Modellbildung in Kapitel 7 sowie für die vorgestellte Webplattform.

Die Bedeutung von Prozessmodellen nimmt in Bauunternehmen und Baustellenorganisationen vermehrt zu. Mit der graphischen Visualisierung und der begleitenden Beschreibung gelingt es in großen Organisationsstrukturen, Informationen über die Grenzen einzelner Geschäftsbereiche zu transportieren. Beim koordinierten Wissensmanagement werden diese Modelle als ein wichtiges Werkzeug verwendet, um bestehendes, etabliertes Wissen zu teilen. Für die Entwicklung neuer Systeme extrahieren Prozessmanager Potentiale. Positive Verbesserungen sind die Vereinheitlichung und Optimierung von Baustellenprozessen und Dokumentation, sowie ein Aufdecken von Möglichkeiten, wie manuelle Tätigkeiten und Benutzertasks durch technische Hilfsmittel automatisiert übernommen werden können.

Die Schwierigkeit bei der Aufnahme von Baustellenprozessen ist es, für jedes Bauverfahren einen Standard darzustellen, da einzelne Tätigkeiten in unterschiedlicher Art und Reihenfolge durchgeführt werden. Für Baustellenorganisationen müssen daher zu Beginn einzelne Projekte betrachtet und aus den Fallbeispielen ein Standard extrahiert werden. Die Unterscheidung von Ausführungs- und Dokumentationsprozessen ist notwendig, um Verantwortlichkeiten und Schnittstellen des Bauverfahrens selbst und vor- bzw. nachgelagerter Dokumentationen und Analysen verdeutlichen zu können.

## 5.1 Prozessmodell


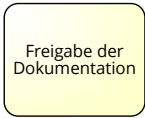

Prozessmodelle beziehen sich auf die Ausführungs-, Dokumentations- und Analyseprozesse, die auf den Baustellen entstehen. Dieses Kapitel zeigt, in welcher Form Bauprozesse identifiziert und visualisiert werden.

### 5.1.1 Grundlagen der Modellierung

Für die Visualisierung von Prozessen, Abläufen und funktionalem Verhalten gibt es eine Vielzahl von Notationen. Am geläufigsten sind dabei die Programmablaufpläne, besser bekannt als Flussdiagramme. Dabei werden Grenzstellen, Operationen und einfache Verzweigungen durch Bedingungen mit Flusslinien verbunden. Diese Art von Diagramm findet sich öfters in Normen wieder, um grobe Planungsprozesse wiederzugeben. Eine Weiterentwicklung dieser Visualisierung für Geschäftsprozesse sind die ereignisgesteuerten Prozessketten. Zur Beschreibung der Funktionalität werden in der Analyse je nach Aspekt unterschiedliche Modellierungen verwendet [124].

Die Prozessmodelle in dieser Arbeit konzentrieren sich auf die Kommunikation über Daten und Ereignisse auf der Baustelle. Mit der Notation der Object Management Group (OMG), die sich Business Process Modeling Notation nennt und in der Fassung 2.0 vorliegt, gelingt es die Vorgänge mit Daten, verwendeten Programmen sowie Entscheidungen zu verknüpfen. Die grafische Spezifikationsprache wird verwendet, um Geschäftsprozesse für alle Beteiligten verständlich zu machen.

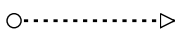

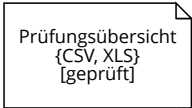

**Tab. 5.1:** Wichtigste Notationselemente mit Beispielen nach BPMN 2.0 [141] [75]

Symbol mit Beispiel	Bezeichnung	Beschreibung
	Pool and Lanes	Diese Bereiche repräsentieren Verantwortlichkeiten in einem Prozess. Ein Pool oder eine einzelne Lane kann eine Organisation, ein Prozessbeteiligter oder ein System sein. Lanes innerhalb eines Pools unterteilen Verantwortlichkeiten einer Organisationseinheit.
	Task	Ein Task repräsentiert eine Aufgabe, Aktivität oder Tätigkeit, die zu tun ist.
	Unterprozess	Ein Unterprozess ist eine Aktivität, die in einem weiteren Prozessdiagramm detailliert dargestellt werden kann.

**Tab. 5.1:** (Forts.) Wichtigste Notationselemente mit Beispielen nach BPMN 2.0 [75, 141]

Symbol mit Beispiel	Bezeichnung	Beschreibung
	Gruppe	Mehrere Objekte können in eine Gruppe zusammengefasst werden. Die Gruppierungen deuten eine logische Verbindung an und dienen der besseren Verständlichkeit des Diagramms.
	Nachrichten-Startereignis	Jeder Prozess beginnt durch einen definierten Start. Dieses Ereignis kann durch Auslösebedingungen präzisiert werden, wie etwa eine einzutreffende Nachricht oder ein zeitliches Ereignis.
	Zeit-Zwischenereignis	Die durch zwei Ringe angedeuteten Zwischenereignisse können in einem Prozess eintretende oder auslösende Eigenschaften haben. Eintretende Zwischenereignisse warten eine festgelegte Aktivität ab, um erst dann den Prozess fortführen. Auslösende Zwischenereignisse verzögern den Prozess hingegen nicht.
	Endereignis	Das durch dicken Rand dargestellte Endereignis markiert das Ende eines Prozesses. Dabei kann es zu einem normalen Ende des Prozesses oder anderen Endergebnissen kommen.
	Exklusives Gateway	Gateways sind Stellen, an denen sich der Prozess verzweigt. Beim exklusiven Gateway geht der Prozessfluss genau an einer Verzweigungsbedingung weiter. Bei einer Zusammenführung wird auf eine eingehende Kante gewartet, um den Prozess fortzuführen.
	Paralleles Gateway	Durchläuft ein Prozess ein paralleles Gateway, so werden alle nachfolgenden Zweige gleichzeitig ausgeführt. Bei einer Zusammenführung wird auf alle eingehenden Kanten gewartet, um den Prozess fortzuführen.
	Sequenzfluss	Der wichtigste Konnektor in Prozessdiagrammen definiert die Reihenfolge, in der die Tasks durchlaufen werden.
	gerichtete Assoziation	Assoziationen zeigen Informationsübergaben zwischen den Aktivitäten an. Sofern diese gerichtet sind, bedeutet die ausgehende Kante ein Schreiben und die eingehende Kante ein Lesen.

**Tab. 5.1:** (Forts.) Wichtigste Notationselemente mit Beispielen nach BPMN 2.0 [75, 141]

Symbol mit Beispiel	Bezeichnung	Beschreibung
	Nachrichtenfluss	Die Nachrichtenflüsse symbolisieren die Informationsübergabe über die Organisationsgrenzen hinaus. Sie können an Pools, Tasks oder Nachrichtenereignissen anheften.
 Tabellenkalkulation	IT-System	Dieses Artefakt beschreibt in Verbindung mit einer Assoziation, dass im Laufe einer Aktivität ein System oder eine Applikation verwendet wird.
 Prüfungsübersicht {CSV, XLS} [geprüft]	Datenobjekt	Das Datenobjekt verdeutlicht Informationen, wie Dokumente, E-Mails oder Handprotokolle, die durch den Prozess erzeugt werden und/ oder fließen.
 Datenbank / USB-Stick {CSV, XML, TXT, HTML, proprietäre DF}	Datenspeicher	Aktenschränke oder Datenbanken werden mit diesem Symbol visualisiert. Prozesse können Daten aus diesen Speichern lesen oder schreiben.






Durch die standardisierte Sprache gibt es die Möglichkeit, dass Prozessbeteiligte mit Personengruppen, die nicht in den Prozess involviert sind, besser kommunizieren [75]. Nach der Norm Information technology – Object Management Group Business Process Model and Notation [75] ist für die Notationselemente ein Metamodell hinterlegt, das Hersteller von Modellierungstools verwenden. Benutzer dieser Programme sind dadurch gezwungen, die Modellierungsregeln einzuhalten. Im Einsatz befindliche Modellierungstools mit Webplattformen im BPMN 2.0 sind beispielsweise camunda<sup>38</sup> und signavio<sup>39</sup>. Insbesondere im Kontext der verbesserten Kommunikation zwischen Bauindustrie und Softwareherstellern hat sich diese Notation in Bauunternehmen etabliert [142] und wird für die Ergonomisierung des Prozessmanagements [143] und Neuentwicklungen herangezogen [135, 165]. Nach der Verständigung können IT-Spezialisten mit den Prozessdiagrammen die manuellen Tätigkeiten identifizieren und durch geeignete Systeme diese in digitale, automatisierte Vorgänge transformieren.

BPMN 2.0 bedient sich einfacher Elemente wie Pools und Lanes und weiterer Symbole. Die wichtigsten Notationselemente sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Unter den Pools werden prozessbeteiligte Einheiten verstanden. Teilt man Prozesse in wichtige Untereinheiten, so kommen einzelne Lanes zum Einsatz. In den angeführten Beispielen dieser Arbeit werden als Organisationseinheiten die Ausführung, Planung und örtliche Bauaufsicht in Pools eingeteilt. Einzelne Lanes in der Ausführung werden mit Bauleitung, Qualitätssicherung oder Schichtmannschaft

<sup>38</sup> Plattform für Workflow und Decision Automation (<https://camunda.com>)

<sup>39</sup> Business Transformation Suite (<https://www.signavio.com>)

**Tab. 5.2:** Aufgabentypen im BPMN aus [75] und [157] für den Baubetrieb adaptiert

Beispiel	Beschreibung
 Positionsmengen berechnen	Ein Servicetask ist eine Aktivität, die automatisiert unter Nutzung eines Services erfolgt, wie beispielsweise einer Webapplikation.
 Dokumente drucken	Ein Benutzertask wird durch einen User ausgeführt und kann nicht in einfachere Aktivitäten unterteilt werden. Im Vergleich zu einem manuellen Task bedient sich der Benutzer bei der Ausführung des Vorgangs einer Software.
 Werte, Daten und Annahmen übertragen	Ein manueller Task wird durch Personen ohne zusätzliche äußere Hilfe oder Unterstützung von Softwaretools durchgeführt.
 Tagesdokumentation versenden	Ein sendender Task zeigt an, dass eine Nachricht zu einem externen Beteiligten übermittelt wird. Sobald die Nachricht abgesendet wurde, ist der Vorgang abgeschlossen.
 Ausführungsplanung erwarten	Der empfangende Task drückt aus, dass der Prozess abhängig von einer Information oder Nachricht eines externen Beteiligten ist. Sobald die Information erhalten wurde, ist der Vorgang abgeschlossen.

bezeichnet. Innerhalb einer Einheit wird die Verbindung zwischen unterschiedlichen Aufgaben mit einem durchgezogenen Sequenzfluss verbunden. Über die Grenzen hinaus ist ein strichliert dargestellter Nachrichtenfluss erforderlich. Dies verdeutlicht die Schnittstellen zu anderen Organisationseinheiten. Aufgaben werden über abgerundete Rechtecke dargestellt. Für den Vergleich zwischen tradierten und digital gestützten Dokumentations- und Ausführungsprozessen hat sich die Präzisierung der Tätigkeiten nach Tabelle 5.2 bewährt.

Auf einem höheren Abstraktionsniveau werden Unterprozesse verwendet, die in einem weiteren Prozessdiagramm ausgeführt sind. Kreise definieren Start-, Zwischen- und Endereignisse. Verzweigungen innerhalb eines Prozesses werden als Gateways bezeichnet und in Rautenform dargestellt. Die wichtigsten Verzweigungen sind der Exklusive Gateway, der einer Oder-Bedingung gleichkommt, sowie der Parallel Gateway, der eine Und-Bedingung ausdrückt. Der Exklusive Gateway wird mit einem X, der Parallel Gateway mit einem + gekennzeichnet.

Eine wichtige Rolle bei der Aufnahme von Ist-Prozessmodellen kommt den Artefakten zu. Darunter werden Annotationen, Datenobjekte und Gruppierungen verstanden, die Prozesse mit weiteren Informationen bestücken. Mit Hilfe der Annotationen gelingt es, den Geschäftsprozess in Verbindung mit IT-Systemen zu bringen und Textanmerkungen zu inkludieren. Gruppie-

rungen erhöhen die Verständlichkeit und ermöglichen die Referenzierung und Kontextbildung zu übergeordneten Prozessen oder Orten. Datenobjekte sind Dokumente in analoger oder digitaler Form, Datenspeicher und Nachrichten. Der zustandsabhängigen Deklaration von Datenobjekten in den Ist-Prozessmodellen ist für die Entwicklung eines optimierten Arbeitsablaufs wichtig. Durch die Einführung von eckigen Klammern erhalten Daten neben ihrer Bezeichnung einen Status. Möglichkeiten für einen Status sind nach Freund et al. [43]:

- erzeugt
- zu prüfen
- geprüft
- zu überarbeiten
- überarbeitet
- abgelehnt
- freigegeben/ unterzeichnet

Darüber hinaus wird in geschwungener Klammer die Art des Datenobjekts angemerkt. Der tradierte Dokumentationsprozess zeichnet sich durch Verwendung von Handprotokollen und indirekten Schnittstellen aus. Damit sich dieser Umstand in den Prozessvisualisierungen verdeutlichen und abzugrenzen lässt, werden folgende Datenarten in geschwungener Klammer ergänzt:

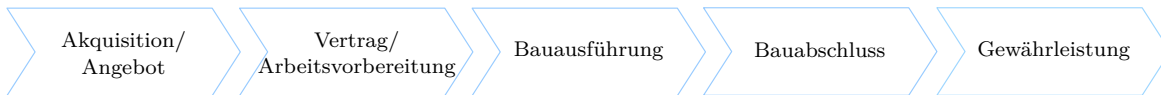
- analog: Handzettel, Protokoll, Papierplan
- digital: Bezeichnung der Datenformate wie CSV, XML, TXT, HTML, XLS, PDF und proprietäre Datenformate

Im Praxishandbuch BPMN [43] wird detailliert auf die Notationsregeln und alle Elemente eingegangen. Die wichtigsten Notationselemente finden sich in Tabelle 5.1.

### 5.1.2 Prozesslandkarten

Oberndorfer et al. definieren Bauprozesse als „gleichzeitig und aufeinander folgende, geplante und ungeplante Tätigkeiten, die zur Entstehung eines Bauwerkes führen“ [110, S.59]. Bauprozessmanagement und Lean Construction<sup>40</sup> konzentrieren sich auf das Erkennen von Prozessen, die nicht der Wertschöpfung dienen. Dabei werden Prozesse grundsätzlich in die drei Arten:

<sup>40</sup>Nach der Definition der VDI-Richtlinie 2553 [91, S.4] umfasst Lean Construction „Ansätze zur nachhaltigen Wertschöpfungssteigerung und Verschwendungsreduzierung im Bauwesen. Die dazugehörige Projektumsetzungskultur basiert auf Transparenz und Zusammenarbeit, effizienzsteigernden Methoden und kontinuierlicher Verbesserung und Lernen.“



**Abb. 5.1:** Wertschöpfungsprozesse in einem Bauunternehmen

Leistungsprozesse, Unterstützungsprozesse und Managementprozesse unterteilt. Synonyme für Leistungsprozess sind Wertschöpfungsprozess, Ausführungsprozess oder operativer Prozess. Typische Wertschöpfungsprozesse eines Bauunternehmens sind in Abb. 5.1 dargestellt und gliedern sich in fünf Phasen. Diese Art von Prozessen ist direkt an der Erstellung einer Bauleistung beteiligt. Die Wertschöpfungsprozesse sind in der Bauausführung durch Baudatenmanagementsysteme am meisten betroffen, die weiteren dargestellten Ausführungs- und Dokumentationsprozesse beziehen sich auf diese Phase. Die Unterstützungsprozesse sind in einem Bauunternehmen im Bereich des Personalmanagements und der Dienstleistung, wie IT, Wartung und Reparatur von Geräten und Gebäuden aufzufinden. Sie dienen dazu, die Leistungsprozesse erst möglich zu machen. Managementprozesse, die auch als Führungsprozesse bezeichnet werden, gewährleisten durch strategische Planung, Controlling, Finanzbuchhaltung und andere Prozesse die Grundlage für die beiden anderen Gruppen.

Effizient geführte Bauunternehmen verwenden Prozesslandkarten, um über die einzelnen Fachabteilungen hinweg ein Prozessdenken im Konzern zu integrieren. Dabei können, im Gegensatz zu Organigrammen, Prozesse von Anfang bis Ende überblickt werden. Dadurch transformieren sich Bauunternehmen schwerpunktmäßig von klassischen Aufbauorganisationen hin zu Ablauforganisationen. Prozesslandkarten, zumeist abstrahiert in vier bis fünf Level, zeigen, ausgehend vom Überblick der Geschäftsprozesse, eine Vernetzung bis hin zu detaillierten Ablaufbeschreibungen. Der definierte Geschäftsfall Bauausführung teilt sich in die Hauptprozesse Projektübergabe, Bauleistungsvorbereitung, Bauleistung und Abnahme. Der Teilprozess Bauleistung wiederum enthält die nach Bauphasen strukturierten Aktivitäten, Prozesse der Baustelleneinrichtung und nachgelagerte Aufgaben. Die Feststellung der Ist-Prozessmodelle auf Baustellen und die Aufdeckung der Potentiale für digitale Prozessunterstützung in der Ausführung und Dokumentation kommen im Teilprozess Bauleistung zu liegen. In der Ebene der operativen Tätigkeiten werden die Aufgaben und Aktivitäten mit Hilfe von Prozessdiagrammen detailliert dargestellt [165].

### 5.1.3 Prozessdiagramme

In Organisationsformen werden Prozessmodelle verwendet, um standardisierte Prozesse festzuhalten. Dazu werden grafische Spezifikationssprachen, sogenannte Notationen, verwendet. Injektionsprozesse sind zwar durch die angewendeten Bauverfahrenstechnik einer Standardisierung unterworfen, darin enthaltene Detailvorgänge zeichnen sich dennoch durch eine starke Volatilität aus und sind von den beteiligten Personen abhängig. Für die Aufnahme der Inhalte von Prozessdiagrammen werden in der Literatur unterschiedliche Verfahren verfolgt.

Bei einer Erhebung von Teilvorgängen ist immer zu klären, wer den Teilprozess auslöst und welche darauffolgende Aktivität erfolgt. Werkzeuge der Erhebung sind [6]:

- „Gespräche mit Prozessbeteiligten (Interviews)
- Erhebungsworkshops
- Studium von vorhandenen Dokumenten (Dokumentenanalyse)
- Fragebogenerhebungen
- Prozessbegehungen
- Laufzettel“

Im Zuge dieses Forschungsprojekts betreute der Autor die Forschungsarbeiten von Schiefer [136], Braumann [12], Honeder [68] und Nagl [107]. Dabei wurden unterschiedliche Methoden zur Aufnahme der Baustellenprozesse erprobt. Am Beginn der Prozessaufnahme steht dabei immer, die baustellenspezifische Dokumente zu analysieren und Literaturstudien zu den Bauverfahren durchzuführen. Bei eigenen Baustellenaufenthalten der Prozessmanager, mussten Tätigkeiten selbst ausgeführt oder mittels teilnehmender Beobachtung<sup>41</sup> die Prozessbeteiligten im Tagesgeschäft begleitet werden. In einem dritten Schritt validierten die Experten in Workshops die Prozessentwürfe zu einer vollständig konsolidierten Fassung. Das Laufzettelverfahren eignet sich für Geschäftsfälle, die viele unterschiedliche Standorte, durchlaufen, und ist für Baustellenprozesse weniger geeignet. Die beschriebenen Prozesse in dieser Arbeit wurden mit einer kombinierten Methodik aufgenommen, wobei Interviews, Dokumentenanalyse und Prozessbegehung die wesentlichen Werkzeuge darstellten.

Für die Bauphase der Injektionsarbeiten müssen die Abläufe in Ausführungs- und Dokumentationstätigkeiten unterschieden werden. Die Ausführungsprozesse zeigen auf, wo Daten und Dokumente ihren Ursprung haben, wie beispielsweise in Abb. 5.2 auf Seite 108 dargestellt. Die eigentlichen Dokumentationsprozesse erstrecken sich von der Aufnahme und Datenbereinigung bis hin zur Abrechnung und Analyse. Eine standartisierte Dokumentationsprozess zeigt Abbildung 5.4 auf Seite 111.

### Ausführungsprozesse

Die Ausführungsprozesse richten sich nach dem verwendeten Bauverfahren und dem festgelegten Injektionskonzept auf der Baustelle. Beispielhaft ist in Abb. 5.2 eine Abdichtungsinjektion beim konventionellen Tunnelvortrieb dargestellt. Die Darstellung zeigt den Ursprung der Maschinendaten und zu welchem Zeitpunkt im Arbeitsvorgang weitere, manuell erhobene, Daten entstehen. Dabei sind die Regeltätigkeiten einer Schicht zu erkennen. Die in blau

<sup>41</sup>Dabei wurde ein Job-Shadowing [53] durchgeführt, indem die Prozesszeichner die Techniker und Bauleiter tageweise begleiteten.



gekennzeichneten Pfade signalisieren den Regelablauf ohne Störungen. Der besseren Lesbarkeit wegen sind nur die Tätigkeiten, die nach Tabelle 5.2 nicht manuell durchgeführt werden müssen, gekennzeichnet. Diese Vorgänge stehen im Zusammenhang mit der Steuerungseinheit der Pumpen.

Die Ausführungsprozesse können bei Injektionen in Schichtbeginn-, Schichtend-, Start-, End-, Herstellungs- und Unterbrechungstätigkeiten gruppiert werden, wie in Abb. 5.3 zu sehen ist. Diese festgelegte Gruppierung im Ausführungsprozess ist notwendig, damit die Einzeltätigkeiten dem digitalen Bauprozessmanagement zugeordnet werden kann. Die weiterführenden Erklärungen dazu finden sich in Kapitel 7.

Für die Ausführung dienen am Beginn des Prozesses die Injektionsanweisungen der Bauleitung als Dateninput. Am Schichtbeginn werden vorbereitende Maßnahmen getroffen. Die Mengenerfassungseinheiten liefern Daten für die Abrechnung, und müssen deshalb regelmäßig überprüft werden. Dies passiert über Tests, wie Ausliterversuche. Steht Injektionsmittel aus der letzten Schicht zur Verfügung, wird dieses im Anschluss durch Einsicht des möglichen Bearbeitungszeitraums im Mischprotokoll kontrolliert. Nun wählt der Pumpenfahrer den zu beaufschlagenden Injektionspunkt aus. Dabei gibt es je nach Entwicklungsstand der Pumpensteuerung mehrere Möglichkeiten. Bietet die Steuerung eine Importfunktion, so können die Injektionspunkte aus einer Liste ausgewählt werden. Die Bauleitung bereitet diese Importfiles vor Schichtbeginn vor. Zumeist sind die Arbeitsanweisungen jedoch nur in Form eines Handzettels verfügbar. Der Pumpenfahrer gibt deshalb die Nomenklatur des Punktes in die Steuerung ein. Dieser Schritt ist essentiell, da die Injektionsidentifikation jegliche Zuordnung im weiteren Prozess ermöglicht. Gibt es am Beginn eines Projektes keine genaue Spezifikation der Identifikationsnummer, so können keine weiteren Visualisierungen und Analysen betrieben werden. Angaben zu Material, Anlage, einzelnen Pumpen oder Typen werden durch die Steuerung separat erfasst und müssen nicht in der Identifikationsnummer berücksichtigt werden. Die Nummer wird zumeist durch die Planung vorgegeben und beschreibt die Lage bis hin zu spezifischen Angabe der Tiefe. Die Anzahl der Stufen an diesem Punkt dient als Zählvariable, sofern ein Punkt wiederholt angefahren werden muss. Tabelle 5.3 gibt einige Beispiele für unterschiedliche Identifikationsnummern bei Injektionsarbeiten an.

Der Pumpenfahrer kommuniziert nun dem Packersetzer die Injektionsstelle und Tiefe. Die Kommunikation erfolgt auf der Baustelle durch Zurufe oder mit Hilfe von robusten Handsprechgeräten. Nachdem der Setzer den Packer und die Injektionsleitung ordnungsgemäß verlegt hat, wird die Injektion gestartet, und der Herstellungsprozess parallel durch den Pumpenfahrer im Injektionscontainer und dem Injektionshelfer beim beaufschlagten Punkt überwacht. Treten Fehler auf, so wird das Problem identifiziert und die Injektion abgebrochen oder pausiert. Im Regelfall wird der Herstellungsprozess durch die in der Steuerung implementierten Abbruchkriterien automatisch beendet. Nach der Beendigung oder dem Abbruch wird der Punkt im Injektionsprotokoll vermerkt und gleichzeitig der Packer abgeschlossen oder gelöst und ausgebaut. Können die darauffolgenden Injektionspunkte vom gleichen Ort

**Tab. 5.3:** Beispiele häufig verwendeter Identifikationsnummern

Verfahren	Beispiel	Erklärung
Tunnelabdichtung	258H_04300_c15_01_1	Tunnelröhre_Tunnelmeter_ Bohrung_Tiefe_Stufe
Baugrundsohle	02_I_031_2_1	Baugrube_Achse der Breite_ Achse der Länge_Ventil_Stufe
Schachtinjektion	112_xy1.1_25_036_1	Schacht_Bohrung_Ventil_Tiefe_Stufe
DSV	XYZ_122-L_1	Bauteil_Achse in x_Achse in y_Stufe
Hebungsinjektion	S1_105_041_2	Schacht_Bohrung_Manschette_Stufe
Rohrschirm	VN_E29_41_04_1	Vortrieb_Block_Bohrung_ Manschette_Stufe

aus beaufschlagt werden, so werden nur die Injektionsleitung und der Packer versetzt. In diesem Fall spricht man vom „Umsetzen“. Bedarf es eines Umstellens der Anlage für die nächsten Herstellungsvorgänge, so spricht man im Prozessmanagement vom „Umsetzen Allgemein“. Je nach Anzahl der Pumpen pro Anlage kann sich der Vorgang „Injektionspunkt beaufschlagen“ mehrmals wiederholen. Der Mischvorgang wird in der Regel wiederholt, sofern eine Mindestmenge im Vorratsbehälter erreicht ist. Die Mindestmenge richtet sich nach der maximalen Förderrate aller Pumpen und wird zumeist vom Pumpenfahrer über eine visuelle Füllstandsanzeige kontrolliert. Im Ausführungsprozess entstehen folgende Datensätze:

- Prüfbericht Sensoren {Handzettel}
- Mischbericht {Handzettel}
- Materialprüfung {Handzettel}
- Injektionsprotokoll {Handzettel}
- Tagesbericht des Schichtführers {Handzettel}
- Maschinendaten der Injektionspumpen {unterschiedliche Datenformate}

Die Visualisierungen des Ausführungsprozess haben sich im Rahmen der Implementierung von Datenmonitoringsystemen als probates Mittel für Einschulungen von neuem Personal ergeben und zeigen den Beteiligten einerseits, welche Tätigkeiten sie im Prozess erfüllen, andererseits wann sie Dokumentationen verrichten müssen. Visualisierungen geben den standardisierten Ausführungsprozess wieder und müssen durch die Qualitätssicherung bei Verfahrens- und Konzeptwechsel angepasst werden. Für die Analyse der Bauprozesse ermöglicht der standardisierte Prozess, dass Einzeltätigkeiten den erfassten Zeiten zugeordnet werden können. Die Gruppierungen fassen dabei einzelne Teiltätigkeiten zusammen, die danach anschließend im Bauprozessmanagement analysiert werden können. Die Gruppierung und Zuordnung der

Tätigkeiten in einem digitalen Bauprozessmanagement ist unter Abschnitt 7.2.1 auf Seite 184 weiter ausgeführt.

### Dokumentationsprozesse

Der Prozess der Dokumentation umfasst die Datenbeschaffung, Datenverarbeitung und rudimentäre Datenanalyse, und zeichnet sich durch tägliche und monatliche Periodizität aus. Weitergehende Analysen werden darüber hinaus bei Bedarf durchgeführt. Abb. 5.4 zeigt den allgemein gültigen täglichen Dokumentationsprozess auf den heutigen Injektionsbaustellen. In der Darstellung sind keine wöchentlichen oder monatlichen Dokumentationen enthalten. Im Regelfall beginnt die Qualitätssicherung, die je nach Baustellengröße von der Bauleitung selbst oder von einem Techniker durchgeführt wird, mit der Beschaffung von Maschinendaten, Handzetteln der gewerblichen Mannschaft und Dokumenten der Materialprüfungen. Die Steuerungen nach Tabelle 4.3 auf Seite 85 ermöglichen den häufigsten Datenübertrag per USB-Stick. Der Druck und Export der Injektionsprotokolle erfolgt mit Hilfe von Auswertungssoftware, die durch die Hersteller der Steuerung zur Verfügung gestellt werden. Alternativ gibt die Steuerung bereits CSV-Daten aus, die mit Hilfe von Excel-Kalkulationsprogrammen weiterverarbeitet werden.

Der manuelle Task der Vollständigkeitsprüfung erfordert eine hohe Aufmerksamkeit des Technikers, damit keine Files vergessen oder doppelt verarbeitet werden. Die Überprüfung erfolgt mit Hilfe der Tagesberichte der Schichtführer und der Injektionsprotokolle je Anlage der Pumpenfahrer. Sofern die Daten unvollständig zur Verfügung stehen, bedarf es der Rückfrage mit dem gewerblichen Personal. Die unvollständigen Daten werden, sofern möglich, ergänzt. Nach Abschluss der Vollständigkeitsprüfung müssen die wesentlichen Parameter entweder aus den einzelnen CSV-Dateien kopiert oder mittels händischen Übertrag in ein Kalkulationprogramm übertragen werden. Nach dieser Zusammenführung werden die auftraggeberspezifischen Visualisierungen bereitgestellt. Unter Zuhilfenahme von Zeichenprogrammen schafft der Techniker eine Verbindung zwischen Ausführungsplan und Herstellungsdaten. Für die erforderliche Leistungsmeldung werden Vergleiche mit den täglichen Arbeitsanweisungen angestellt, und der Bauleitung für die Dispositionsplanung weitergeleitet. Parallel erstellt der Techniker die Bautagesberichte und bedient sich dabei einer Excel-Tabelle oder weiteren Bautagesberichtstools [149].

Die Abb. 5.4 zeigt, dass der Qualitätssicherungsprozess der Materialdaten parallel geführt wird, und mit Hilfe von weiteren Tabellenkalkulationen die Prüfberichte erstellt werden. Sofern Toleranzüberschreitungen auftreten, nimmt die Qualitätssicherung gemeinsam mit dem gewerbliche Personal Anpassungen vor. Die Materialprüfungen werden in den Bautagesbericht eingetragen, und die Dokumentation zusammengestellt. Die Archivierung der Herstellungs- und Qualitätsdaten werden danach digital und als Papiausdruck archiviert und zur Freigabe an den Bauleiter weitergeleitet. Nachdem die Bauleitung die Dokumentation freigegeben

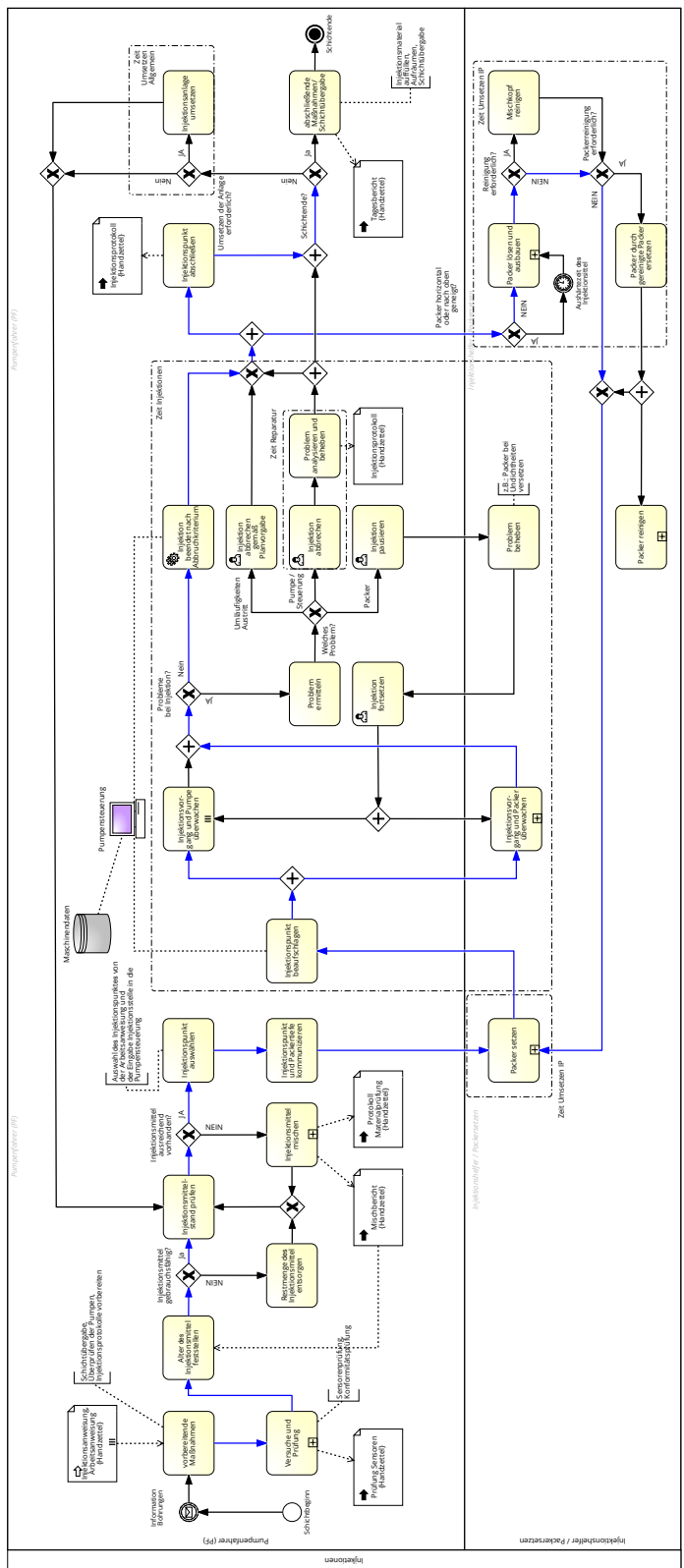


Abb. 5.2: Ausführungsprozess bei Felsinjektionen

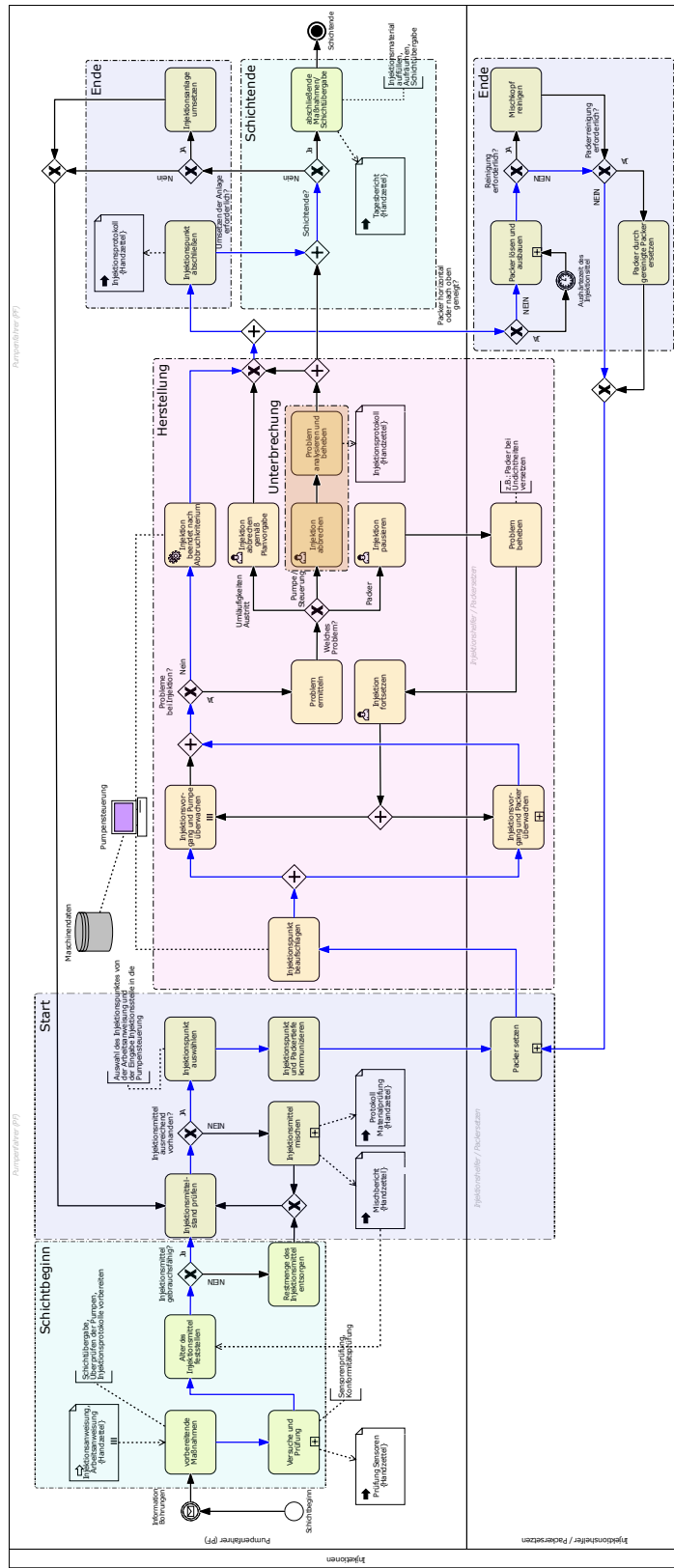


Abb. 5.3: Ausführungsprozess mit Gruppierungen für digitales Prozessmanagement bei Felsinjektionen

hat, werden täglich die vertraglich vereinbarten Tagesübersichten und Visualisierungen an die Fachplanung und die örtliche Bauaufsicht übergeben. Diese binden die Dokumentationen in ihre eigenen Monitoringsysteme ein. Auf Grundlage der Herstellungsdaten erstellt die Fachplanung im Anschluss die weiteren Injektionsfestlegungen, die dem ausführenden Unternehmen abschnittsweise zu Verfügung gestellt werden.

Die Tagesübersichten werden im monatlichen Abrechnungsprozess als Datenspeicher herangezogen. Dabei werden die Injektionsmassen nach dem Mischungsverhältnis und der Formel in Abschnitt 3.7 auf Seite 59 aufgeteilt und die Gesamtinjektionszeiten errechnet. Ergänzend werden zeitgebundenen Kosten mittels händischem Übertrag in Aufmaßblätter der übergeordneten ERP-Software integriert. Die Tätigkeiten des Bautechnikers bei der täglichen Dokumentation teilt sich in die Vorbereitungszeit, die Übertragungs-/Abgleichzeit und die Nachbearbeitungszeit. Die Gruppierung in Abb. 5.5 zeigt die Tasks, die der jeweiligen Gruppe zugeordnet werden können.

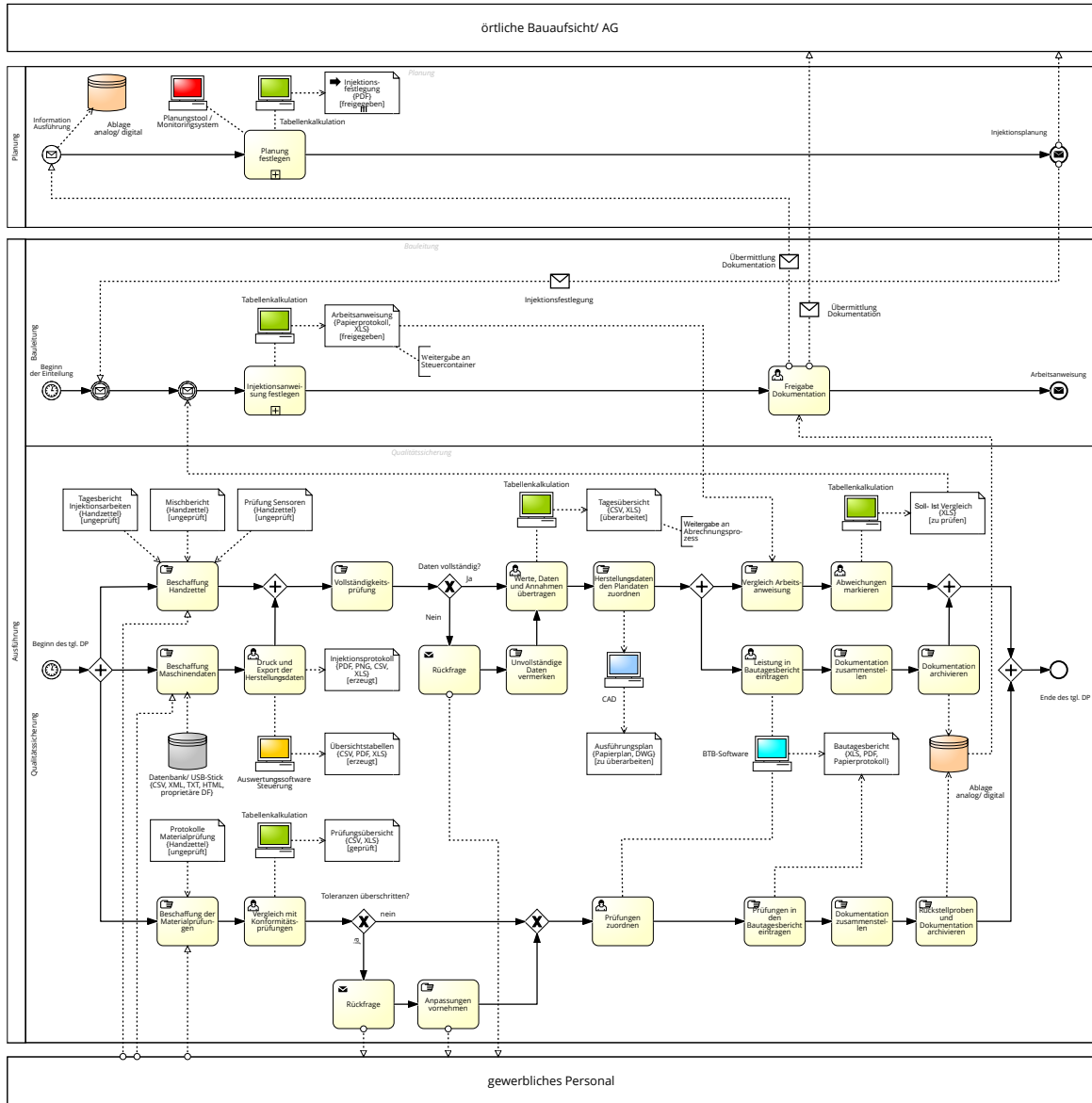


Abb. 5.4: tradierter täglicher Dokumentationsprozess

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

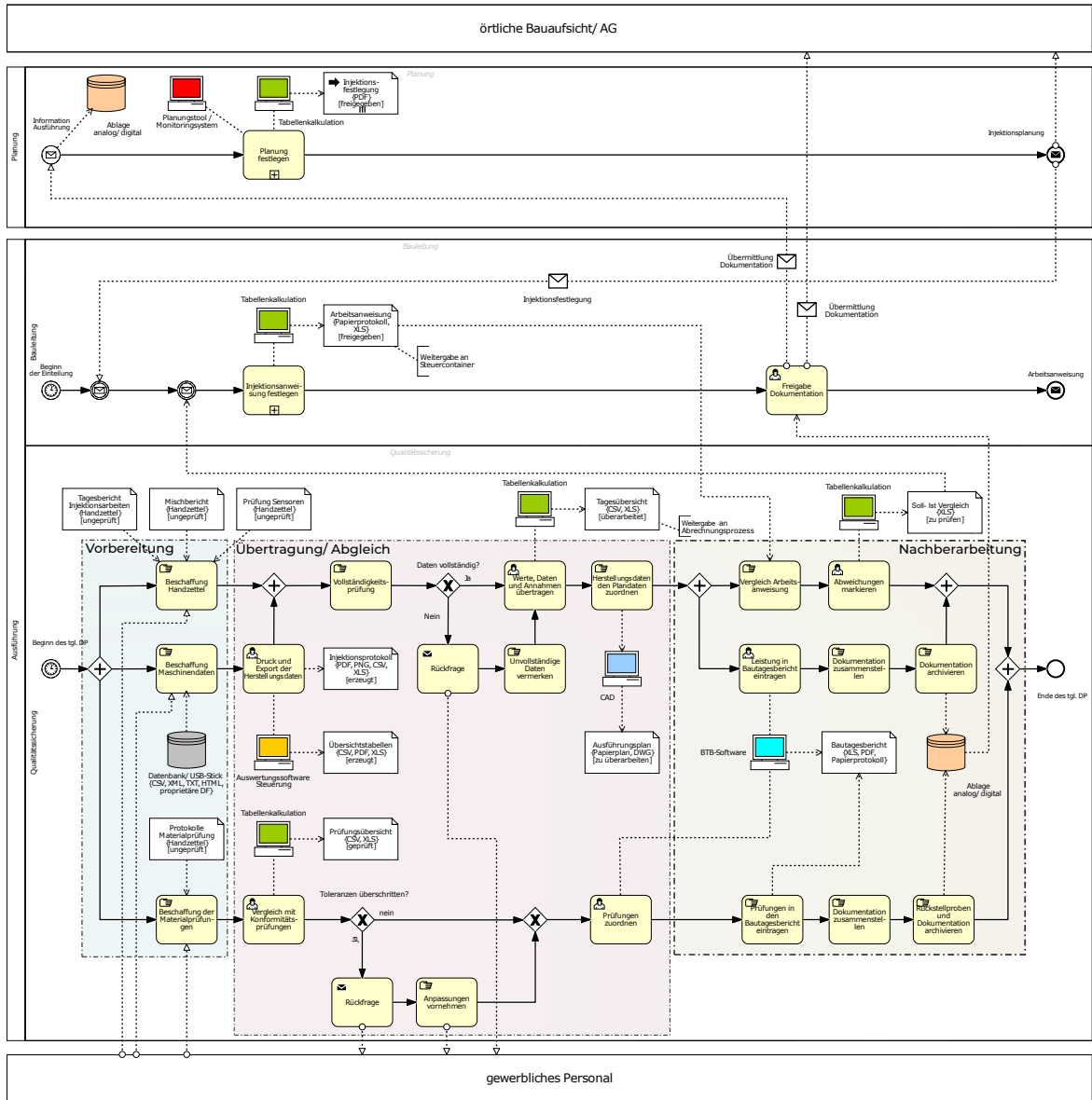


Abb. 5.5: tradiert täglicher Dokumentationsprozess mit Gruppen



## 5.2 Prozessbeschreibung

Die Prozesse im Ist wurden durch 22 Experteninterviews, sowie mehrmalige Baustellenaufenthalte aufgenommen. Die Herangehensweise zur Auswertung der Interviews wird in Abschnitt 6.3.1 beschrieben. Die Zusammenfassungen beruhen auf der Kategorisierung der Textteile aus den Experteninterviews mit der Zuteilung zum Ist-Zustand. In der gegenständlichen Prozessbeschreibung wird das Konzept aus Abb. 4.2 auf Seite 76 aufgegriffen und um die Prozesse Steuerung und Vernetzung erweitert. Die Beschreibung der Datenbearbeitung gliedert sich in die Phasen Messung, Steuerung, Speicherung und Aufbereitung, Analyse und Visualisierung, sowie Vernetzung. Die Abschnitte 5.2.1 bis 5.2.5 beschreiben diese Prozesse und erläutern die damit verbundenen Probleme.

### 5.2.1 Messung

Die verlässliche elektronische Messung der Herstellungsparameter von Injektionen und Bohrung sind essentiell für die spätere Überprüfung. Dahingehend werden die Eichprüfungen der Messensorik in periodischen Abständen durchgeführt. Die Überprüfung bei Injektionen erfolgt durch Ausliterversuche, bei denen genormte Messbehälter mit einer festgelegten Menge von fünf bis zehn Litern befüllt werden. Bei chemischen Injektionsmitteln ist nicht nur die Gesamtmengenkontrolle, sondern auch das exakte Mischungsverhältnis unterschiedlicher Komponenten zu überprüfen. Dabei werden in der Steuerung Prüfprogramme abgefahren, die Messbehälter abgewogen, und dann von der jeweiligen Dichte auf das Volumen rückgeschlossen. Im Anhang auf Seite 289 ist ein Handzettel eines Versuchs abgebildet. Auf den Baustellen erfolgt die Fremd- und Eigenüberwachung ausschließlich analog. Bei den Bohrverfahren wird eine mechanische Tiefenkontrolle der Endtiefe durchgeführt, womit die automatischen Bohrprotokolle plausibilisiert werden.

Kontrollprüfungen des Injektionsguts und die Festlegung der Messintervalle sind in der Norm festgelegt und werden im Baustellenlabor oder durch eine Fremdüberwachung durchgeführt. Dabei entnimmt die Qualitätssicherung in gewissen Messintervallen Probemischungen, die hinsichtlich ihrer Konformität überprüft [61, S.17-32] werden. Der gesamte Prüfprozess wird auf Baustellen- wie auch Laborebenen mit Handzetteln durchgeführt und in Ordnern archiviert. Ein Probenentnahmeprotokoll ist im Anhang auf Seite 291 abgebildet. In der Ablage erfolgt keine Verknüpfung mit den Herstellungsdaten. Die Beteiligten geben an, dass Digitalisierung helfen müsste, um aktuelle Materialparameter in Echtzeit sichtbar zu machen.

Die Aufzeichnungen der Injektionspumpen und der Bohrmaschinen unterliegen je nach Hersteller und Technik unterschiedlicher Toleranzen und Schwankungen, die in den Aufzeichnungen berücksichtigt werden müssen. Bei Injektionsdaten kommt es zu einer Unterscheidung in Toleranzen bei Hubzählung oder Toleranzen elektromagnetischer Messgeräte. Der Materialstand

wird auf der Baustelle über Kanister oder Lieferscheine gemessen und nicht automatisch mit den Mengenzählungen der Injektion verglichen. Die Systeme der Aufzeichnung werden als praktikabel aufgenommen, die Normung und die Ausstattung der Baufirmen entspricht nach Wahrnehmung der Planer dem Stand der Technik. Sofern die Sensorik auf Funktionstüchtigkeit überprüft werden kann, betrachtet die Bauaufsicht die Daten als valide. Probleme entstehen bei der Messung von kleinen Aufnahmemengen sowie in der Kenntnis zur Kalibrierung der Messsensoren. Bei den Bohrdaten werden bei Felsinjektionen zumeist nur der Ansatzpunkt und die Bohrrichtung aufgenommen. Bei langen Bohrungen führt dies dazu, dass Ungenauigkeiten nicht erfasst werden können. Die Kommentierung der diversen Arbeitsvorgänge erfolgt zumeist weiterhin über Handzettel, da keine geeigneten Eingabehilfen durch die Steuercomputer gegeben werden. Sie werden von den Bauunternehmen als wichtig angesehen, da damit unvorhergesehene Ereignisse während des Bohr- und Injektionsvorgangs dokumentiert werden können. Beispiele dazu finden sich im Anhang auf Seite 292 in Abb. B.4 und Abb. B.5.

Die Messung der Daten außerhalb der Ebene der Maschinendaten ist zumeist mit manuellen Dateneingaben verbunden und wird daher mangelhaft auf der Baustelle durchgeführt. Ein Problem im Ist-Zustand stellen Stromausfälle da. Sofern der Arbeitsprozess nicht abgeschlossen ist, gehen Daten verloren. Kommt es zu Falscheingaben, beispielsweise in der Nomenklatur, so können die Daten erst im Baubüro korrigiert werden. Mischprotokolle, wie in Abb. B.2 auf Seite 290, werden händisch erfasst, obwohl bei automatischen Mischeinheiten die Daten durch die Dosier- und Steuereinheit bereits digital aufgezeichnet werden.

### 5.2.2 Steuerung

Die Bohr- und Injektionssteuerungen werden als solide angesehen. Die Schnittstelle zu den vorbereiteten täglichen Arbeitsanweisungen ist aus Sicht der Ausführung noch zu verbessern. Einige Auswertungsprogramme der Injektionssteuerungen, die in Tabelle 4.3 auf Seite 85 angegeben sind, bieten die Möglichkeit, dass Importe mittels USB-Stick direkt in die Steuerungseinheiten eingespielt werden können. Dadurch sind die einzelnen Bohr- und Injektionspunkte bereits mit den vordefinierten Parametern hinterlegt. Im Baustellenalltag werden Arbeitsanweisungen abschnittsweise vom Bautechniker auf Handprotokollen vermerkt und bei Schichtwechsel den Partieführern übergeben. Die externe Steuerung der Pumpensteuerungen wird zeitweise über Bildschirmübertragung ermöglicht, sollte aber nur für Wartungszwecke eingesetzt werden. Die autonome Steuerung von Injektionspumpen ist aus Sicht der Bauleitung nicht wünschenswert, da zu erkennen ist, dass das Bedienungspersonal durch die externe Steuerungsmöglichkeit verunsichert ist und die eigenständige Lösungskompetenz der Facharbeiter darunter leidet.

Die am häufigsten inkludierten Abbruchkriterien in der Injektionssteuerung sind die Volumen-, Druckbegrenzung das GIN- sowie Haltekriterium. Aus Sicht der Planer und Ausführenden wäre es wünschenswert, besser geeignete Kriterien durch Verknüpfung der Steuerparameter mit vorherigen Herstellungsdaten und Qualitätsdaten des Mischguts in Steuerungen aufzunehmen. Für die Entwickler von übergeordneten Web-Plattformen gibt es zur Zeit nicht die Möglichkeit, digitale Arbeitsanweisungen an die Steuerungen zu übermitteln, da die Gerätehersteller zurückhaltend reagieren, und Schnittstellen für den automatischen Import nicht zur Verfügung stellen.

### 5.2.3 Speicherung und Aufbereitung

Durch Normen werden Minimalanforderungen an Baustellen- und Injektionsberichte gestellt, jedoch wird der Prozess, wie die Daten zu verwalten und zu übergeben sind, nicht erläutert. Am Beginn muss das Ziel der Dokumentation definiert sein. Der Aufwand wird in der Arbeitsvorbereitung oft unterschätzt. Dies hat zur Folge, dass die Dokumentation zu Beginn des Projektes meistens als mangelhaft angesehen und im Zuge der Ausführung sukzessive nachgebessert werden.

Der Übertrag der Herstellungsdaten von der Steuerung auf die Server im Baubüro wird durch die Exportfunktion der Steuerungsprogramme ermöglicht. Abhängig vom Hersteller werden diese in unterschiedlichen Datenformaten verarbeitet. Injektionsexperten geben an, dass ca. 90 % dieser Daten weiterverarbeitet werden können. Die restlichen Datensätze müssen kontrolliert und in manueller Arbeit nachgearbeitet werden. Aus diesem Grund werden die Handzettel weiterhin geführt, um einerseits dem Pumpenfahrer die Möglichkeit der Selbstüberprüfung zu gewähren, und andererseits ein Backup durch die Kommentierung bei der Kontrolle zur Verfügung zu haben.

Die Weitergabe der erforderlichen Dokumentation wird als lückenhaft wahrgenommen, da durch unterschiedliche Arbeitszeiten der Interessensvertreter, Lücken in der Weitergabe der Dokumentation entstehen. Bauherren stellen bei kontinuierlichen Injektionsprozessen fest, dass es vor allem an den Wochenenden zu Verzögerungen der Datenübergabe von einigen Tagen kommt. Bestehende Systeme, die in Tabelle 4.4 auf Seite 89 aufgelistet werden, integrieren keine Termine oder Kostendaten, da diese als sensibel angesehen werden. Die groben Fehler in der Dokumentation entstehen durch Verwechslung der Dezimaltrennzeichen und unkoordinierten Namensstrukturen. Bei täglich anfallenden Daten über mehrere Monate stellen die Benutzer fest, dass bestehende Monitoringsysteme nicht mehr bedienbar sind, da es durch die Anwendung veralteter Technologien zu Ladezeiten von mehreren Minuten kommt. Des Weiteren werden die bestehenden Produkte als nicht intuitiv angesehen, weshalb Beteiligte den regelmäßigen Kontakt mit dem Support der Softwareanbieter als produktivitätsmindernd ansehen. Insbesondere bei der Anwendung von MS Excel für die Visualisierung

von Herstellungsdaten sind die Datenmengen bei systematischen Injektionsvorgängen nicht benutzerfreundlich. Revisionen von Dokumenten und Daten bewirken bei einer dezentralen Datenverwaltung, dass der Datenstamm inkonsistent ist und die Übersichtlichkeit für Bauherren und Bauaufsicht verloren geht.

Modelle zur übergreifenden Archivierung fehlen. Planer bedienen sich eigener Systeme, die auf ihre Analysen abgestimmt sind, und bekommen keinen Zugriff auf das Datenmanagementsystem der ausführenden Unternehmen. Dabei werden MS Excel-Berechnungstools entwickelt, die immer auf einen speziellen Baustellenfall zugeschnitten und fehleranfällig sind. Beim Übertrag der Daten von unterschiedlichen Datenquellen kommt es zu Lesefehlern, beispielsweise können die eingescannten Handprotokolle nicht weiterverarbeitbar gemacht werden, da diese entweder unleserlich oder unvollständig, nicht plausibel oder ungeprüft sind. Protokolle, die durch Auswertungssoftware entstanden sind, liegen in leserlicher Form vor, können aber ohne einen Übertrag nicht weiterverarbeitet werden. Beispiele für Bohren und Injektion finden sich im Anhang in Abb. B.6 und Abb. B.7 ab Seite 294. Für übergeordnete Geschäftsprozesse in der kaufmännischen Ebene wird weiterhin auf Papier gearbeitet, da auf Grund von Vorgaben nur die handschriftlichen Unterschriften akzeptiert werden.

Die Ablage und Archivierung erfolgt zur Zeit immer in doppelter Form: analog und in digitalen Dokumentenablagensystemen. Das Schema der Ablage variiert je nach Projekt, eine Archivierung ist bei Sonderverträgen für 30 bis 40 Jahre vorgeschrieben, weshalb alle Daten in gedruckter Form vorliegen müssen. Eine spätere Suche alter Parameter im Archiv bei Streitfällen oder für ähnliche Projekte ist ohne spezifische Projektkennntnis nicht möglich.

Die Leistungsmeldungen erfolgen täglich per E-Mail und werden über einen Techniker abgewickelt. Qualitätssicherungen kommen im Form von Handzetteln aus dem Labor und werden im Anschluss durch einen Techniker eingescannt und abgelegt. Ein Beispiel einer Laborprüfung ist in Abb. B.8 auf Seite 296 dargestellt. Bei Infrastrukturprojekten muss die Rückverfolgbarkeit der Materialien zum Einbauort gegeben sein. Durch die Trennung des Qualitätssicherungsprozesses und der Auswertung von Herstellungsdaten ist diese Forderung nicht erfüllt. Bauausführende geben an, dass heute wesentlich komplexere Injektionstätigkeiten ausgeführt werden, die Dokumentationsweise in den letzten 15 Jahren sich aber nicht darauf angepasst hat. Die Speicherung und Analyse bindet daher bei großen Injektionsprojekten auf Seite der Unternehmer zwei bis drei Techniker.

#### 5.2.4 Analyse und Visualisierung

Die Analyse und Auswertung der Injektionsdaten ist von den Aufgaben der am Bauprozess beteiligten Personen abhängig. Injektionsunternehmen konzentrieren sich in ihren Auswertungen auf die Kennwerte der aktuellen Leistung und die Nachkalkulation der Leistungs- und

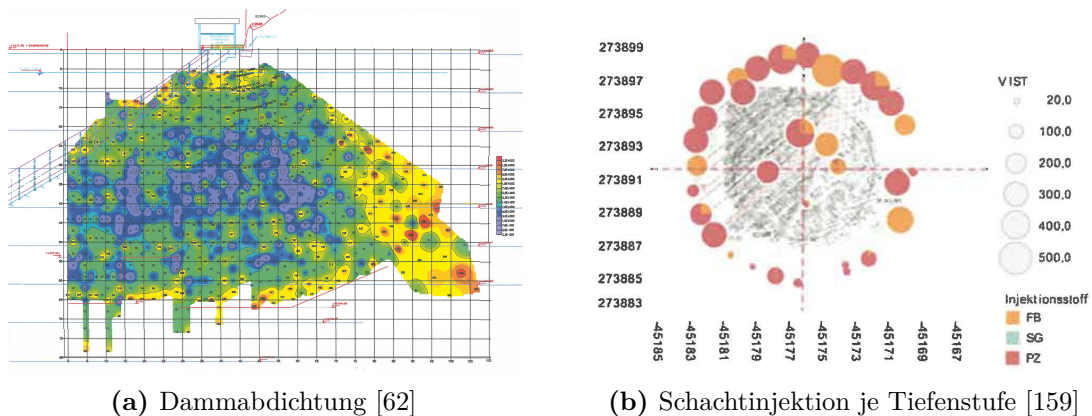
Aufwandswerte, sowie auf baubetriebliche Fragestellungen für die verbesserte Planung der Disposition. Die Prognose von Gerät, Material und Personal steht deshalb in den Analysen im Vordergrund. Die Entwicklung der Umsetzzeiten von einem Injektionspunkt zum anderen ist ein entscheidender Parameter, da die Nebenleistungen in der Kalkulation oft unterschätzt werden. Beim Einsatz von mehreren Pumpen und Anlagen ist die Auswertung dieser Zeiten mit einem hohen Aufwand verbunden, da flächendeckende Dokumentationsmöglichkeiten zum Bauprozessmanagement fehlen. Die Fortschreibung des Bauzeitplanes wird mit den anderen Gewerken monatlich abgestimmt. Die prognostizierten Dauern der Injektions- und Bohrtätigkeiten beruhen auf den Leistungen der letzten Wochen. Eine risikobasierte Berechnung wird nicht durchgeführt. In der heutigen Situation ist zu erkennen, dass eine Vielzahl von Daten geloggt, aber keiner weiteren Analyse unterzogen wird. Im Spezialtiefbau ergeben sich regelmäßig Abweichungen der Bodenbedingungen, die jedoch unzureichend dokumentiert werden. Die bauwirtschaftlichen Analyse des Unternehmens sind nach heutigem Stand in der Kalkulationsphase nicht ausreichend auf die Bodenparameter abgestimmt. Bei der Ausschreibung nach injiziertem Bodenvolumen oder Fläche hat das falsch eingeschätzte Bodenverhalten große Auswirkungen auf die Vergütung. Wird nach verbrauchtem Material und eingesetzten Pumpenstunden vergütet, dann kommt den Injektionsprotokollen eine erhöhte Bedeutung zu, da die aufgezeichneten Maschinenparameter als Grundlage des gemeinsamen Aufmaßes dienen.

Planer legen großen Wert auf die Visualisierung der Herstellungsparameter und zusammenfassende Darstellungen je Abschnitt eines Bauteils. Mit der Verknüpfung von Plan- und Herstellungsdaten überprüfen sie die geografisch abhängigen Annahmen der Verpressmengen. Herkömmlich werden Schnitte angefertigt, und die Herstellungsparameter mittels Auswertungssoftware<sup>42</sup> dargestellt. Die Formen beschränken sich auf zweidimensionale Visualisierungen, wie in Abb. 5.6 gezeigt ist. Beliebte Darstellungen sind der Lageplan des Baufeldes, repräsentative Schnitte durch Bauteile oder Abwicklungen, und Querschnitte bei Tunnelbaustellen. Die Planer bedienen sich bei der Bewertung von Injektionsdaten keiner Datenbanken vorheriger Projekte und sehen beschränkten Nutzen für die Fallbetrachtung in neuen Ausführungen. Aktuelle Veröffentlichungen von Kieffer et al. zeigen die Möglichkeit der Verknüpfung von geologischen Modellen mit Daten der Ausführung in dreidimensionalen Visualisierungen. Die Implementierung dieser in das Modell [85] ist jedoch weiterhin mit manuellen Tätigkeiten verbunden<sup>43</sup>.

Der Bauherr und die Bauaufsicht prüfen stichprobenartig die Stringenz der Dokumentation und die Berichte der Ausführung und Planung. Eine Mitverfolgung der Produktionsdaten in Echtzeit ist deshalb nicht notwendig. Bei den Kontrollvorgängen verfolgt die Bauaufsicht Abweichungen zwischen ausgeschriebenen Volumen und Zeiten bereits in einem frühen Ausführungsstadium, wofür ausgewählte Zusammenfassungen erstellt werden. Problematisch

<sup>42</sup>Beispielsweise in OriginLab von OriginLab Corporation, tableau von Tableau Software oder Surfer von Golden Software LLC.

<sup>43</sup>Die Veröffentlichung von Kieffer et al. beschreibt ein Datenmanagement mit der Software Leapfrog des Unternehmens Seequent Limited.



**Abb. 5.6:** Typische Visualisierungen der Herstellungsparameter in der Ausführungsplanung

wird von den Experten angemerkt, dass sich die Analysen durch den damit verbundenen Personalaufwand verspäten, und nicht sofort auf Fehlentwicklungen reagiert werden kann.

### 5.2.5 Vernetzung

In den Normen wird beschrieben, dass Injektionsarbeiten in einem interaktiven, fortschreitenden Prozess zu planen und durchzuführen sind. Die Kommunikation mittels E-Mails und angehängten Datensätzen hat eine inkonsistente Datengrundlage zur Folge. Der interaktive Prozess zwischen Planung und Ausführung wird durch fehlende Vernetzungen gestört.

Die Abrechnung wird durchgehend durch händischen Übertrag der Massen übergeordneter ERP-Software abgewickelt. Alle Fachexperten gaben an, dass eine Nachkalkulation und Überführung in Datenbanken für neue Angebote nicht erfolgt, da jedes Projekt als Unikat betrachtet wird. In diesem Zusammenhang sprachen die Experten davon, dass die Erfahrung und das Gefühl entscheidender sei als Referenzwerte. Ergebnisse der Qualitätsüberprüfung werden in Managementpläne übergeführt. Eine Verknüpfung der Baustellenprüfung mit verwendetem Ausgangsmaterial und weitere Vernetzungen zu anderen Gewerken oder übergeordneten Geschäftsprozessen sind nicht gegeben. Die lokale Speicherung der Daten auf Baustellenservern ergibt die Problematik, dass Ergebnisverantwortliche immer auf die Hilfe des Baubüros angewiesen sind. Weitergehende Vernetzung und Weitergabe der Daten sind durch die Unternehmen nicht gewollt, da diese befürchten, dass durch erhöhte Transparenz ein etwaiger Wettbewerbsvorteil verloren geht. Eine vollständige Weitergabe der Daten führt, nach Angabe der Unternehmer, zu einer erhöhten Diskussion. Bislang ist das digitale Datenmonitoring nicht in der Ausschreibung verankert.

Als Problemfelder aus der Prozessbeschreibung identifizieren sich folgende Kernpunkte:

- Die Fremd- und Eigenüberwachung der Messung erfolgt ausschließlich analog.

- Die Konformitätsprüfungen der Materialien werden nicht den Herstellungsdaten zugeordnet.
- Eine direkte digitale Schnittstelle zwischen Auswertung und Steuerungseinheiten für Arbeitsanweisungen und Herstellungsdaten ist nicht oder nur teilweise gegeben.
- Namensstrukturen bei der Speicherung und Aufbereitung der Ausführungsdaten sind inkonsistent.
- Bauteilbezogene Archivierung und automatische Auswertung der Herstellungsdaten werden durch die heutigen Systeme nicht unterstützt.
- Visualisierungen und Analysen sind mit Personalaufwand verbunden und nicht in Echtzeit abrufbar.
- Die Vernetzung zu anderen Gewerken oder Projektphasen ist nicht gegeben.

### 5.3 Tradiertes Dokumentationsprozess

Der tägliche zeitliche Arbeitsaufwand für Dokumentationstätigkeiten bei Bauvorhaben im Tiefbau nimmt laut Chriti [23, S.99] für Bauleiter 23 % ein. Bautechniker verbringen mit Dokumentation und Abrechnung 55 % der ihnen zur Verfügung stehenden Zeit. Für den Spezialtiefbau liegen keine spezifischen Studien vor, jedoch wird durch die Fachexperten die Aufwendungen deutlich höher eingeschätzt. Dies ist dadurch begründet, dass alle im Untergrund verborgenen Tätigkeiten zu dokumentieren sind, und sich der Prozess bei Injektionsarbeiten durch eine Vielzahl von manuellen und benutzerabhängigen Vorgängen auszeichnet.

Die Abb. 5.4 zeigt, dass für den täglichen Dokumentationsprozess eine Vielzahl an Kommunikationsschnittstellen zwischen gewerblichem Personal, Ausführungsorganisation, Planung und Bauaufsicht notwendig sind. Betrachtet man die Teilvorgänge, so ist zu erkennen, dass alle Dokumentationstätigkeiten manuelle Tasks oder durch unterschiedliche Software unterstützte Benutzertasks sind.

Die Modellrechnung in Tabelle 5.4 zum tradierten Dokumentationsprozess zeigt die aufgewendete Zeit, die dieser Prozess bindet. Der Berechnung liegt eine Abgabe von Injektionsprotokollen, Übersichten je Anlage und Pumpe und ein Prozesszeitmanagement in digitaler und ausgedruckter Form mit Hilfe von Exges IDE, und tabellenkalkulation-basierenden Auswertungen nach Tabelle 4.3 auf Seite 85 zu Grunde. Die täglichen Dokumentationsprozesse sind vom vorgeschriebenen Abgabezyklus beschränkt. Auftraggeber fordern diese zumeist am folgenden Werktag. Zu den täglichen Dokumentationsprozessen werden monatliche Aufwände

für die Erstellung der Abrechnung hinzugezählt. Die Berechnung spart die Zeiten für die Qualitätssicherung aus, da diese stark vom vorgeschriebenen Prüfumfang abhängig sind.

Der tradierte Dokumentationsprozess lässt sich nach Abb. 5.5 auf Seite 112 in die Phasen Datenbeschaffung  $t_D$ , Auswertung  $t_A$  und Abgabetätigkeiten  $t_B$  gliedern. Die Auswertungszeiten sind vom vorgegebenen Auswertungszyklus abhängig. Dafür werden die Variablen für die Schichten pro Auswertungszyklus  $s$ , die Injektionspunkte pro Schicht  $i$ , die Anzahl der Pumpen  $p$  und Anlagen  $a$  eingeführt. Die Phase der Datenbeschaffung pro Auswertungszyklus gliedert sich in die Zeiten  $t_{Fw}$  für den Fußweg  $l$  zwischen Injektionscontainer und Baubüro,  $t_{Db}$  für die Bedienung des portablen Speichermediums, wie USB-Stick oder einer Speicherkarte, und  $t_{Dt}$  für den Datentransfer auf einen Zielordner des Baustellencomputers. Diese Teilzeiten fallen für den Schichtführer oder Bautechniker pro Schicht an und müssen mit der Anzahl der Schichten pro Auswertungszyklus  $s$  multipliziert werden.

$$t_D(p, l) = (t_{Fw}(l) + t_{Db} + t_{Dt}(i))s \quad (5.1)$$

Für die Phase der Auswertung pro Auswertungszyklus sind in der Modellrechnung die Zeitannteile für Überprüfung der Diagramme  $t_{Dg}$ , Erstellung von Protokollen und Übersichten  $t_{PÜ}$  und für die Prozesszeitenanalyse  $t_{PZ}$  enthalten. Bei der Kontrolle der Diagramme zeigt sich im Arbeitsalltag, dass Verläufe zusätzlich kommentiert werden müssen. Dazu werden die Injektions-Handzettel nach Abb. B.5 auf Seite 293 herangezogen, und je nach Schwierigkeiten werden fünf bis 15 % der Punkte durch zusätzliche Kommentare versehen. Sofern Verläufe unvollständig sind oder einer weiteren Abklärung bedürfen, müssen diese Punkte durch Abprache mit dem gewerblichen Personal eruiert werden. Dies entspricht der Tätigkeit Rückfrage sowie unvollständige Daten vermerken in Abb. 5.4. Die zu eruierten Punkte schwanken je nach Stabilität des Ausführungsprozesses zwischen 3 und 10 % der Gesamtanzahl der Injektionspunkte. Übersichten werden je Schicht nach Anlage und Pumpen erstellt. Bei zwei Anlagen zu je vier Pumpen ergibt sich bei zwei Schichten pro Tag eine Übersichtsdokumentation von 4 Anlagen- und 16 Pumpenübersichten. Die betrachtete Steuerung gibt die Diagramme einzeln für alle Pumpen, sowie Übersichtsdokumente aus. Bei einer nachträglichen Kommentierung und dem Abgleich mit den Handzetteln müssen die Datensätze in den einzelnen Verläufen sowie in den Übersichten bearbeitet werden.

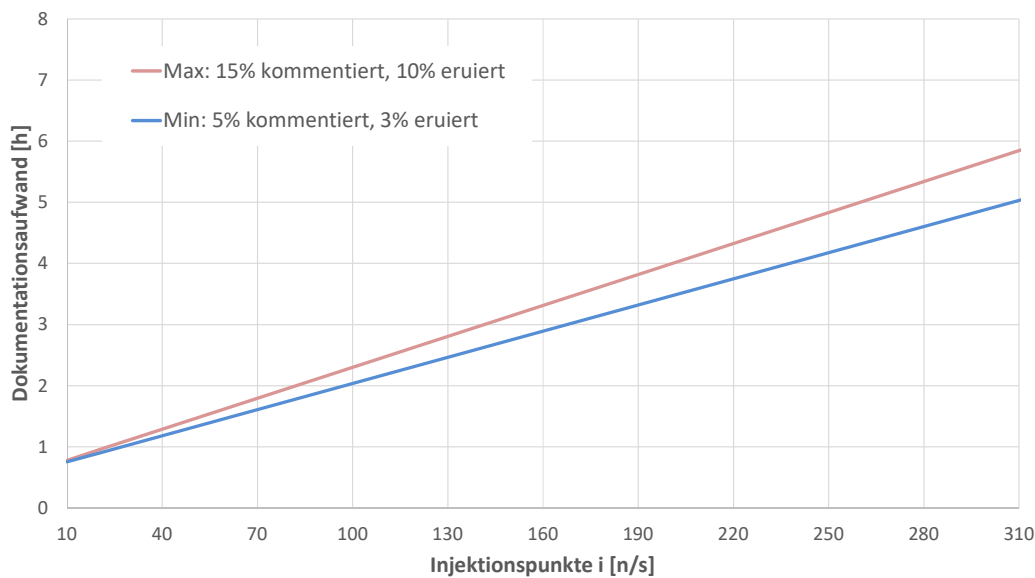
$$t_A(i, a, p) = (t_{Dg}(i) + t_{PÜ}(a, p) + t_{PZ}(a))s \quad (5.2)$$

Die Phase der Abgabetätigkeiten gliedert sich in die Erstellung und den Druck von PDF-Dateien  $t_{PDF}$  aus den Tabellenkalkulationen, sowie der Zeiten für die Übermittlung und Ablage  $t_{ÜA}$  in analoger und digitaler Form.

$$t_B(i, a, p) = (t_{PDF}(i, a, p) + t_{ÜA}(i, a, p))s \quad (5.3)$$

Der berechnete Dokumentationsaufwand in Abhängigkeit von den Injektionspunkten  $i$  je Schicht ergibt sich aus Abb. 5.7. Der Berechnung liegt die Annahme von zehn Pumpen ( $p=10$ ),





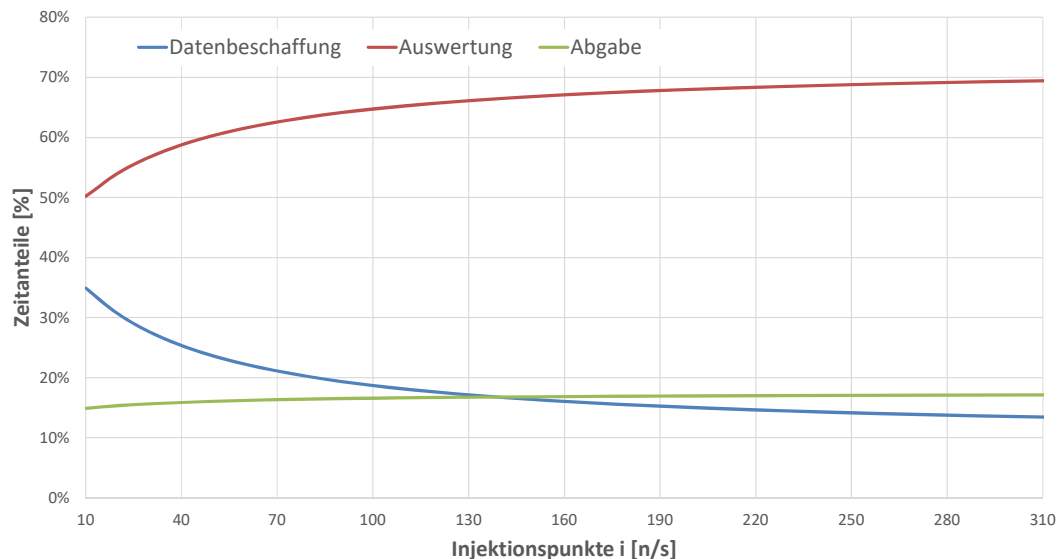
**Abb. 5.7:** Dokumentationsaufwand bei Pumpen  $p = 10$ , Anlagen  $a = 2$ , Fußweg  $l = 400$  m

zwei Anlagen ( $a=2$ ) und einem mittleren Fußweg von 400 Metern ( $l = 400$  m) zu Grunde. Die Abb. 5.7 gibt den minimalen Verlauf des Aufwands in blau und die maximale Zeit in rot an. Kommen bei einem Auswertungszyklus von einem Tag zwei Schichten zum Einsatz, so müssen die Werte verdoppelt werden. Der Fixanteil der strichlierten Abhängigkeit ergibt sich aus der Anzahl der geforderten Übersichten, Anlagen und Pumpen, sowie der Wegstrecke zwischen Pumpencontainer und Baubüro. Geht man beispielsweise von 160 abgeschlossenen Injektionspunkten je Schicht aus, so muss ein Techniker bei einem Zweischichtbetrieb  $6,27\text{ h}^{44}$  für die Dokumentationstätigkeiten aufwenden. Das entspricht einem Vollzeitäquivalent (engl.: full time equivalent) (FTE)<sup>45</sup> von 0,8. Durchschnittlich werden 10 % der Diagramme kommentiert und 7 % der Verläufe eruiert.

In der Abb. 5.8 wird das Verhältnis der Zeitaufwände für Datenbeschaffung, Auswertung und Abgabe in Abhängigkeit von der Anzahl der Injektionspunkte pro Schicht dargestellt. Tabelle 5.4 gibt die maximalen Verhältnisse dieser Anteile zueinander an. Es ist zu erkennen, dass der höchste Anteil mit über 50 % für die Auswertung der Diagramme, Protokolle und Übersichten anfällt. Durch die Medienbrüche zwischen Steuerung und Auswertungssoftware im Baubüro sowie den vorgeschriebenen Abgabemedien führen wiederholende manuelle Tätigkeiten zu den anzahlabhängigen Zeiten. Durch die Verfügbarkeit eines zentralen Datenmanagements könnten diese Zeiten reduziert werden, indem die Kontrolle von Diagrammen durch Systeme unterstützt wird, und Übersichten automatisch erstellt werden. Die Zeitanteile für Datenbeschaffung und Abgabe können durch ein durchgängiges Datenmanagement ohne Schnittstellen im Regelablauf weitgehend entfallen. Dadurch ergibt sich für den täglichen

<sup>44</sup> $2 \times 3,133$  h

<sup>45</sup>Nach dem Kollektivvertrag für Angestellte der Baugewerbe und Bauindustrie [18] § 6. Arbeitszeit ist eine wöchentliche Arbeitszeit von 39 h innerhalb von 5 AT festgesetzt. Daraus ergibt sich ein FTE von 7,8 h/AT.



**Abb. 5.8:** Anteil für den Dokumentationsaufwand, abhängig von der Anzahl der Injektionspunkte, bei Pumpen  $p = 10$ , Anlagen  $a = 2$ , Fußweg  $l = 400$  m

**Tab. 5.4:** Maximale Verhältnisse der Zeitanteile des tradierten Dokumentationsprozesses

Tätigkeit	Zeitanteil	Erklärung
Datenbeschaffung $t_D$	13–35 %	Wegzeit, Bedienung des Speichermediums, Datentransfer
Auswertung $t_A$	50–70 %	Diagramme, Protokolle und Übersichten, Prozesszeiten
Abgabe $t_B$	15–17 %	Druck, Ablage, Übermittlung

Dokumentationsaufwand ein Potential für die Zeitreduktion von über 50 %, geht man davon aus, dass der Datenbeschaffungs- und Abgabeprozess automatisiert und der Auswertevorgang durch digitale Lösungen um 50 % beschleunigt werden kann.

Die Dokumentation gilt als Grundlage für den am Ende des Monats durchzuführenden Abrechnungsprozess. In diesem werden die Leistungsdaten aus den Übersichtsdokumenten in ein Aufmaßblatt übertragen und Plausibilitätskontrollen durchgeführt. Dieser Vorgang wird durch Bautechniker je nach Größe der Injektionsbaustelle in ein bis zwei Tagen durchgeführt. Fügt man die Zeiten für den Abrechnungsvorgang  $t_{BQ}$  dem monatlichen Dokumentationsprozess hinzu, so ergibt sich nach Gleichung (5.4) für die monatliche Betrachtung eines Durchlaufbetriebes des genannten Beispiels ein FTE von 1,15<sup>46</sup>.

$$FTE_{\text{Monat}} = \frac{(t_D + t_A + t_B) \cdot AT/\text{Mo} + t_{BQ}}{hNAZ/\text{Mo}} \quad (5.4)$$

<sup>46</sup>Für einen herkömmlichen Abrechnungsprozess pro Monat von 12 Stunden ergibt sich:

$$FTE = \frac{6,27 \text{ h}/AT \cdot 29 \text{ AT}/\text{Mo} + 12 \text{ h}/\text{Mo}}{39 \text{ h}/W_o/\text{FTE} \cdot \frac{52 W_o/a}{12 \text{ Mo}/a}} = 1,15.$$

Die Modellrechnung verdeutlicht die ressourcenbindenden Vorgänge der täglichen Dokumentation und der Abrechnung bei Injektionsbaustellen. Die Berechnung umfasst die periodisch wiederholenden Tätigkeiten. Dokumentation der Qualitätsprüfung, interne Berichterstattung oder Ausarbeitungen für spätere Begutachtungen wie Nachkalkulationen sind in diesem Prozess nicht erfasst. Nachbearbeitung bei Änderungen der Pläne und Nomenklaturen verlängern den Prozess ebenfalls, lassen sich auf Grund der unregelmäßigen Vorkommnisse aber nur schwer quantifizieren. Die Berechnung zeigt, dass pro Injektionspunkt im Nachgang ca. 1,5 min für die betrachteten Vorgänge erforderlich sind, die entweder die Arbeitszeit eines Bautechnikers oder Bauleiters binden. Bei geringen Zahlen an Ausführungen je Schicht entstehen, bedingt durch die von der Stückzahl unabhängigen Zeitanteile in der Berechnung, Zeiten bis sieben Minuten pro Ausführungspunkt. Bei mittelgroßen bis großen Injektionskampagnen bindet der tradierte Dokumentationsprozess mindestens einen bis zwei FTEs. Neben dem Zeitaufwand ist darauf hinzuweisen, dass sich die damit verbundenen Tätigkeiten sehr stark wiederholen und von den Bearbeitern als monoton und unattraktiv empfunden werden. Das führt zu Tipp- und Kopierfehlern [122] und den damit verbundenen Dateninkonsistenzen, deren Identifizierung und Korrektur weitere Ressourcen binden.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kapitel 6

## Anforderungsprofile

Die Wissenschaft des Requirement Engineering (RE) hat sich im Zusammenhang mit der Entwicklung von softwaregestützten Systemen in den 1960er Jahren entwickelt. Eine adäquate deutsche Bezeichnung konnte sich nicht durchsetzen. Dabei ergeben sich aus der Literatur zwei grundsätzliche Bedeutungsvarianten. RE im weiteren Sinn beschäftigt sich mit allen Wissensgebieten, die dazu dienen, Spezifikationen für ein softwaregestütztes Produkt zu definieren und diese während einer Umsetzung zu analysieren und zu managen. Das RE im engeren Sinn beschäftigt sich mit allen Tätigkeiten, die am Projektanfang in der Analyse- und Definitionsphase abzarbeiten sind [124]. Die Entwicklung digitaler Baustellenprozesse steht in einem engen Zusammenhang mit der Schaffung neuer Systeme und Produkte. Für die Modellbildung eines idealisierten Systems werden die Methoden, Techniken und Werkzeuge des RE verwendet. Die Vorgangsweise wird in die Phasen der Ermittlung und Dokumentation von Anforderungen, sowie die Phase der Analyse der Anforderungsbeschreibung unterteilt. In diesem Kapitel stehen die Ermittlung, Dokumentation und Selektion der Anforderungen im Fokus.

### 6.1 Grundlagen

Als Grundlage für die weitere Arbeit werden die Methode der schrittweisen Anforderungsermittlung, miteinzubeziehende Quellen, der Systembegriff sowie die Anforderungstypen vorgestellt.

#### 6.1.1 Systembegriff

Den betrachteten Wirkungsbereich bilden die Tätigkeiten der Bauausführung, deren Organisation und Dokumentation, die in einem soziotechnischen System vereint sind. Die Zusammenarbeit von Menschen, unterstützt durch technische Hilfsmittel, wird demnach

**Tab. 6.1:** Systembeeinflussungen nach [126] im Zusammenhang mit der Bauausführung

Aspekte	Beeinflussung
Menschen	Interessensvertreter
Technische Systeme	Baugerätesteuerung, Vermessungstechniken, Dokumentationssysteme
Prozesse	Organisations-, Arbeits-, Dokumentations- und Analyseprozesse
Ereignisse	Planungsänderungen, Stillstände, Koordination mit anderen Gewerken
Dokumente	Normen, Vertragsbedingungen, Managementhandbücher, Verfahrensbeschreibungen, Arbeitsanweisungen

als ein solches System betrachtet. Darunter fallen die Beziehungen zwischen Mensch und Technologie, die eingesetzte Hardware, wie Baugeräte mit deren Messsensoren, vorhandene Gesetze und Normen sowie Prozesse und Personen, die mit dem Bauverfahren verknüpft sind. Die beeinflussenden Aspekte nach [126] werden in Tabelle 6.1 in Verbindung mit dem zu erforschenden Datenmanagementsystem gebracht.

Die Systemschnittstellen für die Entwicklung des digitalen Datenflusses sind vor der Anforderungsanalyse festzulegen. Sie sind einerseits durch die Systemgrenzen im Inneren und den Kontext im Äußeren begrenzt. Dadurch entsteht die Systemumgebung. Der Wertschöpfungsprozess für die Ausführungsphase ist die Systemgrenze. Prozesse der Ausführungsplanung und der Gewährleistungsphase stehen noch im kontextuellen Zusammenhang, werden aber durch das System nicht mehr direkt beeinflusst. Die kontextuellen Grenzen ergeben sich durch die Anforderungsanalyse.

### 6.1.2 Anforderungstypen

Die Literatur gibt eine Vielzahl von Klassifikationen für Anforderungen vor. Die gebräuchlichste Kategorisierung ist die in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen [57, 124]. In den Forschungsfeldern in Kapitel 1.2 wurden die Ziele definiert, die das System erfüllen muss. Mit dem Modell für eine idealisierte Datenstruktur für Injektionsarbeiten müssen eine vertragsorientierte Qualitätserfüllung, technische Effizienzkritik sowie die Ertragswahrheit und eine Administrationserleichterung gegeben sein<sup>47</sup>. Diese Ziele beeinflussen die funktionalen wie auch die nicht-funktionalen Anforderungen des Systems.

<sup>47</sup>Prof. Gert Stadler spricht in diesem Zusammenhang vom Spannungsfeld der Injektionstechnik [148].

**Funktionale Anforderungen** legen fest, was das Produkt tun soll. Sie definieren die Funktionalität, die das Produkt bieten muss. [57, S. 37] Im gegenständlichen Fall muss als Produkt ein Modell eines System verstanden werden, auf dem Entwickler eine Datenplattform aufbauen können. Dabei ist nach drei Parametern zu unterscheiden und müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Eingabe: Welche Daten, Ereignisse und Veränderungen sind im System zu berücksichtigen?
- Funktion: Welche Funktionen muss das System in der Lage sein, selbst auszuführen?
- Ausgabe: Welche Aussagen, Reaktionen oder auch Hinweise soll das System automatisch oder auf Anfragen liefern können?

Die funktionalen Anforderungen, insbesondere der Parameter Ausgabe, ergeben sich aus gesetzlichen und projektspezifischen Vorgaben sowie den Erfahrungen der Prozessbeteiligten. Die Anforderungen aus den Baustellendokumenten und der Interessensvertreter sind von besonderer Wichtigkeit.

**Nicht-funktionale Anforderungen** legen fest, welche Qualitätseigenschaften das Produkt haben soll und welche Randbedingungen an das Produkt gestellt werden. [57, S. 39] Sie können nur gebildet werden, wenn die funktionalen Anforderungen bekannt sind und das Prozessdenken etabliert ist. Steht bei den funktionalen Anforderungen das „Was“ im Mittelpunkt, so muss bei den nicht-funktionalen Anforderungen geklärt werden, „Wie“ ein neues System etabliert wird. In der Literatur zum RE werden unter diesen Anforderungen Qualitätsmerkmale verstanden, die das System erfüllen muss. Daher sind insbesondere qualitätssichernde Normen und baubranchenspezifische Standards zu berücksichtigen. Die Anforderungen lassen sich nach [124] einteilen in:

- Qualitätsattribute der gewünschten Funktionen: Ausführungsverhalten, Verlässlichkeit, sonstige softwaretechnische Qualitätskriterien
- Anforderungen an das implementierte System im Gesamtkontext: Schnittstellen mit anderen Teilsystemen, Sicherheit, Realisierung in Soft- und Hardware, menschliche Faktoren wie Benutzerfreundlichkeit
- Vorgaben für die Durchführung der Systemerstellung: Art der Entwicklung, ökonomische Aspekte der Systementwicklung, Prioritäten und Änderbarkeit, politische Einschränkungen
- Anforderungen an Prüfung, Einführung, Betreuung und Betrieb: Betriebseinschränkungen, physikalische Einschränkungen und Umweltbedingungen, Qualifikation des Bedienpersonals, Konfigurationsmanagement, Kundendienst

Für die Modellierung sind die Qualitätsattribute, der Gesamtkontext und Anforderungen an Betreuung und Betrieb entscheidende Komponenten. Die Vorgaben für die Durchführung der Systemerstellung sind von untergeordneter Wichtigkeit, da diese beschränkend in die optimale Struktur des Modells eingreifen.

### 6.1.3 Anforderungsquellen

Anforderungsquellen werden nach Grande [57] in die Gruppen der Stakeholder und der Dokumente unterteilt. Bei der Entwicklung stehen die Interessensvertreter, die das System nutzen, die davon betroffen sind oder die dieses beeinflussen im Mittelpunkt der Analyse. Dabei unterscheidet man die drei Stakeholdergruppen [155]:

- Stakeholder des Systems
- Stakeholder des Umgebungssystems
- Stakeholder aus dem weiteren Umfeld

Bei einem idealisierten Wissensmanagementsystem im Baubetrieb umfasst die Gruppe der *Stakeholder des Systems* eine Vielzahl von Personen, die in der Planungs- und Ausführungsphase mit dem System in Verbindung gebracht werden. Die Gruppe bilden in erster Linie die Anwender, die, beginnend von der Datenaufnahme bis hin zur Vernetzung der Daten mit Fremdsystemen, damit arbeiten. Die Anwender sind im besten Fall nicht auf das Ausführungsunternehmen beschränkt und in der örtlichen Bauaufsicht, der Fachbauplanung und in der Projektleitung des Auftraggebers anzutreffen.

*Stakeholder des Umgebungssystems* sind Vorgesetzte, Abteilungsleiter und Geldgeber, die vorwiegend an Überwachungs- und Kontrollmechanismen interessiert sind. Die Gruppe der *Stakeholder aus dem weiteren Umfeld* sind Personengruppen aus Institutionen, wie Normungsgremien oder Vereinigungen oder der Gesetzgebung, die mit Richtlinien, Normungen und Gesetzen Rahmenbedingungen und Ziele definieren.

Dokumente, wie Spezifikationen, Lasten- und Pflichtenhefte, Vertragsbestimmungen, technische Verfahrensbeschreibungen, Qualitätshandbücher, Fachliteratur, Funktions- und Benutzerhandbücher bestehender Systeme und Normungen können Anforderungsquellen sein. Deren Sichtung ist wichtig, da dieses System nicht nur unternehmensinterne Anwendung findet sondern auch allgemein geltenden rechtlichen und bauvertraglichen Regeln entsprechen müssen. Dadurch ist die Akzeptanz der Meinungsbildner der Branche gestärkt und ein Einsatz über einzelne Organisationsgrenzen hinweg gesichert.



### 6.1.4 Methode und Techniken der Anforderungsermittlung

Die Ermittlungstechniken für die Anforderungsanalyse sind mannigfaltig und reichen von Kreativtechniken bis hin zu Feedback-Techniken. Im Zuge dieser Forschungsarbeit wurden folgende Techniken eingesetzt:

- Kreativtechniken, wie Brainstorming und Mindmapping
- Beobachtungstechniken, wie Feldbeobachtungen und die Analyse von Arbeitsabläufen
- Befragungstechniken, wie Fragebögen, Interviews
- Evolutionstechniken, wie Dokumentenanalyse
- Feedbacktechniken, wie Simulationen und Prototyping

## 6.2 Standardisierte Anforderungen

Normen und Richtlinien werden von unterschiedlichen Interessensvertretern beeinflusst. Je nach Detailgrad der betrachteten Normen, können durch deren Inhaltsanalyse die *Stakeholder aus dem weiteren Umfeld* miteinbezogen werden. Der Fokus der Anforderungsanalyse konzentriert sich auf anerkannte, zitierte Literatur im europäischen Raum. Die detaillierten Betrachtungen des Stands der Technik im Bereich Datenmonitoring macht den Verweis auf internationale Anforderungsdokumente notwendig. Die Anforderungen aus den Normen werden beginnend vom globalen Normen des Qualitätsmanagements bis hin zu allgemeinen Vertragsbestimmungen für Bauleistungen, spezifischen Werkvertragsnormen und Richtlinien im Bereich Bohr- und Injektionstechnik auf Anforderungen der Dokumentation und Analyse untersucht.

### 6.2.1 Qualität

Die Norm DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe [28] definiert Prozesse als „*Satz zusammenhängender oder sich gegenseitig beeinflussender Tätigkeiten, der Eingaben zum Erzielen eines vorgesehenen Ergebnisses verwendet*“. Als Eingaben werden Ergebnisse anderer Prozesse verstanden. Eine Organisationsgruppe, wie etwa die Bauleitung, kann beispielsweise mit Arbeitsanweisungen, die Arbeitsprozesse des gewerblichen Baustellenpersonals beeinflussen.

In Kombination mit der Definition von Oberndorfer et al., [110] der einen Bauprozesses als „*gleichzeitig und aufeinander folgende, geplante und ungeplante Tätigkeiten*“ definiert, ergeben sich Bedingungen für einen definierten Prozess. Ein vollständig definierter Arbeitsprozess

auf der Baustelle ist durch die Zuteilung der Beteiligten, die zu verbrauchenden Ressourcen und durch überprüfbare Kenngrößen gekennzeichnet. Bauprozessmanagement konzentriert sich auf das Erkennen und die Auflösung von nicht-wertschöpfenden Prozessen und die Standardisierung der wertschöpfenden Prozesse. Bei der Analyse der Prozessschritte kann eine Kategorisierung im Sinne des „Lean thinking“ getroffen werden [172]:

- wertschöpfende Tätigkeit
- nicht wertschöpfend, aber notwendig
- nicht wertschöpfend und nicht notwendig

Eine wesentliche Anforderung an digitales Datenmanagement ist demnach, Dokumentations- und Arbeitsprozesse zu erkennen und Prozessschritte, die keinen zusätzlichen Wert darstellen, zu eliminieren.

Integrierte Managementsysteme fassen die Anforderungen aus unterschiedlichen Normen zusammen und müssen daher bei digitalen Systemen miteinbezogen werden. Häufig vorkommende Normen für Qualität im Bauwesen sind die Normen DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen [29] und DIN EN ISO 14001: Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung [100]. Die Normen umfassen risikobasiertes Denken und wenden einen prozessorientierten Ansatz an. Sie bauen auf dem Planen-Durchführen-Prüfen-Handeln (engl.: Plan-Do-Check-Act) (PDCA)-Modell auf, das als Grundlage für jegliche Verbesserung der Qualität angesehen wird. Das Modell ermöglicht einer Organisation, das zur Verfügungstellen von Ressourcen, die Steuerung der Prozesse und das Erkennen von Potentialen zur Verbesserung. Risikobasiertes Denken beruht auf der Möglichkeit, Faktoren bestimmen zu können, die eine Abweichung von geplanten Prozessen möglich macht. Leistungsindikatoren und deren zeitliche Entwicklung sind solche Faktoren und ermöglichen das Setzen frühzeitiger Maßnahmen zur Minimierung negativer Auswirkungen. Der PDCA-Zyklus wird wie folgt definiert [29]:

- Planen (Plan): Ist die Festlegung der Ziele und Ressourcen des Gesamtsystems und deren Teilprozesse. Dabei sind die Anforderungen des Auftraggebers und die kontinuierliche Einarbeitung der Verbesserungsvorschläge miteinzubeziehen. Darunter kann die Definition des Solls verstanden werden.
- Durchführen (Do): Ist die Umsetzung des Geplanten sowie das Beobachten und Sammeln von Prozessdaten im Ist zur weiteren Beurteilung.
- Prüfen (Check): Ist das Überwachen von Prozessen und ein kontinuierlicher Soll-Ist-Vergleich sowie eine einhergehende Berichterstattung über die daraus erhaltenen Ergebnisse.
- Handeln (Act): Ist das Erarbeiten von Verbesserungsvorschlägen sowie das aktive Ergreifen von Maßnahmen für deren Umsetzung.

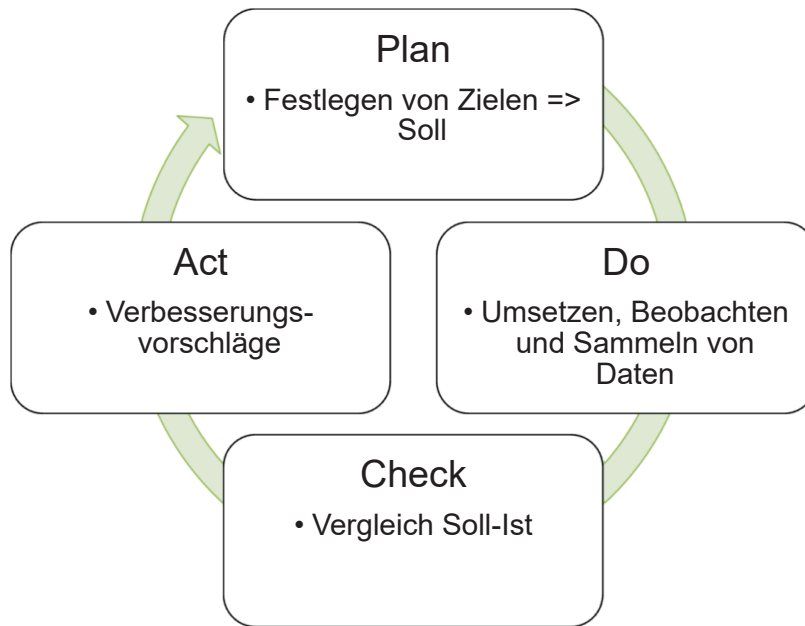


Abb. 6.1: Anforderungen des PDCA [29]

Die Abbildung 6.1 zeigt die zyklusartige Wiederholung der vier Schritte. Analoge und semi-digitale Systeme setzen diesen Zyklus einmal im Monat oder wöchentlich um. Im Gegensatz dazu können digitale Systeme den Überprüfungszyklus deutlich herabsetzen und de facto die Prozesse in Echtzeit überprüfen.

Die allgemeinen Dokumentationsanforderungen werden in den Normen zum Qualitätsmanagement [27, 29] in Abschnitte geteilt. Managementsysteme enthalten dokumentierte Informationen, die einerseits durch die Normen vorgeschrieben sind, und andererseits die Organisation als notwendig erachtet. Die Organisation ist im Kontext dieser Arbeit die Baustellenorganisation mit allen Interessensvertretern. Die Anforderungen der Stakeholder werden im Abschnitt 6.3 dargestellt. Die Normen schreiben in den Kapiteln: „Erstellen und Aktualisieren“ und „Lenkung dokumentierter Information“ die formalen Anforderungen vor. Die Informationen müssen beim Erstellen und Aktualisieren angemessene Kennzeichnung und Beschreibung, angemessenes Format und Medium sowie angemessene Überprüfung und Genehmigung sicherstellen. Die gezielte Lenkung der dokumentierten Information muss gewährleisten, dass eine geeignete Verfügbarkeit gegeben ist und die Information geschützt ist. Diese Anforderungen sind durch analoge Systeme oft nicht gegeben, da sie einerseits nicht uneingeschränkt an dem Ort und zu der Zeit verfügbar sind, wo sie benötigt werden, und der Schutz vor Verlust sowie die Vertraulichkeit nicht ausreichend sichergestellt ist.

Zur Lenkung der Information sind folgende vier Tätigkeiten definiert:

- „*Verteilung, Zugriff, Auffindung und Verwendung*
- *Ablage / Speicherung und Erhaltung einschließlich Gewährleistung der Lesbarkeit*
- *Überwachung und Änderung*
- *Aufbewahrung und Verfügung über den weiteren Verbleib“ [29, S. 31]*

Ein wichtiger Hinweis für Konformitätsbewertungen ist, dass diese vor Änderungen geschützt werden müssen. Weiters wird die Archivierung präzisiert, indem die Organisation durch die Norm verpflichtet wird, die Archivierung der Dokumente zu regeln.

Die spezifischen Dokumentationsanforderungen des Qualitätsmanagements für Bauausführung umfassen nach Mauerhofer et al. die Erstellung von Bauprozessen mit Eingaben und Ergebnissen, Definition der Verantwortlichkeiten der Überwachungsmodelle und Instrumente der Messung. Die Anforderungen, die durch Ausschreibung und Vertrag in einem Bauprojekt definiert werden, sind zu bestimmen und aufzubewahren. Dabei sind Änderungen der Anforderungen durch beispielsweise Umplanungen oder Nachträge festzuhalten. Extern bereitgestellte Prozesse, Produkte oder Dienstleistungen, wie Subunternehmerleistungen, müssen die im Vertrag genannten Anforderungen erfüllen. Die Steuerung der Produktion ist durch angemessene Prüfpläne zu unterstützen und die zu erzielenden Ergebnisse sind als Soll zu definieren.

Ein wichtiger Punkt ist die Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit der Ergebnisse von Prozessen. Damit das gewährt ist, müssen die dokumentierten Informationen aufbewahrt werden. In der Bauausführung kommen dafür Bautagebücher zum Einsatz. Die Rückverfolgbarkeit von Materialien zum Einbauort ist daraus jedoch schwer abzuleiten. Die Freigabe von Produkten und Dienstleistungen erfolgt in der Regel bei Zwischen- und Endabnahmen durch Nachweis der Konformität der Abnahmekriterien und durch die Rückverfolgbarkeit zu den Personen, welche die Freigabe autorisiert haben. Kommt es zu Nichtkonformitäten, so müssen geeignete Mittel gefunden werden diese Mängel zu beschreiben, und daraufhin eingeleitete Maßnahmen nachgewiesen werden.

### 6.2.2 Recht

Gemäß ÖNORM B 2110: Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen – Werkvertragsnorm [114] bedürfen die Themenfelder Überwachung und Dokumentation einer näheren Betrachtung in der Anforderungsanalyse. Die Ausführungen dieser Werkvertragsnorm werden durch den Kommentar zur ÖNORM B 2110 [83] von Karasek et al. ergänzt.

In den Prüf- und Warnpflichten wird festgehalten, dass der Auftragnehmer verpflichtet ist, die *erteilten Anweisungen, bereitgestellten Materialien und Vorleistungen so bald wie möglich* zu überprüfen. Bei Injektionsarbeiten bekommt der Unternehmer Injektionsfestlegungen wenige Tage vor Beginn der Arbeiten. Bei der Umwandlung in Arbeitsanweisungen kommt es durch die Bauleitung zu einer Überprüfung. Eine gewissenhafte Prüfung auf Konsistenz der Daten und technische Machbarkeit ist dabei notwendig. Bereitgestellte Vorleistungen anderer Arbeitnehmer sind beispielsweise dann zu prüfen, wenn die Bohrtätigkeiten oder andere den Injektionsarbeiten vorgelagerte Arbeiten von anderen Unternehmen ausgeführt werden. Dabei muss der Arbeitnehmer im Streitfall beweisen, dass die Warnpflicht nicht verletzt wurde oder das Material und die Anweisung unrichtig war.

Durch Schaffung einer Schnittstelle der Dokumentation zu Vorleistungen, Arbeitsmitteln und bereitgestellten Festlegungen ist der Sachverhalt selbst nach Abschluss der Arbeiten klar. Neben Prüfung von Qualitäten sind etwaige Produktivitätsverluste, die durch mangelhafte oder verspätete Vorleistungen entstehen, entsprechend zu dokumentieren. Da dem Auftraggebers das Recht zur Überwachung am Erfüllungsort zusteht, müssen Auftragnehmer in angemessener Frist in der Lage sein, die Ausführungsplanung und den Arbeitsstand zu präsentieren. Durch die im Baugrund verborgenen Arbeiten ist deshalb dem digitalen Datenmanagement in Hinsicht auf externe Überwachung ausführliche Beachtung zu schenken.

Die Pflicht der gemeinsamen Dokumentation ist durch die Möglichkeit der Führung eines Baubuches oder des Verfassens von Bautagesberichten festgehalten [114]. Das Baubuch wird von Auftraggeber oder dessen Vertreter auf der Baustelle geführt, Bautagesberichte führt der Auftragnehmer. In den Ausführungen von Karasek et al. ist festgehalten, dass auch andere Formen der Dokumentation zulässig sind [83, S. 416]. Alle Vorkommnisse, die Ausführung und Abrechnung beeinflussen, sind demnach gemeinschaftlich festzuhalten. Alle vorgenommenen Dokumentationen sind laut Norm innerhalb von 14 Tagen ab Übergabe zu kommentieren und gegebenenfalls zu beeinspruchen. Die Übergabe dieser Berichte hat „ehestens“, aber jedenfalls innerhalb von 14 Tagen zu erfolgen. In Bauverträgen werden darüber hinaus oftmals kürzere Fristen vereinbart. Die Anforderung, dass der Auftraggeber in die Bautagesberichte Eintragungen übernehmen kann, muss berücksichtigt werden.

Der Bautagesbericht beinhaltet Tatsachenbeschreibungen und sonstige Umstände [114]:

- *Wetterverhältnisse*
- *Arbeits- und Gerätestand*
- *Materiallieferungen*
- *Leistungsfortschritt*
- *Güte- und Funktionsprüfungen*
- *Regieleistungen sowie alle sonstigen Umstände*

Der Leistungsfortschritt sowie die Güte- und Funktionsprüfungen werden auf Injektionsbaustellen durch zusätzliche Protokolle dokumentiert und dem Bautagesbericht hinzugefügt, siehe dazu Seite 141. Die rechtzeitige, nachweisliche Übergabe an den Auftraggeber (AG) ist eine Bringschuld des Auftragnehmers. Eine Bestätigung des Erhalts ist demnach eine weitere Anforderung an das System.

Die Werkvertragsnorm ÖNORM B 2279: Spezialtiefbauarbeiten Aufschluss-, Brunnen- und Grundbauarbeiten macht Angaben zu Verfahrens- und Vertragsbestimmungen für Injektionen und verweist für die technischen Ausführungsbestimmungen und Aufzeichnungen auf die Ausführungsnorm [117] sowie die Norm für Prüfungen bei Injektionen in Fest- und Lockergestein [116]. Der Hinweis auf standardisierte Leistungsbeschreibungen ist in dieser Werkvertragsnorm zu finden. In den Nebenleistungen für Injektionsleistungen ist die Ausfertigung eines Schlussberichts samt graphischer Darstellung ergänzt, der jedoch nicht weiter präzisiert ist. Im Kapitel „Aufmaß und Abrechnung“ ist die Bedingung zu finden, dass Längen-, Flächen- und Raummaße auf zwei Dezimalstellen, und Stunden auf Viertelstunden zu runden werden. Das Auffüllen von Hohlräumen wird mit Protokollen ermittelt. Die Aufmaßerstellung kann bei Injektionen über Position nach Längenmaß, Flächenmaß, Raummaß, Masse, Zeit oder Stück abgerechnet werden. Bei der Abrechnung nach Zeit ist der Hinweis zu finden, dass Injektionsbetriebszeiten der Pumpe bis zu einer Unterbrechung von 15 min mitabgerechnet werden können. Störungen sind dabei das Setzen von Packern, Umsetzen dieser, das Anschließen von Injektionsleitungen sowie die Beseitigung von Störungen oder Verstopfungen.

### **Standardisierte Leistungsbeschreibungen**

Als Grundlage für die Erstellung von Leistungsverzeichnissen dienen standardisierte Leistungsbeschreibungen. Das Bundesvergabegesetz gibt an, dass bei Leistungsverträgen auf *Önormen oder standardisierte Leistungsbeschreibungen Bedacht zu nehmen ist* [111, §110.]. Nach der Begriffsbestimmung handelt es sich dabei um *Sammlungen von standardisierten Texten zur Beschreibung standardisierbarer Leistungen, wobei Leistungsbeschreibungen jedenfalls Positionen eines künftigen Leistungsverzeichnisses umfassen und Vorbemerkungen auf*

*Leistungsgruppen- und Unterleistungsgruppenebene enthalten* [119, S. 3]. Die Leistungsbeschreibungen bilden demnach keine Sonderlösungen ab, sondern nur häufig angewendete Leistungen. Die Leistungsbeschreibung (LB) der Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV) [92, 93] dient als Grundlage für den österreichischen Tiefbau. In der Leistungsgruppe 22 *Verankerungs- und Injektionsarbeiten* ist die Unterleistungsgruppe 2205 *Geotechnische Injektionen* enthalten. Die Vorbemerkungen sowie die einzelnen Leistungspositionen geben Aufschluss auf die Abrechnungsmodalitäten sowie Technologien zum Datenmonitoring und Berichtswesen nach dem Stand der Technik.

In den ständigen Vorbemerkungen zu den geotechnischen Injektionen findet sich der Hinweis, dass kontinuierliche Aufzeichnungen über die Injektionsmengen und Parameter zu führen sind, welche nach den in dieser Arbeit bereits erwähnten Normen und Richtlinien zu erfolgen haben. In Tabelle 6.2 werden die wichtigsten Positionen angeführt, die entweder Dokumentation und Berichtswesen beeinflussen, oder durch ein digitales Datenmanagement automatisch berechnet werden können. Die Baustelleneinrichtung und zeitgebundene Kosten der Baustelle bilden übergeordnete Prozesse ab. Dabei ist zu erkennen, dass die wesentlichen Positionen bei Injektionsarbeiten entweder Zeitauern der Anlagen oder der Pumpen sind. Das Material wird nach verbrauchten Kilogramm abgerechnet, die Prozessschritte „Umsetzen“ und „Packer setzen“ werden in Stückzahlen abgegolten. Unterbrechungen, die kleiner als 15 Verrechnungseinheiten sind, können laut der standardisierten Position 22055 im Aufmaß einberechnet werden.

Die Wichtigkeit und der Aufwand der Dokumentation wird in der Vorgängerversion der LB der FSV [93] hervorgehoben, indem die zwei Positionen mit dem Namen „Erweiterte Dokumentation I/II“ enthalten sind. Die zwei Pauschalen beschreiben die zusätzlichen Aufwendungen für Auswertungen mit graphischen Darstellungen und wöchentlichen Detailauswertungen. In der zweiten Pauschale werden die zur Verfügungstellung von Onlinedaten in Echtzeit und täglich abrufbarer Summen- und Detailauswertungen abgegolten. In der aktuellen Version der LB [93] wird die Dokumentation ausschließlich in den ständigen Vorbemerkungen erörtert. Die Verfügbarkeit unterschiedlicher Datenmanagementsysteme am Markt wurde von den Standardleistungsbeschreibung nicht aufgenommen.

Der Kommentar zur EN 12715 Injektionen schreibt vor, dass in der Vertragsstruktur, wie auch in der LB-VI, zeitgebundene LV-Positionen auf jeden Fall auszuweisen sind. Zusammenhänge, die sich auf die Kosten auswirken, sind die Wichte der Suspension und die Pumpraten sowie Abbruchkriterien und die Anzahl, Gleichzeitigkeit und Auslastung der Gerätschaften, insbesondere der Injektionspumpen. Dabei wird ein Leistungsverzeichnis vorgestellt, das für die zentralen Vergüteelemente der Anlagen und Pumpenzeit, eine Position für die Miete der Anlage, sowie einen gestaffelten Pumpensatz für die Arbeitsstunden gleichzeitig laufender Pumpen angibt, wie in Tabelle 6.3 zusammengefasst. Das Pendant zur Position 7.0 der Tabelle 6.2 ist in der LB in der Position 22055x zu finden. Auf Grund der ungewissen Kalkulierbarkeit der Auslastung und der Gleichzeitigkeit unterschiedlicher Pumpen einer Anlage schlägt der Kommentar zur EN 12715 Injektionen einen gestaffelten Pumpensatz

**Tab. 6.2:** Standardleistungspositionen LB-VI, Version 5 für Injektionsarbeiten, vereinfacht aus [93]

LGPosNr.	Positionstichwort	EH
220510	Stillliegez. Anlage u.Bed. Injektionsarbeiten bis 2 AT	h
220511	Stillliegezeit Gerät Injektionsarbeiten über 2 AT	d
220512	Umstellen / Verschwenken der Injektionsbohrgeräte	Stk
220514	Herstellen von Injektionsbohrungen in BKl x mit Durchmesser D x mm bis D x mm und einer Länge L von x m für geotechnische Injektionen	m
220540	Setzen von Packern bei Injektionen	Stk
220544	Liefern und Einbauen von chemischen Injektionsmitteln	kg
220545	Liefern und Einbauen eines hydraulischen Bindemittels für geotechnische Injektionen aller Art	kg
220548	Liefern und Einbauen von Additiv x für geotechnische Injektionen aller Art	kg
22055x	Einbringen von Injektionsgut in den Untergrund mit vorgegebenem Druck und vorgegebener Mengenratenbegrenzung  Die Leistung beinhaltet auch die elektronische Aufzeichnung und Auswertung aller Injektionsparameter (Druck, Menge, Ort, Zeit, Dauer, Rezeptur, Besonderheiten)  Verrechnet wird die Injektionsdauer in VE (1 VE = 1/60 Pumpenstunde), einschließlich systembedingter Injektionsunterbrechungen bis 15 VE je Unterbrechung	VE



**Tab. 6.3:** Gestaffelte Positionen für Pumpenbetriebsstunden adaptiert aus [147]

Pos.-Nr.	Obergruppe	Hauptgruppe	EH
7.0	Betreiben Injektionspumpe, inkl. Wiegung, Dosierung, Lagerung und Zuleitung von Injektionsmischungen aller Art, Betreiben Injektionspumpe unter Druck, elektronische Datenerfassung, Dokumentation von Druck, (Injektions-)rate und -menge gem. Erfordernis nach EN 12715		
7.01		Arbeitsstunden einer einzelnen (ersten) Pumpe	h
7.02		Arbeitsstunden einer zweiten Pumpe im gleichen Projektgebiet, gleichzeitig mit Betrieb der ersten Pumpe	h
7.0n		Arbeitsstunde einer n-ten Pumpe im gleichen Projektgebiet, gleichzeitig mit Betrieb der (n-1)-ten Pumpe	h

vor. In den Arbeitsstunden der ersten Pumpe ist der größte Anteil der Lohnkosten für den Pumpenfahrer und das Hilfspersonal einzurechnen. Die Ermittlung der Gleichzeitigkeit einzelner Pumpen ist ein wesentlicher Faktor für die Berechnung der Bauzeitprognose sowie einer Angebotskalkulation für neue Projekte nach diesem Konzept.

### Vertragsformen

Bei großen Bauprojekten sind Einheitspreisverträge die Regel. Diese sind auf Grund des Baugrundrisikos und der Vielfalt der Injektionsmittel oft kein ideales Mittel, um während der Bauausführung auf die angetroffenen Verhältnisse bestmöglich reagieren zu können. Der Kommentar zur EN 12715 Injektionen spricht davon, dass die *leistungs- und kostenrelevanten Zusammenhänge, ... nicht ausreichend eindeutig, vollständig und neutral beschrieben werden können*. Daher sei generell anzuraten, dass eine *auf Ungewissheit ausgelegte Vergütung* zu wählen ist [147, S. 63].

In der Literatur werden deshalb unterschiedliche Vertragsarten je nach Detailgrad der Erkundungsmaßnahmen vorgeschlagen, die Präzisierungen von Einheitspreis-, Pauschalpreis und Regiepreisverträgen darstellen. Die Abb. 6.2 zeigt die zu wählende Vertragsart in Abhängigkeit des Erkundungsstandes. Stadler gibt an, dass sich die empfohlene Vertragsform zwischen Einheits- und Regiepreis befindet. Von Pauschalverträgen nach  $m^3$  Injektionsgut oder Boden ist aus Sicht der Experten abzuraten [145], da die Preisbildung von der Pumprate und dem Zementgehalt sowie der Pumpenbetriebszeit gleichzeitig betriebener Pumpen abhängt [140].

Grad der Einflußnahme									
	pauschaliert		DIN 18301 und DIN 18309		"STILFOS"	Selbständige Regie	SKEV	Quelle/ Bezeichnung	
funktional	m <sup>3</sup> Boden lfm Tunnel	lfm Bohrg. m <sup>3</sup> Boden Versuch	lfm. Bohrg. Pumpen- Stunde Prüfungen Stoffe	BGK lfm. Bohrg. Pumpen-Std. Stoffe Versuch	BGK Ger. Miete/Mo. Personal/Std Leistung je VE Stoffe  Energie, etc.	BGK Ger. Miete/Mo. Personal/Std Betriebsstunde Stoffe  Energie, etc.	Erstattung der nachweislichen Selbstkosten zuzüglich GZ	Vergütungs- elemente	
									Grad der Erkundung

Abb. 6.2: Vertragsarten bei Injektionsarbeiten [140]

In der DIN 18301 und DIN 18309, den allgemeinen technischen Vertragsbestimmungen der Vergabe- und Vertragsordnung für Injektionsleistungen, sind die Abrechnungseinheiten für Einheitspreisverträge vorgeschlagen, die als gute Ausgangsgrundlage gelten. Darüber hinaus sollten zeitgebundene LV-Positionen immer explizit ausgewiesen werden [147]. Auf Grund der starken Abhängigkeit der Preisbildung von der Pumprate sollten die Betriebsstunden mindestens gestaffelt nach Tabelle 6.3 ausgeschrieben, angeboten und abgerechnet werden.

Stilfos ist ein Vertrags- und Vergütungssystem, das auf zeit- und leistungsbezogene Vergütungselemente aufbaut. Dieses System kommt aus dem Bergbau und wurde entwickelt, um schwankende Geräteauslastungen aufgrund vieler leistungsbeeinflussender Faktoren, wie wechselndes Gebirgsverhalten und Wasserzutritte in der Abrechnung berücksichtigen zu können. Das Umlagesystem baut dabei auf drei unterschiedlichen Vergütungen auf. Es kommen pauschale, zeitabhängige und leistungsabhängige Anteile zur Ausschreibung [140, 160]. Die Detailkalkulation wird bei dieser Vertragsart in sieben Kostengruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe S1 wird pauschal für die Baustelleneinrichtung und -räumung abgerechnet. Die Gruppen S2 „Baustellengemeinkosten“, S3 „Gerätemiete“ und S4 „operatives Personal“ wird in zeitabhängigen Elementen ausgelegt. Die Gruppe S5 „Leistungsvergütung“, S6 „Material“ und S7 „Energie und Fremdleistungen“ entsprechen einer leistungsbezogenen Vergütung. Die zeitabhängigen Kosten kommen nur in abgeminderter Form zur Abrechnung, die Differenz zu den Nettokosten werden auf die Leistungsvergütung S5 umgelegt und erst bei entsprechender Leistung erzielt. Die Vertragsart sieht vor, dass alle Gesamtzuschläge der Positionen S2 bis S4, Reparaturkosten von S2 und S3 auf S5 umgelegt werden. Des Weiteren wird ein kalkulatorischer Abschlag der Personalkosten der Positionen S2 und S4 auf S5 umgelegt.

Im Vergleich zur selbständigen Regie wird durch die Umlage von zeitabhängigen Anteilen auf leistungsabhängige Positionen ein Leistungsanreiz für den Auftragnehmer geschaffen, der bei Regiepreisverträgen und Selbstkostenerstattungsverträgen (SKEV) nicht gegeben ist. Sofern keine Änderung der ausgeschriebenen Leistung und der Bauzeit eintritt, entspricht der Gesamtvertrag von Stilfos einem Einheitspreisvertrag. Der Vorteil dieses Systems besteht darin, dass sich bei Parameteränderungen die tatsächlich entstehenden Kosten besser dem bestehenden Vertrag entsprechen. Bei Bauzeitverkürzung kann der Auftragnehmer durch die erhöhte Produktivität einen Mehrerlös erwirtschaften. Als wesentlicher Bestandteil dieses

partnerschaftlichen Vertragsmodells gilt, dass die im Spezialtiefbau aufwändige Ressourcenplanung, die Leistungsgeräte und operative Einsatzkräfte festlegt, durch die Vertragspartner gemeinschaftlich vereinbart wird. Dies setzt Fachkompetenz beider Partner voraus.

Es gibt erste Überlegungen für innovative Abrechnungskonzepte, die über die Betriebszeitstaffelung hinaus signifikanten Parameteränderungen, wie die des Injektionsdrucks, berücksichtigen. Diese Formen werden jedoch zur Zeit nur theoretisch diskutiert, da in der Ausführung die notwendigen Werkzeuge fehlen, um parameterabhängige Positionen vertragstreu abzurechnen. In Bauverträgen finden sich vereinzelt schon die gestaffelten Pumpenbetriebsstunden, werden aber durch die äquivalente Kalkulation der abgestuften Positionen ad absurdum geführt. Die leistungsbezogenen Vergütungsmodelle, wie StilfOS werden durch die derzeitigen Dokumentationssysteme nicht begünstigt. Durch die flächendeckende digitale Dokumentation der erbrachten Leistung werden in Zukunft diese Vertragsformen weiter an Bedeutung gewinnen.

### 6.2.3 Ausführung

Die Ausführung von Injektionen ist auf europäischer Ebene in der ÖNORM EN 12715: Ausführen von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Injektionen [117] geregelt. Die nationalen Ergänzungen, insbesondere zu Prüfungen, werden in der ÖNORM B 4454: Erd- und Grundbau – Injektionen in Fest- und Lockergestein – Prüfungen [116] festgehalten. Richtlinien ergänzen die Ausführungsnormen. Auf internationaler Ebene ist dies der Report der International Society for Rock Mechanics Commission on Rock Grouting (ISRM), auf nationaler Ebene werden die Kommentare der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) [147] sowie das Merkblatt der Österreichischen Bautechnik Vereinigung (ÖBV) [128] bei der Analyse berücksichtigt.

Monitoring, Analyse- und Berichtspflichten die aus der ÖNORM EN 12715: Ausführen von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Injektionen entstehen, sind wie folgt dargestellt und werden bereits im Hinblick auf die Anforderungen eines Datenmanagementsystems diskutiert.

In der Entwurfs- und Bemessungsphase müssen Bereiche und Mittelwerte für Parameter des Injektionsgutes für die Durchführung festgelegt werden. Diese Vorgaben werden während der Ausführung nachweislich überprüft. Die Faktoren Volumen des Injektionsgutes je Arbeitsdurchgang (Passe), der Injektionsdruck, die Durchflussrate oder Einbringungsgeschwindigkeit sowie die Rheologie des Injektionsgutes bestimmen das Verfahren und müssen in der Ausführung dokumentiert werden. Die Lage aller Injektionsbohrungen ist planlich darzustellen und mit einer Nummerierung zu versehen. Diese Nummer bildet die Grundlage für die spätere Zuordnung der Messwerte. Bohrlochabweichungen bei Bohrtiefen bis zu 20 m

sollen maximal 3 % betragen. Die Forderung der begrenzten Abweichung ist demnach in der Ausführung zu kontrollieren. Die Überwachungs- und Kontrollkriterien sind die Eigenschaften des Injektionsgutes während der Verarbeitung und Einbringung, die Toleranzen für Richtung und Neigung der Bohrlöcher, die Abbruchkriterien einer Passe, Bewegungen oder Verformungen des Baugrundes, Wasserstände oder Pegel sowie der Chemismus des Wasser. Im Lockergestein sind die Abbruchkriterien Grenzdruck oder Volumen, Bewegungen, Austritte von Injektionsgut an der Oberfläche sowie Umläufigkeiten der Packer. Die unterschiedlichen Gründe müssen in der Dokumentation dargestellt und differenziert analysiert werden. Im Gebirge sind die Abbruchkriterien Grenzdruck und/oder -volumen, Bewegungen, Austritte von Injektionsgut oder unzulässige Verluste in anderen Bereiche darzulegen. Die unterschiedlichen Gründe müssen in der Dokumentation dargestellt und nach differenzierten Kontrollkriterien analysiert werden. Die Messung des Injektionsdruckes sollte möglichst nahe an der Einbringstelle erfolgen. Bei Bohrungen ist eine Messung am Bohrlochmund als optimal zu betrachten.

Die Planung und Ausführung ist ein interaktiver Prozess der *ständiges Baumanagement* notwendig macht. Die festgelegten Verfahrensanweisungen können sich während der Bauausführung sukzessive ändern. Eine Plattform, die den gemeinsamen Entscheidungsfindungsprozess begünstigt, ist damit notwendig. Die Reihenfolge der Ausführung von Primär-, Sekundär-, und Tertiärlöchern ist einzuhalten. Daraus ergibt sich die Forderung nach einer Möglichkeit der differenzierten Auswertung. Alle Injektionsphasen sind zu überprüfen und bei der Beaufsichtigung sind Unterlagen zu erstellen. Diese Unterlagen setzen sich auf der Baustelle aus den Daten der Maschinen, Prüfungen und Beobachtungen zusammen. Der Hinweis der kontinuierlichen Beaufsichtigung und des Vergleichs mit der Planung ist nur durch Monitoringsysteme zu bewerkstelligen. Die Norm spricht hier noch von *mechanischen, analogen und rechnergestützten Aufzeichnungsgeräten*. Diese Begriffe können mit Abschnitt 4.2.3 auf Seite 75 in Zusammenhang gebracht werden. Digitales Datenmonitoring geht demnach von rechnergestützten Steuerungen und Aufzeichnungen aus. Die Möglichkeit nach periodischen Zusammenfassungen, wie Abschlussberichten einzelner Phasen, muss durch die Beaufsichtigung zur Verfügung gestellt werden. Die Beaufsichtigung ist von allen Vertragspartnern durchzuführen.

Die Norm greift das Zusammenspiel zwischen Messung, Kontrolle und Auswertung der Bohr- und Injektionsparameter je Abschnitt auf, das durch *rechnergestützte Systeme* erbracht werden soll. Die Echtzeitkontrolle der Injektionsparameter während der Ausführung wird dezidiert gefordert. Die Hardcopy-Ausdrucke können durch Sicherungskopien ersetzt werden, sofern diese sicher aufbewahrt werden. Die papierlose Baustelle ist bei Sicherstellung geeigneter digitaler Sicherungskopien, durch die Norm nicht behindert. Messintervalle von Sensoren und Datenloggern werden durch die Projektanforderungen definiert. Es zeigt sich, dass die heutigen Technologien und Speichermöglichkeiten diese Forderung der Norm obsolet machen, da Messungen für Bohr- und Injektionsparameter pro Sekunde gespeichert werden. Abhängig von den Herstellern werden bei Injektionen mindestens 500 Messwerte pro Punkt

aufgezeichnet. Die relative zeitliche Entwicklung der Injektionsparameter soll für die Injektionsabfolgen aufgezeichnet werden. Dabei wird auf die Vergleichsmöglichkeit für zukünftige Arbeiten in eigenen oder Folgeprojekten hingewiesen. Die systematische Analyse der Verläufe in Abhängigkeit von bestimmten Kriterien ist somit ein möglicher Anwendungsfall eines Monitoringsystems. Die Parameter der Bohrlochherstellung sind Bohrfortschritt, Spülungsdruck, Spülungsrate, reflektierte Energie, Drehzahl, Drehmoment, Andruckkraft, Bohrlochtiefe, und können automatisch gemessen und gespeichert werden.

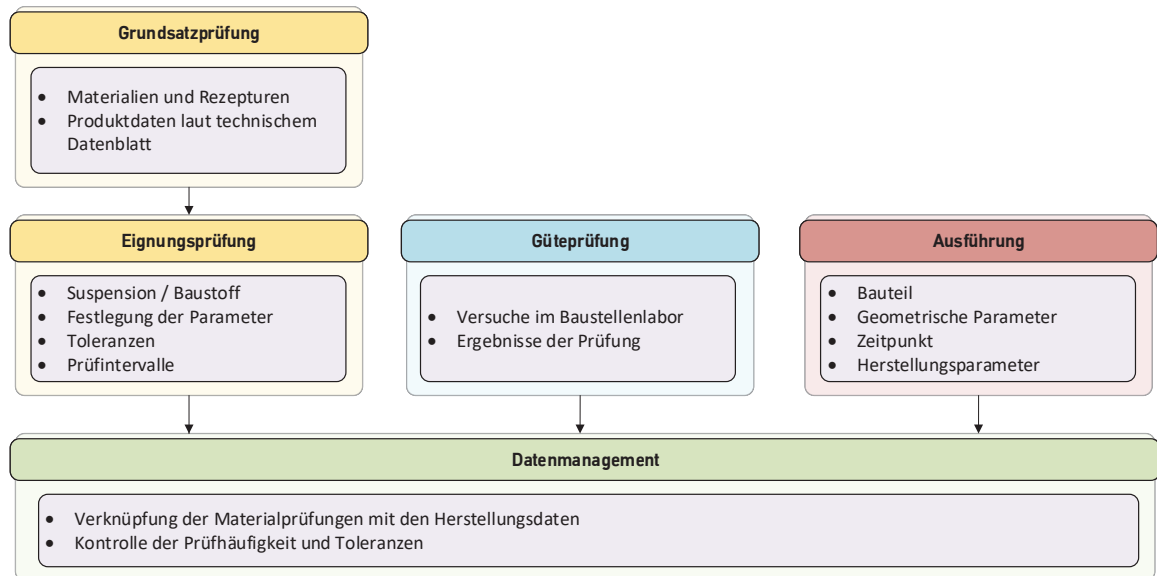
Das Injektionsgut wird auf der Baustelle zusammengemischt und muss daher Kontrollprüfungen vor Ort unterzogen werden. Übliche Prüfungen, abhängig von Injektionsgut, sind Dichtebestimmung, Viskosität, Abbindedauer und Verarbeitbarkeit. Diese Prüfungen sind entsprechend dem Qualitätsmanagement den Mischungs-Chargen zuzuweisen. Die Chargen wiederum müssen den Injektionsstellen zuordenbar sein. Die geforderten Aufzeichnungen für Injektionsarbeiten sind Organisationsdiagramme, die Verantwortlichkeiten festlegen, und Verfahrensweisungen<sup>48</sup>, die Abläufe und messbare Kriterien vorschlagen. Die Struktur der Verantwortlichkeiten findet sich in der Befugnis zur Freigabe von Dokumentationen und Abrechnungen wieder und muss daher bei der Entwicklung eines Systems berücksichtigt werden. Die geforderten Aufzeichnungen gliedern sich nach Norm in tägliche Beobachtungen, monatliche Aufzeichnungen über den Verbrauch von Injektionsgut und Fortschritt sowie Abschlussberichte und Übergabeberichte über das Erreichen der Injektionsfestlegungen.

Die Baustellenberichte geben Angaben zu Bauleistungen, in dem alle Prozesse zu Bohren, Mischen und Injizieren sowie Kontrolle und Ressourcen mit samt der Verantwortlichkeiten angegeben werden. Injektionsberichte sollen graphisch und statistisch zusammengefasst und vom verantwortlichen Bauleiter unterzeichnet werden. Diese Art der Unterzeichnung ist in Ihre Art nicht definiert. Ein adäquater Ersatz bei der Digitalisierung dieser Berichte ist somit vorzunehmen.

Die Ergänzungen der ÖNORM B 4454: Erd- und Grundbau – Injektionen in Fest- und Lockergestein – Prüfungen erklärt den Zusammenhang zwischen Grundsatzprüfung, Eignungsprüfung und Güteprüfung<sup>49</sup> und definiert die Prüfmethode sowie den Prüfumfang, der bei Injektionsmitteln durchzuführen ist. Bei der Eignungsprüfung werden noch nicht getestete Injektionsgüter für einen Anwendungsfall nach Abschnitt 3.2 hinsichtlich der grundsätzlichen Einsetzbarkeit beurteilt. Dabei werden Ausgangsstoffe, Mischungen und Anwendbarkeit des Injektionsgutes überprüft. In einem zweiten Schritt wird bei der Eignungsprüfung das Injektionsgut für ein bestimmtes Projekt untersucht. Dabei werden das eingesetzte Injektionsverfahren sowie der Untergrund berücksichtigt. Aus diesem Grund werden die vorgeschriebenen Prüfungen zumeist bei der Anwendung vorgelagerten Probeinjektionen im projektspezifischen

<sup>48</sup>Diese werden auch als Injektionsfestlegungen bezeichnet.

<sup>49</sup>Güteprüfungen werden im Fachgebrauch als Konformitätsprüfungen oder Kontrollprüfungen bezeichnet, da sie festgelegte Anforderungen an das Produkt bewerten.



**Abb. 6.3:** Dokumentationsanforderung der ÖNORM B 4454: Erd- und Grundbau – Injektionen in Fest- und Lockergestein – Prüfungen [116]

Untergrund durchgeführt.<sup>50</sup> Die Norm beschreibt die Möglichkeit eines Entfalls der Eignungsprüfung, sofern *vergleichbare Erfahrungen* vorliegen. Bei Beurteilung der Vergleichbarkeit ist in Zukunft durch das Datenmanagement zu unterstützen. Die Güteprüfung ist besonders in der täglichen Ausführung der Tätigkeiten von entscheidender Bedeutung, da sie in den routinemäßigen Betrieb auf einer Baustelle integriert werden muss. Es ist in regelmäßigen Abständen nachzuweisen, ob die Ausgangsstoffe und die einsatzbereiten Mischungen, den vorausgesetzten Eigenschaften der Grundsatzprüfung entsprechen. Die meisten Konformitätsprüfungen werden im Baustellenlabor durchgeführt und unterliegen daher einer größeren Messgenauigkeit als im Labor. Der Umfang und die Regelmäßigkeit richten sich entweder nach zeitlichen oder mengenabhängigen Intervallen. Beispielsweise werden Güteprüfungen oftmals am Schichtbeginn nach Stillstandszeiten, bei Verwendung einer neuen Charge einer Einzelkomponente oder nach einem definierten verbrauchten Volumen durchgeführt. Die Ausführungsprotokolle, die aus den Forderungen der ÖNORM EN 12715: Ausführen von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Injektionen entstehen, sind mit den Güteprüfungen in Zusammenhang zu bringen.

Prüfmethoden, Prüfumfang sowie der Ablauf der Prüfungen können in [116], [81] sowie [61] nachgelesen werden. Die Abbildung 6.3 zeigt die beschriebene Dokumentationsforderung aus der Prüfnorm im Datenfluss dargestellt. Dabei wird die Notwendigkeit der Schnittstelle in einem Datenmanagement sichtbar, die einerseits die Verknüpfung und Zuordnung der Qualitätsprüfung ermöglicht, jedoch auch in gleicher Weise Anweisungen an die Ausführung und die Güteprüfung ausgibt, sofern Toleranzen oder Prüfhäufigkeiten nicht eingehalten werden.

<sup>50</sup>Standardisierte Leistungsbeschreibungen beschreiben diese Prüfungen unter dem Positionstext „*Probefeld Injektionen*“.

Der Report der ISRM [132] beschreibt im Flussdiagramm die Notwendigkeit von Monitoring in der Ausführungsphase. Das injizierte Material mit den Qualitätstest sowie das Bauverfahren selber bilden die beiden anderen Grundlagen. Die Modifikation des gesamten Injektionsprozesses soll auf die angetroffenen aktuellen Konditionen abgestimmt und angepasst werden. Die ÖGG spricht in diesem Zusammenhang vom *Überprüfen der Injektionsergebnisse und dem beobachteten Systemverhalten (SVb)* sowie dem *kontinuierlichen injektionsbegleitenden Prozess (KIP)*. Weitere Hinweise zu Monitoring und Berichtswesen sind im Report der ISRM zu finden:

- Monitoring von gleichzeitigen Beobachtungen unterschiedlicher Bohrlöcher
- Die Messungenauigkeit beim Mischen darf nicht größer fünf Prozent sein. Die Funktionalität der Messsensoren muss einer regelmäßigen Prüfung unterzogen werden. Dabei ist im Report noch von Handprotokollen die Rede.
- Die exakte Zusammensetzung der Materials ist von besonderer Bedeutung. Eine regelmäßige Probenahme ist notwendig.
- Der Einsatz von induktiven Durchflussmessern wird als Standard betrachtet, um Änderung der Pumprate aufzuzeichnen. Die Messgenauigkeit von  $\pm 1\%$  bei der Pumprate ist grundsätzlich einzuhalten. Die Genauigkeit bei kleinen Raten von 1–5 % des maximalen Durchflusses, ist mit  $\pm 5\%$  begrenzt.
- Bei chemischen Injektionsmitteln wird eine ständige Messung des Gewichtes des Vorratsbehälters oder eine Chargenzählung, beispielsweise der Kanister, angeführt.
- Die Druckmessung hat so nahe wie möglich am Injektionspunkt zu erfolgen, um Verluste in der Maschine und in der Leitung ausschließen zu können. Die Drucksensoren müssen dabei mit einer Membran vom Injektionsmedium abgedichtet sein.
- Der Report gibt für die Protokollierung der Messdaten die Verwendung von Linienschreibern und Zählern an. Diese Funktion entspricht einer analogen Messung der Daten, entsprechend der Einteilung nach Abschnitt 4.2.3 auf Seite 75 und ist durch die fortgeschrittene Technologie als nicht mehr aktuell einzustufen.

Der Report schlägt einen dreistufigen Analyseprozess vor. Die Stufen bestehen aus täglicher Überwachung der Tätigkeiten, sowie der abschnittswisen und abschließenden Analyse. In einem digitalen Datenmanagementsystem sind die letzten zwei Stufen des Prozesses ineinander verschränkt, da neue Analysen immer bauteilbezogen oder über zeitliche Zuordnung verarbeitet werden können. Im Gegensatz zum Report der ISRM wird im Kommentar zur EN 12715 Injektionen [147] konkret auf Dokumentations- und Berichtspflichten eingegangen, und es werden wesentliche Aussagen zu Visualisierungen und Analysen sowie Formen der Speicherung und Aufbereitung getroffen. Die Angabe eines Leistungsverzeichnisses und Anforderungen an Bauüberwachung, Prüfungen und Kontrolle kann auf Grund der Aktualität des Dokumentes und der Expertise der Mitarbeiter [147, S. 5] als prioritär eingestuft werden.

Angaben, die auf Anforderungen schließen lassen und noch nicht von den bereits erwähnten Regelwerken angegeben sind, werden wie folgt in Bezug mit den Anforderungen eines digitalen Datenmanagements für Injektionsarbeiten gebracht.

- Die Informationen aus dem Bohrvorgang sollen in der spezifischen Energie zusammengefasst werden. Das entstehende Energieprofil kann bei Überlagerung mit den geotechnischen Erkundungen zusätzliche Information bringen. Die spezifische Energie setzt sich nach Gleichung (6.1) zusammen:

$$e = \frac{F}{A} + \frac{2\pi NT}{AR} \quad (6.1)$$

mit dem Anpressdruck oder der Vorschubkraft  $F$ , der Querschnittsfläche des Bohrloches  $A$ , der Bohrdrehzahl  $N$ , dem Drehmoment  $T$ , sowie dem Bohrfortschritt  $R$ .

- Die Stoffraumrechnung beschreibt die Ermittlung des Volumens des Injektionsmittels aus den Ausgangsstoffen. Für die Abrechnung wird damit aus dem verpressten Volumen auf die Einzelkomponenten geschlossen, die dann in einzelnen Leistungspositionen verrechnet werden. Zusatzstoffe wie Füller oder Sande werden Suspensionen beigemischt, um Eigenschaften anzupassen, und sind in der Stoffraumrechnung zu berücksichtigen. Zusatzmittel und Zusätze wie Verflüssiger, Stabilisatoren, Erstarrungsbeschleuniger oder Verzögerer müssen hingegen in der Berechnung nicht berücksichtigt werden.
- Während der Eignungsprüfungen werden die erwartbaren Bandbreiten für die Parameter ermittelt, die anschließend auf der Baustelle in der Qualitätssicherung eingehalten werden müssen.
- Die Kontrollprüfungen sind aus dem Vorratsbehälter zu entnehmen. Bei der Entnahme sind der Zeitpunkt, der Ort, das Mischungsalter und die Zusammensetzung zu notieren. Vorgeschriebene rheologische Prüfungen werden unmittelbar nach der Entnahme durchgeführt. Bei den Rückstellproben sind die Lagerungsbedingungen mitzudokumentieren.
- Der Kommentar schreibt vor, dass zur Bewertung der gewählten Abbruchkriterien durch den Planer alle Datensätze in Form von Online-Aufzeichnungen auf der Baustelle vorliegen sollten. Kombinierte Auswertungen verschiedener Kriterien werden möglich und gewährleisten eine zeitlich und wirtschaftlich optimierte Ausführung. Vollständige Injektionsdaten zur Bewertung setzen sich aus Herstellungsparametern der Bohrung, Lugeontests in diesen Bohrlöchern, Herstellungsparametern der Injektion, Messung des Druckabfalls und den realen Eigenschaften des Injektionsmittels zusammen. Im Hinblick auf die Kombination unterschiedlicher Parameter sowie der Verfügbarkeit, wird ein digitales Datenmanagement gefordert.
- Bei der Überwachung und Kontrolle der Ausführung sind die Informations- und Dokumentenläufe von entscheidender Bedeutung. *Entscheidungshierarchien* müssen daher



festgelegt und eingehalten werden. In diesem Zusammenhang wird auf die Wichtigkeit von Arbeitsanweisungen hingewiesen.

- Prüfung des Qualitätsmanagements der Materialien, der Messtoleranzen der Druck- und Durchflussmengenähler, der Bohrgeometrien, der Injektionsparameter und Abbruchgründe und der Arbeitszeiten und Mannstärken sind wesentliche Bestandteile für die Bauüberwachung. Bei zunehmender Digitalisierung der Dokumentation ist für die Bauaufsicht die regelmäßige, unabhängige Überprüfung der Zuverlässigkeit aller Datenregistrierungen eine wesentlich Tätigkeit. Die Möglichkeit der eigenständigen Aufzeichnungen und Abgleichungen auf der Baustelle sind durch übergreifende Dokumentationsvorgänge zu ermöglichen.
- Abweichungen sind mit den Planern und Experten zu besprechen, wobei die Datensätze *bearbeitbar abzuspeichern* sind. Die entstandenen Daten der Injektion müssen auf Übereinstimmung mit den planlich festgelegten Parametern überprüft werden. In der gelebten Praxis werden dazu Injektionsprotokolle versendet und diese von der Bauüberwachung mit dem Injektionsfestlegungen des Planers verglichen.
- Indirekte Prüfung des Erfolges kann mit zusätzlichen Versuchen oder mit dem *Erreichungsgrad der Abbruchkriterien* und der eingepressten Menge verifiziert werden. Der Erreichungsgrad und die bauteilbezogenen Mengenanteile können durch ein Monitoring-system ohne zusätzliche Prüfungen berechnet werden.
- Die Verfahrensanweisungen müssen zusätzlich zu den Abläufen und Kriterien festlegen, wann eine Abweichung vom Soll vorliegt. Es wird vorgeschlagen, dass die Verfahrensanweisungen demnach in die einzelnen Arbeitsprozesse abstrahiert und verständlich ausgestaltet werden, bis hin zu einfachen Arbeitsanweisungen. In der ersten Phase der Bautätigkeiten ist die Aktualität der Verfahrensanweisungen täglich zu überprüfen.
- Die Aufzeichnung der Injektionsparameter muss unabhängig vom Betrieb der Pumpe stattfinden und mit einem Zeitstempel versehen werden. Die Übergabe der Dokumente vom Auftragnehmer (AN) an den AG hat täglich zu erfolgen. Dabei wird im Kommentar ein *weiterverarbeitbares Dateiformat* wie eine CSV-Datei gefordert.
- Die Darstellung in räumlicher Form oder im Bezug auf das Bauwerk ist für eine Interpretation zur Verfügung zu stellen. Diese Forderung kann nur erfüllt werden, wenn eine Verknüpfung der Herstellungsparameter und Materialien mit den Plänen erzeugt werden kann.

#### 6.2.4 Mensch-System Interaktion

Die Entwicklung und der Erfolg von digitalen Systemen auf Baustellen sind geprägt von der Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Insbesondere die effiziente Gestaltung der

Benutzerschnittstelle<sup>51</sup> zur Eingabe von Daten und das Navigieren des Benutzers in einer zentralen Webplattform sind dabei zu beachten, was durch die Anforderungen der Stakeholder in Abschnitt 6.3 besonders betont wird. Die Normenreihe *EN ISO 9241 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion* wurde deshalb in die Analyse aufgenommen. Die DIN EN ISO 9241-210: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme gibt einen Überblick über menschenzentrierte Gestaltungsaktivitäten für den gesamten Lebenszyklus. Dabei sind die folgenden Grundsätze zu berücksichtigen [31], die auf die Entwicklung von Systemen im Baubetrieb bezogen werden.

**Nutzungskonzept** Das umfassende Verständnis der Benutzer, deren Arbeitsaufgaben und Arbeitsumgebungen sind einzubeziehen. Die Interessensvertreter reichen deshalb vom gewerblichen Personal, die für Eingaben zuständig sind, bis hin zum Projektleiter, der ausschließlich über Leistungsparameter Bescheid wissen will. Die Norm bezeichnet die Merkmale von Benutzern, Arbeitsaufgaben und Umgebungen als Nutzungskonzept.

**Einbeziehung der Nutzer** Die Benutzer werden während der Entwicklung miteinbezogen. Dieser Grundsatz kann durch die Mitwirkung bei der Entwicklung oder die Bewertung von Teillösungen realisiert werden. In diesem Zusammenhang werden für die Erstellung von Baustellensystemen die Akzeptanz und das Engagement der Arbeiter und Bauleitung durch die Einbeziehung schon vor Einführung eines Systemwechsels gesteigert.

**Periodische Evaluierung** Anpassung und Verfeinerung des Systems werden auf der Basis von Evaluierungen mit den Benutzern durchgeführt. Dabei werden während der Einführung die Rückmeldungen der Benutzer eingeholt und für die weitere Erfüllung Verbesserungsvorschläge erarbeitet. In sogenannten Lessons-Learned-Workshops, die eine Projekt-Retrospektive darstellen, kann am Ende einer Systemeinführung evaluiert werden, ob alle Anforderungen erfüllt wurden. Während des routinemäßigen Einsatzes ergeben sich längerfristige Erkenntnisse für weitere Entwicklungen. Der Entwicklungsprozess zeichnet sich durch Iterationsschritte aus. Dabei werden am Beginn Prototypen erzeugt, die möglichst schnell in der Ausführung getestet werden. In Abb. 6.4 ist dieser Prozess mit „go live“ gekennzeichnet. In weiteren Iterationsschritten werden die Erfordernisse und Erwartungen der Benutzer und anderer Stakeholder, die sich erst durch die Tests abzeichnen oder artikulierbar werden, in die Spezifikationen aufgenommen.

**Nutzungserlebnis** Das Nutzungserlebnis<sup>52</sup> wird bei der gesamten Gestaltung berücksichtigt. Dabei spielen die Gewohnheiten, Fähigkeiten, Einstellungen und Erfahrungen der Benut-

<sup>51</sup>Unter Entwicklern hat sich der englischsprachige Begriff User Interface (UI) durchgesetzt.

<sup>52</sup>Unter Entwicklern wird der englischsprachige Begriff User Experience (UX) verwendet. *User Experience ergibt sich aus der Darstellung, Funktionalität, Systemleistung, dem interaktiven Verhalten und den*

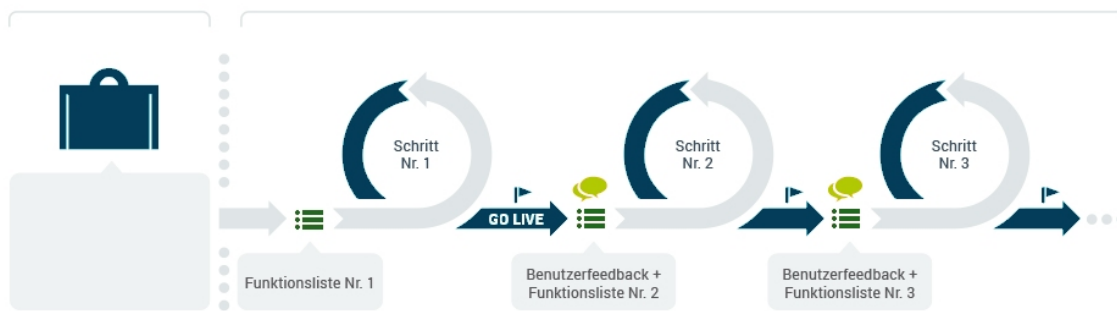


Abb. 6.4: Iterationsschritte in der Entwicklung [167]

zer eine entscheidende Rolle. Die Norm schreibt vor, dass eine Entwicklung, die auf das Nutzungserlebnis ausgerichtet ist, die Dokumentation der Benutzer, Online-Hilfen, kontinuierliche Betreuung, Instandhaltung und Schulungen berücksichtigt. Bei der Einführung und Implementierung auf Baustellen hat sich innerhalb des Forschungsprojektes eine Service-Desk-Software etabliert, in der Kunden ihre Anfragen eintragen und priorisieren können. Bei der Kommunikation wurden Messengerdienste herangezogen, um Notfälle zu kommunizieren<sup>53</sup>.

**Gestaltung des Entwicklungsteams** In den Entwicklungsteams sind fachübergreifende Kenntnisse und Perspektiven einzubinden. Bei den Herstellern von Soft- und Hardware für die Bauindustrie sollten auf jeden Fall Bautechniker, die den Arbeitsalltag kennen und über Wissen in der Bauverfahrenstechnik verfügen, aufgenommen werden. Sie können die Ansichten der späteren Benutzer vertreten.

Die Aktivitäten der Gestaltung von interaktiven Systemen beginnen mit dem Verstehen und Festlegen des Nutzungskontextes. Der Prozess in Abb. 6.5 ist nicht linear und Ergebnisse beeinflussen andere Aktivitäten. Die Beschreibung des Nutzungskontextes umfasst die Benutzer und sonstige Interessensvertreter, deren Merkmale, Ziel und Arbeitsaufgaben sowie die Umgebung des Systems. Die Nutzungsanforderungen ergeben sich aus den organisatorischen Abläufen, der Gebrauchstauglichkeit sowie aus dem Nutzungskontext der Interessensvertreter. Beispielsweise ist eine Nutzungsanforderung, dass die Bedienung des Systems im Tunnel ohne direkte Internetverbindung von der Mehrheit des gewerblichen Personals selbsterklärend benutzt werden kann. Die Gestaltungslösungen enthalten die Benutzeraufgaben und die Benutzerschnittstellen, die in einer ersten Phase evaluiert werden. Am Ende des Zyklus werden diese aus Sicht der Benutzerperspektive evaluiert, um die reale Nutzung des Systems zu testen. Die Feldvalidierung wurde in diesem Projekt als probates Mittel herangezogen. Insbesondere wurden die Rückmeldungen der Benutzer, Benutzerbeobachtungen und Fehlermeldungen berücksichtigt und Zufriedenheitsumfragen durchgeführt.

*unterstützenden Ressourcen eines interaktiven Systems, sowohl der Hardware als auch der Software [31, S. 11].*

<sup>53</sup>Im Projekt wurden der Servicedesk Jira Service Desk des Unternehmens ATlassian sowie der Telegram Messenger verwendet.

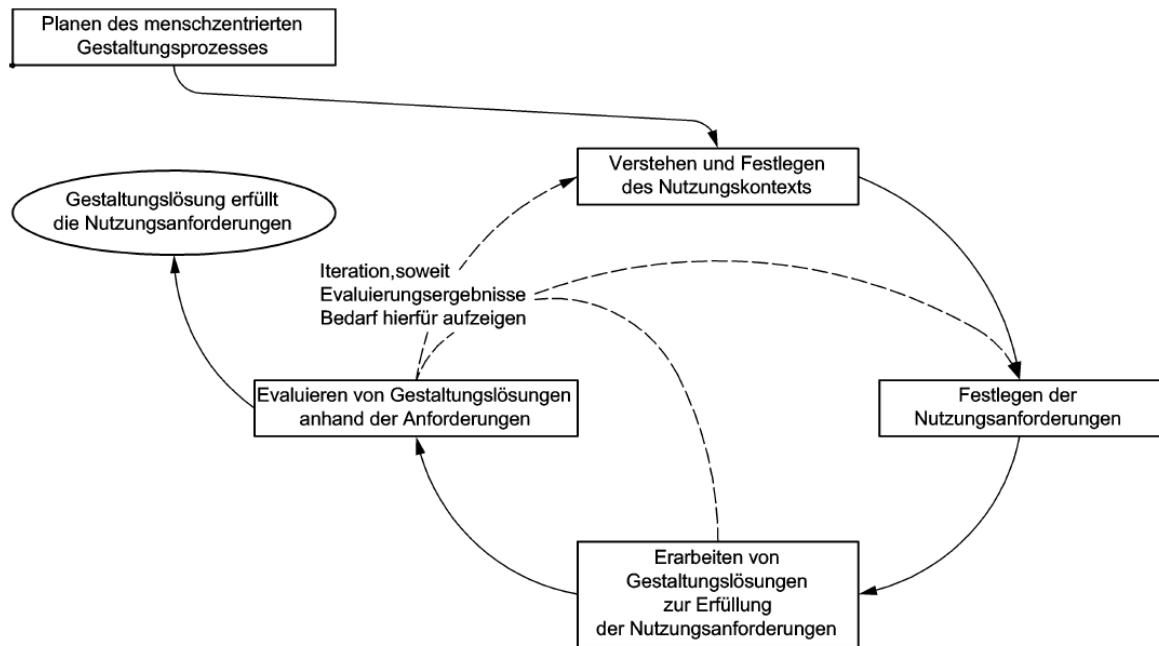


Abb. 6.5: Menschenzentrierte Gestaltungsaktivität [31]

Die Grundsätze der Dialoggestaltung für die Mensch-System-Interaktion müssen bei den Benutzeraufgaben und dem gesamten Nutzererlebnis berücksichtigt werden. Sie sind in der DIN EN ISO 9241-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung definiert. Die Dialoggestaltung der Systeme wird nach folgenden Punkten [30] bewertet:

- Aufgabenangemessenheit
- Selbstbeschreibungsfähigkeit
- Erwartungskonformität
- Lernförderlichkeit
- Steuerbarkeit
- Fehlertoleranz
- Individualisierbarkeit

Die Aufgabenangemessenheit ist gegeben, sofern die Funktionen auf die charakteristischen Eigenschaften abgestimmt sind. Daher sollte das System dem jeweiligen Benutzer nur Informationen zur Verfügung stellen, die dieser für seine Arbeit tatsächlich braucht. Dabei ist die Form der Ein- und Ausgabe auf den Arbeitsbereich anzupassen. Dateneingaben durch gewerbliches Personal auf Baustellen während des Betriebes ist beispielsweise problematisch, da das Arbeitsumfeld und die Vielzahl an unterschiedlichen Tätigkeiten durch ein Smart Device behindert werden würden. Ein wichtiger Hinweis in der Norm ist, dass die

verlangten Dialogschritte zum Arbeitsablauf passen müssen. Daher sollten nach Kenntnis des Bauablaufes, parallel dazu die Eingaben getätigt werden [30].

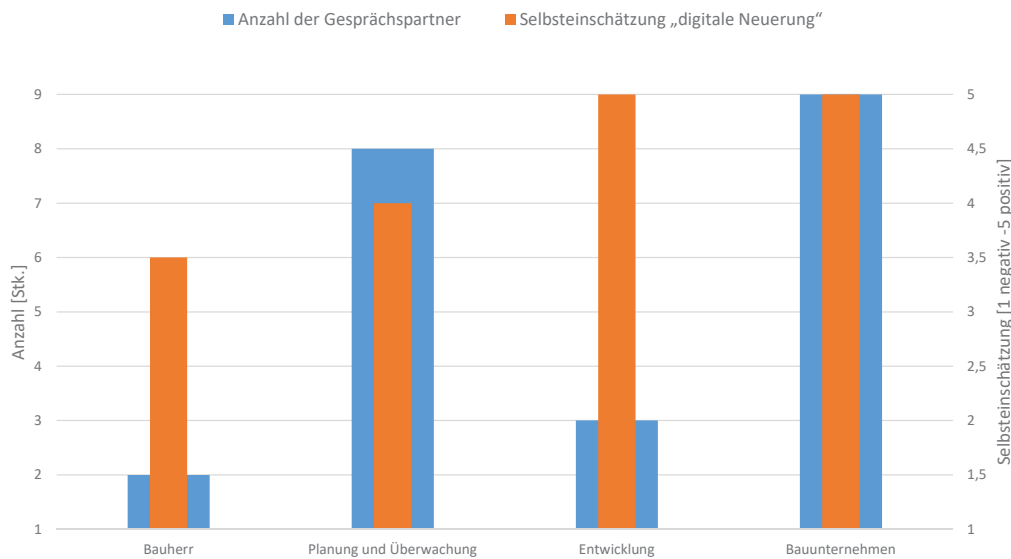
## 6.3 Projektspezifische Anforderungen

Als projektspezifische Anforderungen werden die *Stakeholder des Systems* selbst und *Stakeholder des Umgebungssystems* zusammengefasst. Mit Hilfe von Prozessbegehungen und Leitfragen, sowie mehrmaligen Studienaufenthalten auf Injektionsbaustellen während des Ausarbeitung dieser Doktorarbeit, konnten aus den Gesprächsmanuskripten die projektspezifischen Anforderungen gebildet werden.

### 6.3.1 Prozessbegehung und Leitfragen

Die Datenerhebung der Anforderungen für die Stakeholder wurde mittels Experteninterviews durchgeführt. Eine gemeinsame Prozessbegehung sowie auf die einzelnen Gruppen abgestimmte Leitfragen dienten dazu, funktionale und nicht-funktionale Anforderungen zu erforschen. Der Fragebogen gliederte sich in fünf Hauptbestandteile. Nach Aufnahme der allgemeinen Daten und einer Selbsteinschätzung zur Digitalisierung im Bereich Abwicklung und Kontrolle von Bohr- und Injektionsarbeiten wurde eine virtuelle Prozessbegehung des Dokumentations- und Analyseprozesses an aktuellen Projekten durchgeführt. Dabei erörterte der Experte die periodischen (täglichen, wöchentlichen, monatlichen) Organisations-, Dokumentations- und Analyseprozesse im Zusammenhang mit Bohr- und Injektionsdaten. In der Prozessdeklaration wurden Startereignisse, Teilprozesse, der Output sowie Folgeprozesse identifiziert. Verwendete IT-Systeme, In- und Output in Form von Datensätzen, Protokollen und Auswertungen wurden gemeinsam mit dem Experten in einem weiteren Schritt zusammengefasst. Diese Begehung diente vor allem der Darstellung der Prozessmodelle in Kapitel 5 ab Seite 97. Sofern der Befragte an keinem Projekt beteiligt war, entfiel dieser Punkt.

Vor Durchführung des eigentlichen Interviews unterfertigten die Teilnehmer eine Vertraulichkeitserklärung, die gewährleistete, dass eine Tonaufnahme während der Befragung erfolgen konnte. In der Erklärung wurde festgehalten, dass die Daten zur weiteren Verwendung anonymisiert dargestellt werden. Die Experten wurden nach deren praktischer Erfahrung, wissenschaftlicher Expertise, Veröffentlichungen sowie Normungstätigkeiten ausgewählt und in die Gruppe Bauherren, Planung und Überwachung, Entwicklung und Bauunternehmen eingeteilt. Die Analyse umfasst 22 aufgezeichnete Fachexperteninterviews, die im Zeitraum vom 8. März 2017 bis 30. Juli 2018 durchgeführt wurden. Die Dauer der Interviews konnten in einem zeitlichen Rahmen von 1,5 bis 2 Stunden gehalten werden. Der Autor selbst oder zwei Diplomanden des Forschungsbereichs Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik führten



**Abb. 6.6:** Fachexperteninterviews nach Kategorien

diese durch. Die Leitfragen des Interviews gliederten sich in die Teile für funktionale und nicht-funktionale Anforderungen. Die Leitfragen zu den funktionalen Anforderungen umfassten die Themen Datenaufnahme, Datenhaltung, Funktionalität, Maschinensteuerung, Weiterverwendung von Daten, Qualitätskontrolle und Materialmanagement. In den Leitfragen zu den nicht-funktionalen Anforderungen wurde darauf eingegangen, wie ein optimiertes Wissensmanagement in der Ausführung funktionieren muss. Dabei standen die Themen Zuverlässigkeit, Handhabung, Transparenz und Entwicklungspotential im Mittelpunkt. Ein exemplarisches Dokument kann im Anhang A ab Seite 281 eingesehen werden.

Die Aufteilung an Fachgesprächen und die Selbsteinschätzung der Experten auf die Frage: „Wie stehen Sie digitalen Neuerungen im Bereich der Abwicklung und Kontrolle von Bohr- und Injektionsarbeiten gegenüber?“ wird in Abb. 6.6 dargestellt. Die Selbsteinschätzung ist als Median einer Expertengruppe abgebildet und reicht auf einer fünfteiligen Ordinalskala von negativ<sup>54</sup> bis positiv. Dabei bestätigte sich der Trend, wie bereits in den zitierten Arbeiten aus Abschnitt 4.5 zu sehen, dass Bauunternehmer und Entwicklungsabteilungen digitalen Neuerungen sehr positiv gegenüberstehen und Bauherr, Planung und Überwachung eher eine neutralere, abwartende Einstellung vertreten. Da in den Gesprächen Anforderungen für den optimierten Prozess mittels digitaler Technologie gefunden werden sollten, war es wichtig, dass die Experten den Entwicklungen kritisch gegenüberstanden, jedoch selbstständig Optimierungsmöglichkeiten einbringen wollten.

Mit Hilfe der Aufnahmen wurden die Interviews wortgetreu transkribiert und jede Zeile des Dokumentes mit einem Link, bestehend aus den Initialen und einer Zählvariablen, gekennzeichnet. Das Transkript bildete die Grundlage für ein zweistufiges Kategorisierungsverfahren.

<sup>54</sup>Negativ entspricht der Note 1, eher negativ Note 2, neutral Note 3, eher positiv Note 4, positiv Note 5.

In einem ersten Schritt wurden relevante Textteile je Zeile markiert und wortwörtlich in den Analyseprozess aufgenommen [20, S. 50]. In einem zweiten Durchgang bildete der Autor Schlagwörter aus diesen Exzerpten, die für Beispiele von Anforderungen, Problemen und Prozessen standen, und ordnete die Textteile nach der Beschreibung einem Soll- oder Ist-Zustand, einem Datenverarbeitungsschritt und, sofern möglich, einer Anforderung zu. Eine beispielhafte Zuordnung von Anforderungen für neue Systeme kann der Tabelle 6.4 entnommen werden.

Die beschriebenen Soll-Prozesse wurden je nach Abstraktionsebene in sechs unterschiedliche Kategorien eingeteilt. Für die Erleichterung der Zuteilung wurden die einzelnen Bereiche mit Fragen versehen.

- **Rahmenbedingungen:** Was sind allgemeine Vorgaben für das System im Zusammenhang mit dem Projekt?
- **Ziele und Risiken:** Was kann mit dem neuen System erreicht werden? Welche Risiken und Schwachstellen kann es im Prozess geben?
- **Fachliche Prozesse:** Wie soll die Welt der Interessensvertreter rund um das neue System aussehen?
- **Systemkontext:** Wie können die Akteure und Fremdsysteme in den Prozess miteinbezogen werden?
- **Anwendungsfall:** Was soll das System konkret tun? Welche Anwendungsfälle wie Eingaben, Funktionen, Ausgaben sollen ermöglicht werden?
- **Qualitätsanforderung:** Wie soll das System die gestellten Aufgaben erfüllen? Welche Vorgaben müssen im Betrieb erfüllt werden?

Es zeigte sich, dass die Interviewpartner insbesondere auf die Anwendungsfälle und den Systemkontext fokussierten. Über 56 % der Nennungen konnten diesen zwei Kategorien zugeordnet werden, wobei rund 34 % der Schlagwörter den Anwendungsfällen zufließen.

### 6.3.2 Anforderungen des Bauherren

Bauherren nehmen in den Fachgesprächen vermehrt auf die Kommunikationsschnittstellen mit der Bauaufsicht Bezug und wünschen sich in Zukunft einen transparenteren Datenaustausch.

**Rahmenbedingungen** Die Auftraggeber fordern, dass die Dateibenennung und die Dateiformate bereits in der Arbeitsvorbereitung festgelegt und während der Ausführung beibehalten

<sup>55</sup>Die Abkürzungen stehen für die Initialen des Fachexperten, die Nummer für die Zeile im Transkript.

Tab. 6.4: Beispiel für Soll-Prozesse aus den Interviewtranskripten

Link	Volltext	Schlagwort	Anforderung
MK 225 <sup>55</sup>	Es gibt manchmal revidierte Protokolle, die nochmal durchkommen, weil irgendwo ein Fehler passiert ist, aber das ist kein Ausfall, sondern es ist etwas nachträglich aufgefallen. Insgesamt ist aber klar, dass jeder seine Rückfallebene haben sollte und gerade der diese Software führt, muss natürlich sicherstellen, dass bei einem solchen Fall wieder alles hergestellt werden kann.	Wiederherstellung der Daten	Anwendungsfall
GS 055	Nach der Einrichtung von Datenmonitoringsystemen läuft man Gefahr, am System festzuhalten, und man wird weniger flexibel auf die Phänomene der Ausführung, dabei sollte die Organisation nach standardisierten Prozessen geleitet werden.	Flexibilität durch Prozessdenken	Systemkontext
PM 040	Das heißt, wir können auch immer wieder reproduzieren, wir geben den Usern auch Restriktionen vor, wie sie die Daten zu verarbeiten haben und das hat dann den großen Vorteil, dass wir nach vielen Jahren großflächige Analysen machen können	Restriktionen schaffen	Qualitätsanforderung
FP 333	Einen großen Vorteil sehe ich auch in der Aufmaßerstellung. Wenn die Daten einfach exportierbar sind und in die Abrechnungsprogramme übertragen werden können, hat man sich sehr viel Tipparbeit erspart. Früher wurde alles eingetippt [...] Diese Schnittstelle von Injektionsdatenmanagement zum Abrechnungsmanagement, wenn die gewährleistet wird.	Schnittstelle Abrechnung	Anwendungsfall



werden. Die Übergabemodalitäten, nämlich das Verschicken zwar digitaler aber „starrer“ Protokolle, beispielsweise im PDF, sind dabei nicht zielführend. Die digitalen Systeme sollen in der Lage sein, große Datenmengen<sup>56</sup>, beispielsweise bei systematische Abdichtungsinjektionen, zu verarbeiten und darzustellen. Gerade bei den heutigen Systemen sehen sich Auftraggeber mit langsamen Plattformen und Programmen konfrontiert. Es muss das Ausführungs-Soll in dem System integriert sein, auch wenn sich dieses abschnittsweise durch neue Erkenntnisse in der Ausführung ändern kann. Für Gegenüberstellungen muss das gesamte Soll durch den Planer in einem zentralen Wissensmanagementsystem für alle Beteiligte ersichtlich sein. Der Auftraggeber hat somit die Möglichkeit, die Daten der Planung mit der Ausführung tagesaktuell zu vergleichen. Sofern auf einer zentralen Webapplikation gearbeitet wird, soll der Login mit bestimmten Zugriffsrechten verknüpft sein. Eine Zugänglichkeit für alle Smart Devices gilt als generelle Rahmenbedingung.

**Ziele und Risiken** Risiken identifizieren die Auftraggeber in systematischen Programmfehlern. Dabei sollen Entwickler den Anwendern die Möglichkeit geben, programmimmanente Fehler durch Plausibilitätschecks ausschließen zu können. Lerneffekte aus den ersten Pilotprojekten müssen in Folgeprojekten sukzessive und systematisch eingearbeitet werden. Daten bilden für den Auftraggeber die Basis für Erfahrung für die Planung und Ausschreibung von Folgeprojekten, deshalb sollten Vergleichsmöglichkeiten von Leistungsparameter von Injektions- und Bohrarbeiten geschaffen werden. Als zentrales Ziel definieren Auftraggeber, Systeme zu schaffen, die Laufzeit und Papier auf der Baustelle einzusparen, Zwischenschritte bis zur Abrechnung abzubauen und helfen, bei großen Datenmengen einen Überblick zu behalten. Routinemäßige Arbeitsschritte in der Auswertung sollten standardisiert und durch neue Programme ermöglicht werden.

**Fachliche Prozesse** In dieser Kategorie bezogen sich die Auftraggeber insbesondere auf die Schnittstelle zur Bauaufsicht, die Kontrollen des Injektionsgutes und der Bohr- und Injektionsparameter in regelmäßigen Abständen durchführt und diese Stichproben systematisch dem Auftraggeber zu Verfügung stellen muss. Dabei soll der Prozess der Anlagenkalibrierung und die täglichen Kontrollen der Mengenzähler in der Datenbank vermerkt werden. Sofern die Planung während des Projektes Nomenklaturen ändert, muss das System flexibel genug sein, diese Revision zu übernehmen. Bei Ausfall der elektronischen Messeinrichtungen oder anderen Störungen in der Datenaufnahme, muss der Unternehmer die Möglichkeit besitzen, fehlende digitale Daten durch die Mitschrift der Pumpenfahrer zu ergänzen.

**Systemkontext** In der Zukunft werden einheitliche System gewünscht, die von allen Interessenvertretern genutzt werden. Die Auswertungen und Übersichten sollen dabei automatisch durch das System zur Verfügung gestellt werden.

<sup>56</sup>Ein Experte gab dabei die Zahl von über 120.000 Injektionspunkten und 60.000 Bohrungen an.

**Anwendungsfall** Der träge Informationsfluss bei unvorhergesehen Problemen bis zum Bauherren führt zu Diskrepanzen bei Entscheidungen. Daher werden Echtzeitbenachrichtigungen gefordert, damit bei Besprechungen alle am aktuellen Informationsstand sind. Durch die unterschiedlichen Systeme auf einer Baustelle werden diverse Datenbanken für Tagesdokumentationen herangezogen. Redundante Dokumentationen müssen verhindert werden. Für technische Prognosen ist die Möglichkeit zur gezielten Suche in alten Projektdaten notwendig. Eine Leistungsübersicht bis zu einem direkten Zugriff zu den Ist-Rohdaten führt zur vollständigen Datentransparenz. Bei der Tagesdokumentation müssen durch das System Querchecks zwischen den Protokollen, Tagesberichten und den Daten der Qualitätssicherung und der Bauaufsicht ermöglicht werden. Bei den Visualisierungen sollte in Zukunft die Geologie hinterlegt sein. Die Systeme müssen in der Lage sein, große Datenmengen auf einmal zu verarbeiten, damit die Ausführungsplanung, alle Anpassungen und die Geologie in einem Modell zusammengefasst werden können. Durch Freigabeoptionen im System kann das Protokollwesen abgelöst werden. Für spezielle Anwendungen wären dabei 3-D Modelle wünschenswert, die größere Bereiche von Injektionsmengen erkennen lassen. Innerhalb der Datenbanken müssen auf jeden Fall Filter eingesetzt werden. Die langfristige Archivierung muss gewährleistet sein, damit bei neuen Injektionsvorhaben auf alte Projekte zurückgegriffen werden kann. Die neuen Expertensysteme sollen routinemäßige Analysen durchführen, die danach durch einen gesteuerten Workflow von Experten abschließend bewertet werden. Dem Datenmanagement muss eine klare Definition eines Prozesses und der damit verbunden Verantwortlichkeiten hinterlegt sein.

**Qualitätsanforderungen** Hinsichtlich der Verschlüsselung und Sicherheit der Daten muss bereits im Bauvertrag vereinbart werden, wer welche Daten in welchem Ausmaß nutzen darf. Das System muss daher in der Lage sein, unterschiedliche Berechtigungen zu vergeben. Die Hilfsmittel zur Eingabe sowie die Eingabemasken in der Webplattform müssen so gestaltet sein, dass sie intuitiv bedient werden können. Dabei steht die Geschwindigkeit der Verarbeitung im Mittelpunkt. Auf die Zuverlässigkeit und die Stabilität der neuen Systeme muss geachtet werden, ein guter Support unterstützt diesen Entwicklungsprozess. Bei der Einrichtung der Systeme steht eine stabile digitale Prozesskette am Beginn im Fokus.

### 6.3.3 Anforderungen der Planung und Bauaufsicht

Injektionsexperten und die Bauaufsicht nehmen besonders auf die Möglichkeiten der Kostenkontrolle in Bauverträge Bezug und konzentrieren sich in ihren Ausführungen auf die Entwicklung von Programmen, die hinsichtlich der Abrechnung verbesserte Genauigkeit und erhöhte Kontrollfunktionen bieten.

**Rahmenbedingungen** Die Fachplaner sprechen davon, dass ein höherer Digitalisierungsgrad insbesondere bei größeren Baustellen von Vorteil ist, da das Verhältnis von Kosten zu Nutzen besser ist. Live-Daten werden von der Bauaufsicht nicht benötigt, da grundsätzlich kein Vertragsverhältnis zwischen Unternehmen und der örtlichen Bauaufsicht besteht, und diese den Bauprozess nicht ändern bzw. anweisen kann. Zu Beginn einer Baustelle sollten alle Daten aufgezeichnet und in einem webbasierten System zusammengefasst werden. Der standortunabhängige Umgang mit den Baudaten ist als Rahmenbedingung zu identifizieren.

**Ziele und Risiken** Als globales Ziel definiert diese Gruppe die Verarbeitung der Daten in kurzer Zeit, die Möglichkeit der Früherkennung von Problemstellen und ein schnelles Reagieren darauf. Dabei sollen die einfache Handhabung, die Übersichtlichkeit der Programme und kurze und intuitive Wege im Mittelpunkt stehen. Die zeitliche Entlastung der Mitarbeiter und erhöhte Transparenz führen zu Qualitätssteigerung. Standortunabhängig, jederzeit auf allen Smart Devices Zugang zu den Baudaten zu haben und unabhängig vom Betriebssystem, jederzeit Einsicht nehmen zu können, sind weitere genannte Ziele. Durch Automatisierung und digitale Dokumentation, darf auf keinen Fall ein Mehraufwand entstehen, zeitliche Einsparungen sollten nach Implementierung eines digitalen Datenmanagements als quantifizierbares Ergebnis ersichtlich sein. Die Möglichkeit einer benutzerbezogenen Information, mittels beispielsweise digitaler Signatur, sollte untersucht werden.

Als Risiko merken die Experten an, dass Wissen durch die Automatisierung der Dokumentation und Analyse verloren gehen und ein Destruktionseffekt eintreten könnte. Außerdem kommt bei der digitalen Erfassung dem operativen Personal eine erhöhte Verantwortung zu, die nur durch qualifizierte Arbeiter übernommen werden kann. Die akkurate Arbeitsweise und eine genaue Erfassung sollen überprüft werden, damit keine Datenverluste bereits am Beginn des Prozesses entstehen. Als Bedingung gilt jedoch, dass normgerechtes Arbeiten weiterhin durch die digitalen Systeme ermöglicht wird. Das Verteilen von Protokollen soll durch die Verknüpfung der Datensets ersetzt werden, die Normen schreiben im aktuellen Stand jedoch weiter vor.

**Fachliche Prozesse** Die Experten geben an, dass ein digitales Datenmanagementsystem die Prozesse einer baubegleitenden Planung, wie bei der neuen österreichischen Tunnelbaumethode, unterstützen muss. Die steigende Transparenz soll dazu führen, dass Probleme auf der Baustelle gelöst werden müssen und Nachträge durch genaue Dokumentation des Ist-Prozesses an Ungenauigkeit verlieren. Gutachter sprechen in diesem Zusammenhang von der Triade zwischen Vertrag, Optimierungen auf der Baustelle und Ertragsmaximierung der Unternehmen.

**Systemkontext** Oftmals ist dem Bauherren die genaue Dokumentation der Spezialtiefbauarbeiten zu Beginn des Bauprojektes nicht klar. Planung und Bauaufsicht versuchen in der Phase der Ausführungsvorbereitung Gesamtauswertungen in einem übergreifenden System zu implementieren, scheitern jedoch oft an fehlenden Vertragsteilen zur Dokumentation. Die Prüffunktion der Bauaufsicht muss weiterhin gegeben sein, indem unabhängige Messungen außerhalb des Systems die Genauigkeiten und Toleranzen bestätigen. Die Algorithmen der Datenverarbeitung müssen daher für die Bauaufsicht in einer externen Dokumentation aufbereitet werden.

**Anwendungsfall** Die Experten geben an, dass für eine bessere Analyse, die Aufzeichnung des Pumpendrucks im Bohrloch noch weitere 20 Sekunden gemessen werden soll. In den am Markt befindliche Steuerung müssen weitere Abbruchkriterien integriert werden. Die geplanten Injektionspunkte den örtlichen Stellen richtig zuzuordnen ist bei systematischen Injektionen schwierig, weshalb eine vorgefertigte Arbeitsanweisung im digitalen System helfen muss, die Fehler in diesem Prozess zu vermeiden. Beim Bohren sollte die Energieaufzeichnung integriert werden. Die Reihenfolge der Arbeiten muss durch das System analysiert werden und eventuelle Kommentare und Bewertungen müssen dazu für alle Projektbeteiligten sichtbar sein. Die größten Fehler in der Speicherung passieren bei der Datenübertragung von den Steuerungseinheiten in die digital Datenbank. Die Übertragung sollte automatisch passieren oder durch Algorithmen überprüft werden, sodass keine doppelten Datensätze vorhanden sind. Sofern Lage- und Richtungsgenauigkeit bei der Bohrung gefordert werden, sollten diese im System integrierbar sein. Die Eignungsprüfungen der Materialien müssen auf der Baustelle verknüpft werden. Die Freigabeprozesse digitaler Daten, die einer Abgabe gleichkommen, müssen durch eine integrierte Funktionalität verifiziert sein. Digitale Signaturen gewährleisten, dass der jeweilige Verantwortungsträger selbst die Daten freigegeben hat.

In der Analyse und Visualisierung sehen die Experten eine Vielzahl von Anwendungsfällen. Die zusätzliche Kommentarfunktion ist in jedem Schritt der Datenverarbeitung wichtig und muss berücksichtigt werden. Der Fokus der Entwicklungen ist auf die Visualisierungen zu legen, da die Verläufe der Herstellungsdaten bereits gut digitalisiert vorliegen. Dabei ist immer von einer Gesamtübersicht des Baufeldes auszugehen. Die Interaktionen mit dem Baugrund müssen tagtäglich überprüft werden, weshalb die Daten dafür im System verlinkt werden sollten. Die geologischen Aufschlüssen sollen in Verbindung mit den Herstellungsdaten gebracht werden. Der ständige Vergleich zwischen Ist- und Solldaten ist anzustreben. Die Verbräuche müssen in Übersichten mit den planlichen Darstellungen verknüpft werden. Dazu eignen sich unterschiedliche Sättigungen einer Farbe oder verschiedene Farbtöne. In der Entwicklung ist der wichtigste Schritt, die Daten des Geräteprotokolls mit einem Lageplan zu verknüpfen. Dabei ist die zeitliche und örtliche Herstellungsreihenfolge darzustellen, damit der Bauprozess nachvollzogen werden kann. Auf dieser Grundlage können Auffälligkeitsbereiche definiert werden. Die Visualisierungen sollen mit Filtern belegt werden können. Damit können Gutachter standardisierte Auswertungen visualisieren und miteinander kombinie-

ren. Eine weitere Anforderung stellt die Berechnung von Leistungsdaten von Maschinen dar, die zu Aufwandswerten kombiniert werden können. Die Leistungsparameter dienen der zukünftigen Planung des Bauablaufs, den Leistungsvergleichen unterschiedlicher Baustellen und der Rückführung zur Kalkulation. Damit können Risiken und Kostenentwicklungen abgeschätzt werden. Die Visualisierung großer Infrastrukturprojekte muss für die konkrete Bewertung in Längs- und Querschnitte vereinfacht werden, da sonst die Übersichtlichkeit verloren geht. Durch Definition einzelner Leistungsgruppen in einem Bauteil können übergeordnete Abschnitte verglichen werden. Die statistische Auswertung der Kriterien, die einen Injektionserfolg beschreiben, müssen in der Analyse integriert werden. Als weiterer Anwendungsfall gilt, dass beim Einsatz von mehreren Arbeitspartien diese vergleichend analysiert werden, damit der beste Ausführungsprozess identifiziert werden kann. Im Anschluss lernen die leistungsschwächeren Schichten davon. Dieser Prozess ermöglicht eine kontinuierliche Selbstverbesserung.

**Qualitätsanforderungen** Im Betrieb lassen sich die neuen Systeme nur integrieren, sofern die Auftraggeber bei Pilotprojekten von den Vorteilen digitaler Systeme überzeugt werden. Dabei muss die intuitive Benutzbarkeit gegeben sein und Datenverluste müssen bei Übertragungen ausgeschlossen werden. Die einzelnen Prozessschritte in der Datenaufarbeitung müssen verständlich aufbereitet und in übersichtliche Einzelschritte aufgeteilt werden. Die Sorgfalt und Systematik der Datenaufbereitung ist essenziell für die anschließenden Prüfungen.

#### 6.3.4 Anforderungen der Entwicklung

Entwickler fokussieren sich in den Interviews auf technische Aspekte und Problemstellungen in der Integration neuer Systeme.

**Rahmenbedingungen** Die Entwickler der digitalen Datenmanagementsysteme sind von der Bereitschaft zur Zusammenarbeit der Baugeräte- und Steuerungshersteller und übergeordneten Plattformen abhängig, da sich in der Baubranche noch kein einheitlicher Datenstandard für Geräte- und Produktionsdaten ergeben hat.

**Ziele und Risiken** Als globales Ziel der Entwicklung wird die restriktive Vorgabe, wie Daten abgelegt und bearbeitet werden, angestrebt. Erst durch diese können standardisierte Auswertungen ermöglicht werden. Das System soll ein transparentes Arbeiten in den Organisationen ermöglichen, die Detailinformationen zum Herstellungsprozess dürfen nicht bei Polieren und Bauleitern zurückbleiben. Durch Tagging von größeren Datensätzen werden baustellenübergreifende Analysen ermöglicht. Dadurch werden Wissensverluste bei Spezialtiefbauverfahren beim Austritt einer Fachkraft vermieden. Entwickler streben des weiteren eine standardisierte

Ausschreibung für digitale Datenmanagementsysteme im Bauvertrag an, da Bauunternehmen sonst diese nicht freiwillig integrieren und Daten nicht lückenlos übergeben. Es müssen in den zukünftigen Leistungsverzeichnissen die Funktionalität, Modernität und Systemsicherheit beschrieben werden, um eine Vergleichbarkeit im Vergabeprozess zu erzielen.

**Fachliche Prozesse** Webplattformen für digitales Datenmanagement verstehen sich als Filteroption von Baustellendaten für den späteren BIM-Prozess. Nicht alle Daten, die in der Ausführung entstehen, müssen im Lebenszyklus der Baudaten erhalten bleiben. Daher sind die Schnittstellen zu BIM-Modellen und ERP-Lösungen im Bauwesen für die übergeordneten Prozesse speziell zu definieren.

**Systemkontext** Die Einbeziehung der Hersteller von Steuerungen und Datenerfassungseinheiten in den Entwicklungsprozess ist für die Interaktion zwischen Datenanalyse und Ausführung notwendig. Weiters müssen die fehlenden Schnittstellen zu den Baumaschinen einbezogen werden, damit die Betriebsstunden der Kontrollunits mit den Leistungsdaten abgeglichen und Produktivitäten von Anlagen errechnet werden können. Die Gerätehersteller müssen die Spezifikationen der Schnittstellen zur Verfügung stellen, damit sich unabhängige Plattformen etablieren können. Die Hersteller unterbinden jedoch diese Möglichkeit, da eigene Plattformen forciert werden. Externe Entwickler, die von keinem Interessensvertreter auf der Baustelle abhängig sind, gewährleisten eine vorurteilsfreie und neutrale Sicht der Zusammenarbeit an einem zentralen Ablagesystem. Im Prozess der stetigen Weiterentwicklung werden die Softwarestacks für moderne Programme ständig upgedatet. Die digitalen Datenmanagementsysteme müssen diese Updates laufend durchführen können, damit Datensicherheit für den zertifizierten Zugriff am modernsten Stand gewährleistet ist. Datenablagen mit Mail-Anhängen sowie externe Speichermedien müssen durch das neue System unterbunden werden.

**Anwendungsfall** Der Datenupload von den lokalen Datenbanken der Steuerungseinheiten sollte mit externer Schnittstelle via kabelloser Verbindung wie Wifi erfolgen. Bei älteren Steuerungen, die nicht mit einem Uploadmodul nachgerüstet werden können, ist ein Datenübertrag per „Drag & Drop“<sup>57</sup>, mittels externem Speichermedium integrierbar. Die Rohdaten müssen durch einen Algorithmus geprüft sein, damit Datenredundanzen auszuschließen sind. Auf Grundlage definierter Kriterien wird dabei überprüft, ob die Daten richtig und integer sind. Die Integritätsabfrage umfasst, ob die Daten vollständig und korrekt übertragen sind, und ob keine Duplikate vorliegen.

Die Mitverfolgung der Maschinenprozesse in Kombination mit manueller Dokumentationen ermöglicht eine Abbildung des Ist-Geschehens auf der Baustelle in unterschiedlichen Prozess-

<sup>57</sup>Ziehen und Fallenlassen als Bedienfunktion in grafischen Oberflächen [39].

gruppen. Ein Feature zur Materialkontrolle, in denen die Lieferscheine eingegeben werden können, ermöglicht einen Überblick über Schwund und Lagerstand. Die Massenerfassung und die direkte Zuordnung zu den Abrechnungspositionen könnten mit einer geeigneten Schnittstelle zu ERP-Systemen erfolgen. Die Visualisierung kann beispielsweise interaktiv auf einem Geoinformationssystem (GIS) und Data-Driven Documents (D3)-Visualisierung aufbauen. Eine Visualisierung in mehreren Detailebenen verschafft Überblick und richtet den Blick auf die benötigten Bereiche. Darüber hinaus sind Widgets<sup>58</sup> mit KPIs pro Baustelle zu bilden, die Leistungskennzahlen darstellen, damit das Baustellenpersonal Optimierungen durchführen kann. Über den zeitlichen Verlauf der Produktivitätskennzahlen können Optimierungen hinsichtlich der Produktivität quantifiziert werden. Eine direkte Übergabe der Arbeitsanweisungen an die Injektions- und Bohrsteuerung wäre möglich. Die Merkmalsabfrage in der Datenbank muss integriert werden. Diese soll benutzerangepasst mehrere Kriterien und Kombinationen von Merkmalen gemeinsam abfragen können. Die Qualitätssicherung von Materialien und Personalregistrierung oder die Bewegung der Maschinen sind weitere Datenquellen, die im Datenmanagement weiter erfasst werden könnten.

**Qualitätsanforderungen** Das Programm sollte so aufgebaut sein, dass benutzer- und baustellenabhängige Änderungen schnell integriert werden können. Sofern eine Webplattform entwickelt wird, sollte diese im „responsive Design“<sup>59</sup> programmiert werden, dass die Handhabung auf der Baustelle auf Smart Devices oder auf Computern im Baubüro in gleicher Weise funktioniert.

### 6.3.5 Anforderungen der Bauunternehmen

Bauunternehmen konzentrieren sich in den Gesprächen insbesondere auf die funktionalen Anforderungen. Durch ihre Erfahrung in der Datenverarbeitung auf Baustellen kennen Ingenieure die Problemstellungen aus der Praxis und brachten eine Vielzahl von guten Ideen ein.

**Rahmenbedingungen** Für Bauunternehmen müssen neue Datenmanagementsysteme ausschließlich mittels cloud-basierter Speicherung funktionieren. Insbesondere gilt es, eine standardisierte Nomenklatur für die Datensätze und ein Format für die Archivierung alter Projekte festzulegen, damit in Zukunft der Zugriff weiterhin einwandfrei funktionieren kann. Bauunternehmen sprachen davon, dass eingesetzte Technologien für den Baustellenalltag und auf exponierten Baustellen störungsfrei arbeiten müssen.

<sup>58</sup>Ist ein Kunstwort, dass sich aus Window und Gadget zusammensetzt und ein Interaktionselement in einem Fenster darstellt [39].

<sup>59</sup>Diese Art des Webdesigns ist so flexibel gestaltet, sodass es in Abhängigkeit vom Endgerät die Information angepasst darstellt und unterschiedliche Eingabemethoden erlaubt.

In den Entwicklungsteams sollten auf jeden Fall Personen integriert werden, die selbst Erfahrung mit dem System und den miteinbezogenen Bauverfahren haben. Für den Einsatz digitaler Datenmanagementsysteme, die von allen Beteiligten auf der Baustelle genutzt werden können, ist es notwendig, eine vertragliche Situation herzustellen, die Transparenz der Daten am Beginn eines Projektes regelt. Neben der Automatisierung und Digitalisierung darf nicht auf die Benutzer vergessen werden, die bei der Entwicklung in jedem Prozess miteinbezogen werden sollten.

**Ziele und Risiken** Als globales Ziel definieren die Bauunternehmen, dass neue Entwicklungen von allen Beteiligten akzeptiert werden. Dazu muss eine Vielzahl an Überzeugungsarbeit geleistet werden. In der Injektionstechnik sprechen Unternehmen oft von Vertrauen gegenüber dem AG, das durch die Standardisierung der digitalisierten Prozesse und auf Grundlage von Daten aufgebaut wird. Die Arbeitserleichterung, frühzeitige Erkennungen von bauwirtschaftlichen Misserfolgen und die, durch die Digitalisierung möglichen, neuen Abrechnungsformen werden als größte Ziele definiert. Der geänderte oder gestörte Bauablauf kann durch ein strukturiertes Prozessmanagement nachgewiesen werden. Außerdem soll das digitale Datenmanagement das Änderungsmanagement auf der Baustelle unterstützen. Dies gelingt über die einfache Verständlichkeit und Interpretation der großen Datenpakete. Bauunternehmen schätzen eine Reduktion auf ein Drittel der benötigten Dokumentationszeit, sofern sich zentrale Programme in der Injektionstechnik etablieren. Eine digitale Abnahme der Dokumentation nach einem Bauabschnitt muss in Zukunft die gedruckte Dokumentation ersetzen. Sofern die Systeme für ein Baugewerk angewendet werden können, ist es wünschenswert, mehrere Tiefbaugewerke zu integrieren.

Die Archivierungsmöglichkeiten der digitalen Daten über 20 Jahre hinweg identifizieren Bauunternehmer weiterhin als Risiko, da man dazu noch keine Erfahrungen hat. Statistisch hinterlegte Leistungswerte, die aus Datenmanagementsystemen gewonnen werden können, würden das Kalkulationsrisiko für neue Projekte reduzieren.

**Fachliche Prozesse** Datenmanagement ist wichtig, damit täglich die neuen Anweisungen der Planung kontrolliert werden können. Der Datenübertrag ist mit Fehlern besetzt, die durch das Programm behindert werden sollen. Materialmanagement, Qualitätsmanagement und die Kontrolle der Abbruchkriterien sind die drei wichtigsten Säulen des Datenmanagements in der Injektionstechnik. Der Unternehmer ist verpflichtet, jede Injektionspasse nachzuweisen. Dabei müssen die Daten täglich visualisiert und mit der Bauaufsicht kommuniziert werden. Das Materialmanagement erfasst die Abrechnungsmengen, die durch die Injektionsmengen gespeichert sind. Darüber hinaus müssen Chargen und Kanisterzählungen ausgewertet werden, damit der Schwund ermittelt werden kann. Plausibilitätsprüfungen für alle Interessensvertreter sollen durch die Systeme begünstigt werden. Nach Projektabschluss werden für die Endberichte die Abschnitte in baubetriebliche und geotechnische Abschnitte zusammenge-



fasst, um abschließende Bewertungen durchzuführen. Nach den Bauprojekten möchten die Bauunternehmen die Daten für den Einsatz in Schulungen weiterverwenden.

**Systemkontext** Die fehlende Beschreibung der technischen Anforderungen in den Normen an das digitale Datenmanagement stellt die Unternehmer vor Herausforderungen in der Angebotsphase. Einheitliche Datenformate und definierte Schnittstellen fehlen noch, um eine geordnete Übergabe in unterschiedliche Systeme zu ermöglichen. Beispielsweise ist den Unternehmen nicht bewusst, welche Herstellungsdaten in ein BIM-Modell übergeführt werden. Die Bringschuld der Datensendung vom Unternehmer kann in zentralen Systemen aufgehoben werden, sofern die Interessensvertreter in zentralen Datenplattformen Informationen beziehen können. Dabei sollte geregelt werden, wer welche Daten einsehen kann. Diese Rechte sollten vertraglich festgelegt werden. Die unterschiedlichen Akteure benötigen die Daten für ihre eigenen Auswertungen.

Qualitätssicherungsdaten sollten mit den Ausführungsdaten verknüpft werden. Die Datenbanken werden jedoch zur Zeit parallel geführt. In digitalen Systemen muss weiterhin gewährleistet sein, dass Rechtssicherheit besteht und die Verantwortlichen die Datenpakete selbst freigeben. In diesem Zusammenhang wird die Notwendigkeit einer digitalen Signatur angesprochen. Die Vermessungsdaten werden zur Zeit ebenfalls parallel geführt. Insbesondere für die Visualisierung spezieller Injektionsarbeiten würde sich hier ein Mehrwert ergeben, wenn diese Daten in das System integriert werden könnten. Für den Bauleiter stellen die vordefinierten Leistungswerte der Kalkulation die wichtigsten Parameter dar, die in der Ausführung zu erreichen sind.

**Anwendungsfall** Die Aufnahme und Zusammenführung von Information zum Material und zur Qualitätssicherung sollten im Datenmanagement vermehrt berücksichtigt werden. Dazu zählen die Produktdatenblätter, Eignungs- und Konformitätsprüfungen und ein strukturiertes Lieferscheinmanagement.

Bauunternehmer sprechen vermehrt an, dass weitere Daten zur Geologie für eine genauere Analyse der Leistungswerte einbezogen werden sollten. Die Überführung der planbasierten Tagesvorgaben auf das Bohr- und Injektionsgerät sollte in Zukunft durch das digitale Datenmanagement möglich werden. Darüber hinaus wünschen sich die Bauunternehmer, dass Daten nicht nur gesammelt werden, sondern die Managementsysteme einen Leitfaden enthalten, wie die Arbeiten zu dokumentieren sind. Intelligente Bestelloptionen, aufbauend auf den Materialverbrauchsprognosen, können vom System zur Verfügung gestellt werden, um somit die Lieferlogistik auf der Baustelle zu verbessern. Die Systeme müssen mit Exportfunktionen ausgestattet werden, damit die Daten archiviert werden können und für einen langjährigen Zugriff zur Verfügung stehen. Weitere Baustellendokumentationen, wie Bilder oder Videos des Baustellenfortschritts, sollten ebenfalls in Kommentarfunktionen integrierbar sein. Der Bauta-

gesbericht kann nach Angabe der Bauleitung aus den Daten der Ausführung teilautomatisiert generiert werden.

Der Abrechnungsvorgang muss durch prüfbare Summen weiterhin so dargestellt werden, dass dieser durch die Bauaufsicht nachverfolgt werden kann. Die Prozesszeiten des Umsetzens von Punkt zu Punkt sind ein maßgebender Produktionsfaktor, der analysiert werden muss. Die Injektionsverläufe von Passen müssen manuell überprüft und durch das System transparent dargestellt werden. Die Arbeitsanweisungen für den nächsten Tag müssen durch neue Systeme digitalisiert werden, um Handzettel zu verhindern. Dabei sollten die technischen Spezifikationen im Managementsystem hinterlegt werden. Bei einem digitalen Qualitätsmanagement sollten die Prüfhandbücher und die vereinbarten Prüfintervalle ebenfalls im Datenmanagementsystem integriert werden.

Bezugnehmend auf die Visualisierung nennen die Spezialtiefbauunternehmer eine Vielzahl von Verbesserungen und neuen Anforderungen. Grundsätzlich sprechen sich die meisten Befragten gegen dreidimensionale und für spezifische zweidimensionale Visualisierungen aus. Dabei sollen aufbauend auf einem Übersichtsplan, Verknüpfungen zu weiteren Ebenen geschaffen werden. Eine Navigation von der Projektübersicht in drei bis vier Abstraktionsebenen bis zum Detailschnitt wäre eine Möglichkeit der Darstellung. Die übergeordneten Ebenen binden in den Visualisierungen die Ergebnisse der Detailebenen ein. Somit kann der Blick auf wesentliche Parameter und deren abschnittswise Änderungen schneller gelegt werden. Die Visualisierung sollte grundsätzlich in Baustellen mit linienförmiger Ausdehnung oder fixe Baustellenflächen eingeteilt werden. Die Überblicke können jeweils mit einem Status belegt werden, der durch farbliche Codierung den Prüfprozess auf diskussionswürdige Stellen fokussiert. Neben der Visualisierung der Herstellungsdaten müssen die Bauprozesse einzelner Anlagen dargestellt und in Rückkoppelung mit standardisierten Prozessdiagrammen verständlich gemacht werden. Auswertungsfunktionen zu Manschetteneinbau, Packersetzen, Stillständen und Gerätereperaturen helfen, die Bauzeit zu optimieren und Gründe für Verzögerungen herauszufinden. Aufbauend auf dem Prozessmanagement kann ein Forcieren des Zeitplans vorgenommen werden. Optimierungen der Wartungsschichten können durch die Analyse der zeitabhängigen Leistungen besser eingetaktet werden.

Die Analyse sollte bei der Kontrolle der Rohdaten vordefinierte Warnfunktionen anwenden, die einzelne Datensets mit Parametern, wie vorgeschriebenen Drücken und Raten, vergleichen. In den weiterführenden Analysen sollten die Ist-Stände der Mengen, Bauprozesse und Bauzeiten berechnet werden und durch Reihenanalysen Prognosen erstellt werden können. Die Leistungsparameter dienen als Vergleich mit den im Bauvertrag angenommenen Ansätzen und sind für die Bauleitung eine Kennzahl für einen stabilen Baubetrieb. Kommen in einem Baufeld mehrere Anlagen und Pumpen zum Einsatz, so soll das Managementsystem Gleichzeitigkeitsfaktoren pro Anlage für die Pumpen ermitteln. Diese Faktoren gehen in eine weiterführende Bauzeitprognose ein. Durch Vergleich mit dem Bauzeitplan kann bereits frühzeitig die Wahrscheinlichkeit des Einhaltens prognostiziert werden. Gelingt es, die

Mannschaften mit der Leistung in Verbindung zu bringen, so können optimale Mannschaftsbelegungen für einzelne Bauprozesse gefunden werden. Die Integration der Leistungspositionen des Vertrags in das System gibt dem Bauleiter die Möglichkeit, bereits vor dem punktuellen monatlichen Abrechnungsprozess Entwicklungen des Bauerfolges zu optimieren.

Abfragen der Geschäftsführung, öffentliche Berichte, Prognosen und Abschätzungen sollen durch das System automatisch generiert werden. Dafür bieten sich Dashboards<sup>60</sup> an, die Parameter fokussiert darstellen.

**Qualitätsanforderungen** Bauunternehmen fordern eine leichte Zugänglichkeit zu Webplattformen. Diese müssen mit den Regeln des Datenschutzes des Unternehmens konform gehen. Internationale Firmen fordern die multilinguale Entwicklung der Systeme, damit diese länderübergreifend angewendet werden können. Die Systemnavigation soll intuitive durch geeignete Benutzerschnittstellen erfolgen können, die innerhalb des Entwicklungsprozesses vom operativen Personal getestet werden. Die Transparenz der Daten inkludiert nach Auffassung vieler Bauunternehmer auch die Nachvollziehbarkeit der Änderungen in der Datenbank.

Ein an die Baustelle angepasster Support ist für die Akzeptanz der Datenmanagementsysteme von besonderer Wichtigkeit, einerseits um das Produkt selbst ständig zu verbessern, und andererseits um die Ausfälle auf der Baustelle möglichst gering zu halten. Eine weitere Qualitätsanforderung der Bauunternehmen ist, dass durch geeignete Sicherheitszertifikate gewährleistet ist, dass nur das Unternehmen selbst und der Auftraggeber die Daten lückenlos erhalten. Intuitive zu bedienende Datenmanagementsysteme zeichnen sich durch eine kurze Einschulungszeit aus. Es muss insbesondere ältere Mitarbeiter berücksichtigt werden, damit die Akzeptanz auf der Baustelle steigt. Die schnellen Antwortzeiten sind bei der täglichen Arbeit mit digitalen Systemen von besonderer Wichtigkeit. Externe Softwareprodukte müssen weiterhin mit den Konzernrichtlinien übereinstimmen.

## 6.4 Selektion der Gesamtanforderungen

Aus den standardisierten und den projektspezifischen Anforderungen aus Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3 ergeben sich die aus einer ganzheitlichen Sicht erforderlichen Gesamtanforderungen an digitale Datenmanagementsysteme in der Injektionstechnik. Die Einteilung erfolgte entsprechend den Typen nach Abschnitt 6.1.2 in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen. Bei der Bildung der Gesamtanforderungen wurden alle Nennungen in gleicher Weise betrachtet und nicht nach Stakeholdergruppen unterschieden. Eine Wertigkeit der einzelnen Begriffe kann aus den gebildeten Tabellen nicht abgeleitet werden.

<sup>60</sup>Entspricht einer Übersichtsanzeige, die Parameter abbildet und deren zeitliche Entwicklungen darstellt [39].

### 6.4.1 Funktionale Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen werden in Eingabe, Funktionalitäten und Ausgabe klassifiziert. Die Gruppe Eingabe, die in Tabelle 6.5 dargestellt ist, berücksichtigt, welche Daten in eine Datenmanagement-Plattform einbezogen werden sollen.

**Tab. 6.5:** Anforderungen an die Eingabe

<b>Eingabe</b>	
Planung	Bohrlöcher und Tiefenstufen der Injektionspassen, Mengen, Volumen, Abbruchkriterien, Reihenfolge
Geologie	Bodenprofile, geologische Abschnitte
Injizieren	Injektionsdruck, Durchflussrate, Abbruchkriterien, Entlüftungszeit, GIN-Wert, Druckabfall, Kommentierung, Zeitstempel
Bohren	Bohrfortschritt, Spüldruck, Spülrate, reflektierte Energie, Drehzahl, Drehmoment, Andruckkraft, Bohrlochtiefe, Bohransprache, Kommentierung
Vermessung	Lage, Richtung und Abweichung der Bohrung, Verformung, Hebung, Wasserpegel
Prüfungen	Wasserabpressversuche, Dichtheitsprüfungen
Spezifikationen	Dokumentationsreihenfolge, Prüfpläne, Abgabezyklen
Kalkulation	Leistungspositionen, Aufwandswerte
Personal	Arbeitszeit, Schichtbelegung, Verantwortliche
Material	Materialdatenbank mit Produktdatenblättern, Lieferscheine, Chargen und Kanisterzählung, Konformitäts- und Güteprüfungen
Gerät	Anzahl, Pumpen je Anlage, Gerätebewegungen, Leistungsdaten der Kontrollunits
Toleranz	Sensorprüfung und Qualitätsprüfung
Zusätzliche Dokumentation	Bild- und Tonaufnahmen

Die Funktionalitäten, die in Tabelle 6.6 in weitere Untergruppen unterteilt sind, beschreiben die Anforderungen, die im System durchgeführt werden sollen. Dabei sind Funktionen für Arbeitsplanung, Datenübertrag, Datenkontrolle, Bauprozess, Visualisierung, Material, Auswertung und Abrechnung innerhalb der Systemgrenzen des Datenmanagements zu berücksichtigen.

**Tab. 6.6:** Anforderungen an die Funktionalitäten

<b>Funktionalitäten</b>	
<b>Arbeitsplanung</b>	
Ressourcenplanung	Festlegung der Leistungsgeräte und der operativen Einsatzkräfte
Identifikation	Nummerierung der Bohrlöcher und Passen nach GUID oder projektspezifisch
Injektionsfestlegung	Überprüfung der Planungsänderungen auf Konsistenz
Arbeitsanweisungen	Planung der Arbeiten und Anweisung mit örtlicher Zuordnung und Reihenfolge der Ausführung an das gewerbliche Personal
Wartungsschichten	Erkennen der optimalen Zeitpunkte für die Wartung
Dokumentation	Hilfen, wie und wann die Arbeiten zu dokumentieren sind
<b>Datenübertrag</b>	
Arbeitsanweisungen	Direkte Überführung der planbasierten Tagesvorgaben auf das Bohr- und Injektionsgerät
Herstellungsdaten	Direkter Übertrag der Herstellungsdaten aus Bohr- und Injektionssteuerung in das Baudatenmanagement, Backupsysteme mit externem Speichermedium
Gerätedaten	Direkter Übertrag der Gerätedaten in das Baudatenmanagement
Sensor	Eingabemasken für Sensor- und Gerätetests
Material	Benutzerschnittstelle für Mischprotokolle und Konformitätsprüfungen
Integritätsprüfung	Prüfung und Ausschluss von Datenredundanzen beim Übertrag
<b>Datenkontrolle</b>	
Vorleistungen	Prüfung der relevanten Datensätze anderer Gewerke

**Tab. 6.6:** (Forts.) Anforderungen an die Funktionalitäten

<b>Funktionalitäten</b>	
Umweltbedingungen	Wasserpegelstände sowie Bewegungen des Baugrunds
Verläufe	Ansicht der Injektions- und Bohrparameter sowie Vermessungsdaten mit Detailansicht und Datentabelle, Berechnung von Parametern wie spezifischer Bohrenergie, q/p-Verhältnis oder Apparent-Lugeon, o. Ä.
Codierung	Farbliche Kennzeichnungen der Datensets im Prüfprozess
Vergleich	Datenvergleich mit den Parametern der Arbeitsanweisung und planlich festgelegten Parametern, Integration von Warnfunktionen
Schlagwörter	Annotationsfunktion von Datensätzen für Analysen
Analysen	Unterstützung der Prüfung durch automatische Prüfung der Datensets, Integration der Sensorprüfung (1 % bei Pumprate, 1–5 % des maximalen Durchflusses, ist mit $\pm 5$ % begrenzt) und der Abbruchkriterien
Anlagen	Überprüfung der Kalibrierung und Einhaltung der Messtoleranzen von Druck- und Durchflussmengenählern
Ausfall	Anlegen fehlender Datensets mit Kommentierung
Kommentar	Kommentierung der Datensets mit Anhang von Bildern oder Videos
Filter	Sortieren und Filtern mit unterschiedlichen Parametern
Freigabe	Sicherstellung des Datenkontroll- und Freigabeprozesses durch autorisierte Personen, Verwendung digitaler Signaturen, Benachrichtigungen über vereinbarten Fristenlauf von Freigaben
Material	Verknüpfung der Eigenschaften des Injektionsgutes während der Verarbeitung und des Einbringens mit den Injektionspassen, Zuordnung der Konformitätsprüfung
Änderungen	Kennzeichnung der Anpassungen von Gerätedaten

**Tab. 6.6:** (Forts.) Anforderungen an die Funktionalitäten

<b>Funktionalitäten</b>	
<b>Bauprozess</b>	
Management	Bauprozessmanagement einzelner Anlagen mit Klassifizierung der Gerätedaten in Prozessgruppen, Rückkoppelung zu standardisierten Prozessdiagrammen, Zusatzeingaben von Prozessen, die nicht durch Gerätedaten abgebildet werden
Produktivität	Einbeziehung von in der Norm verankerten Unterbrechungen bis 15 min
Personal	Errechnen der optimalen Mannschaftsbelegung durch abschnittsweisen Vergleich
Gleichzeitigkeit	Darstellung der Anlagen- und Pumpengleichzeitigkeit
Personaleinsatz	Zuteilung der Personen zu den Bauprozessen
Verbesserung	Erkennen von nicht-wertschöpfenden Prozessen und Integration eines PDCA-Zyklus
Ist-Soll	Abweichungen vom Soll und den definierten Arbeitsanweisungen
<b>Material</b>	
Prüfintervalle	Ermittlung der Prüfroutinen nach zeitlichen und mengenmäßigen Intervallen
Prüfanweisungen	Digitale Prüfanweisungen mit Schritt-für-Schritt Erklärung und visueller Unterstützung der Methoden
Toleranzen	Ermittlung und Festlegung der Toleranzen für Werte der Konformitätsprüfungen, Einhaltung der Mischgenauigkeit
Management	Vergleich zwischen verbrauchter, gemischter und vorgehaltener Menge, Kontrolle der Lieferscheine und des Materialbestandes
Qualität	Verknüpfung von Grundsatz-, Eignungs- und Güteprüfung, Zuordnung der Rückstellprobe
<b>Visualisierung</b>	
Geologie	Hinterlegung von geologischen Aufschlüssen und Modellen

**Tab. 6.6:** (Forts.) Anforderungen an die Funktionalitäten

<b>Funktionalitäten</b>	
Ebenen	Visualisierung ausgehend vom Baufeld mit standardmäßiger Unterscheidung zwischen Infrastruktur und Hochbaubaustellen, spezifische zweidimensionale Visualisierungen mit drei bis vier Abstraktionsebenen zum Detailschnitt, 3-D Darstellungen für spezifische Anwendungen
Filter	Übergeordnete Ebenen mit Zusammenfassungen und Filteroptionen in Form von Heatmaps für Verbrauch, Herstellungsreihenfolge und Ausführungserfolg
Interaktion	Verwendung von Visualisierungen im Zusammenhang mit Geoinformationssystemen und Verknüpfung der Gerätedaten mit der Lage, Zusatzinformation durch interaktive Visualisierung
Änderungen	Darstellung des Ist-Stands und Vergleich der Planänderungen in der Visualisierung
Rückkoppelung	Verknüpfung und Navigationsmöglichkeit von der Visualisierung zu den relevanten Datensets
Analysen	Darstellung lokaler Mehrverbräuche durch Farbsättigungen, Farbtöne für unterschiedliche Injektionsmittel
<b>Auswertung</b>	
Abfragen	Merkmalsabfrage in Datenbank nach Parameter und Annotationen
Erreichungsgrad	Aufteilung der Abbruchkriterien, Arbeitsvorgabe
Bauprozess	Anteil der Prozesszeiten Packersetzen, Manschetteneinbau, Umsetzen, Stillstand, Gerätereparatur o. Ä.
Produktivität	Abfrage von Leistungs- und Aufwandswerten und Vergleich mit Vorgaben der Kalkulation, Abhängigkeit zu Geologie, Schicht (Tag / Nacht), Gerät o. Ä., Reihenanalyse der Kennzahlen
Auslastung	Pumpen- und Anlagen-Gleichzeitigkeiten
Verbrauch	Prognosen des Materialverbrauchs
Bauzeit	Bauzeitprognosen und Berechnung von Forcierungsmaßnahmen (abhängig von Leistungsdaten)



**Tab. 6.6:** (Forts.) Anforderungen an die Funktionalitäten

<b>Funktionalitäten</b>	
Bauwirtschaft	Prognose der Leistungs- und Aufwandswerte, Beurteilung des Bau-erfolges durch Verknüpfung mit den Leistungspositionen des Vertrages, Abschätzung von Risiken und Kostenentwicklungen
Projektvergleich	Vergleich der Kennzahlen mit archivierten Projekten, baustellenüber-greifende Analysen der Datensätze
<b>Abrechnung</b>	
Leistungs- verzeichnis	Integrationsmöglichkeit der Leistungspositionen und automatische Zuordnung
Mengen	Integration der Stoffraumrechnung und Berechnung der Materialien in kg
Betriebszeiten	Integration der Betriebszeiten von Anlagen und Pumpen aus dem Bauprozessmanagement, Abrechnungsmodalität mit Pumpengleich-zeitigkeiten
Verlustzeiten	Auswertung von Stillständen und Umsetzzeiten
Stückzählung	Prozessabhängige Zählung von Abrechnungspositionen (z.B. Packer setzen)
Alternative Modelle	Abrechnungsmodalität nach zeit- und leistungsabhängigen Positionen mit Umlage von zeitabhängigen Leistungspositionen, Aufstellungen zu signifikanten Parameteränderungen
Genauigkeit	Aufmaßfeststellung auf zwei Dezimalstellen runden

Funktionale Anforderungen an die Ausgabe teilen sich in drei Gruppen: Übersichten innerhalb des Systems, Exportfunktionen für übergeordnete Systeme und Berichtoptionen. In Tabelle 6.7 werden die Gruppen weiter spezifiziert. Die Berichtoption wird benötigt, um entsprechend der geltenden Normen den Dokumentationsprozess aufrecht zu halten. Durch die vollumfängliche Entwicklung von Datenmanagementsystemen und gesteigerte Akzeptanz wird diese Gruppe durch digitale Übersichten und geeignete Schnittstellen zu übergeordneten Systemen immer weniger an Bedeutung bekommen.

**Tab. 6.7:** Anforderungen an die Ausgabe

<b>Ausgabe</b>	
<b>Übersichten</b>	
Dashboard	Interessensabhängige Zusammenstellung von Bauprozessen, Leistungsparametern und Qualitätsprüfungen und deren zeitlicher Entwicklung, standartisierte Widgets mit KPIs
Soll-Ist	Vergleich von Leistungsindikatoren mit den Soll-Werten
<b>Exporte</b>	
ERP	Schnittstelle zu ERP-Systeme für Abrechnungspositionen
BIM	Schnittstelle zu BIM-Software für As-built Modell
Bautagesbericht	Übermittlung der Gerätestände, Materialverbräuche, Leistungsfortschritte, Güte- und Funktionsprüfungen sowie Regieleistungen an Bautagesbericht-Software
Ablage	Digitale Archivierungsmöglichkeiten
Abnahme	Digitale Abnahme der Dokumentation
<b>Berichte</b>	
Detailauswertungen	Injektionsprotokolle mit Verläufen und Zusammenfassungen zu verpresster Menge
Schichtbericht	Tägliche bzw. schichtweise Zusammenfassung der Herstellungsdaten und Bauprozesse, geordnet nach Anlage und Pumpe
Monatsberichte	Auflistung der monatlichen Leistungen und Verweis auf die Injektionsprotokolle, statistische Auswertungen der Bauprozesse
Abschlussberichte	Zusammenfassung geotechnischer und baubetrieblicher Abschnitte
Plausibilität	Querchecks zwischen Protokollen, Tagesberichten und Daten der Qualitätssicherung
Signierung	benutzerabhängige Signatur der Berichte

### 6.4.2 Nicht-funktionale Anforderungen

Diese Anforderungen gliedern sich nach Abschnitt 6.1.2 in vier Gruppen und beschreiben, wie und unter welchen Rahmenbedingungen digitales Datenmanagement für Injektionsarbeiten etabliert werden kann. Dabei wird zwischen den Qualitätsattributen der gewünschten Funktionen und den Anforderungen an das Gesamtsystem unterschieden. Dazu kommen Vorgaben für die Durchführung der Systemerstellung und Anforderungen an die Prüfung, Einführung, Betreuung und den Betrieb. Die Zusammenstellung der nicht-funktionalen Anforderungen findet sich in Tabelle 6.8 bis Tabelle 6.11

**Tab. 6.8:** Qualitätsattribute der gewünschten Funktionen

Qualitätsattribute	
Datenspeicherung	Cloud-basierte Datenbank, Verhinderung redundanter Speicherung, Schutzfunktionen vor Datenverlust, Verarbeitung von bis zu 120.000 Injektionspassen
Workflow	Standardisierte Freigabe der Informationen durch hinterlegten Workflow
Zugriff	Standort- und zeitunabhängiger Zugang, Offline-Modus, störungsfreies Arbeiten auf exponierten Baustellen, Verknüpfung der Zugriffsrechte (Ansehen, Herunterladen, Bearbeiten, Datenupload, usw.) mit Login oder Zertifizierung, Unabhängigkeit vom Betriebssystem
Antwortzeiten	Geringe Reaktionszeiten bei Eingaben und Analysen (bei routinemäßig angewendeten Funktionen soll die Reaktionszeit unter zwei Sekunden liegen)
Eingabemasken	Aufgabenbezogene Unterteilung in standardisierte Arbeitsschritte, intuitive Benutzerschnittstellen mit Hilfestellungen und Zusatzinformation, Warnfunktionen, restriktive Vorgabe der Datenablage
Änderungen	Überwachung, Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit der Änderung von Datensätzen
Sprache	Multilinguale Bedienungsmöglichkeit
Signierung	Adäquater Ersatz für Unterzeichnung von Dokumenten und Datensätzen
externe Prüfung	Unabhängige Prüfmöglichkeiten der Zuverlässigkeit von Datenregistrierungen, Dokumentation der eingesetzten Algorithmen

**Tab. 6.8:** (Forts.) Qualitätsattribute der gewünschten Funktionen

<b>Qualitätsattribute</b>	
Aktualität	kontinuierliche Updates der Softwarestacks

**Tab. 6.9:** Anforderungen an das implementierte System im Gesamtkontext

<b>Gesamtkontext</b>	
Handhabung	Intuitives Userinterface, einfache Handhabung, Übersichtlichkeit und Benutzerfreundlichkeit, responsives Design für alle Smart Devices
Schnittstellen	Interaktion mit übergeordnete Systemen wie iTWO, SAP, Revit und untergeordneten Systemen der Gerätehersteller, Definition welche Parameter übergeben werden sollen
Datenstandard	Etablierung eines einheitlichen Datenformates für Geräte- und Produktionsdaten, Übernahme übergeordneter Nomenklaturen, stabile digitale Prozessketten durch Möglichkeit der Revision von Nummerierungen
Sicherheit	Verifizierte Datenverbindung, Sicherheitsmechanismen gegenüber Dritten, kein Versenden von Daten mit e-mails
Dialoggestaltung	Berücksichtigung der Grundsätze der Dialoggestaltung und benutzerzentrierten Entwicklung

**Tab. 6.10:** Vorgaben für die Durchführung der Systemerstellung

<b>Systemerstellung</b>	
Normen und Richtlinien	Übereinstimmung mit Normen und Konzernrichtlinien
Gerätdateien	Freigabe der Spezifikationen der Gerätehersteller erforderlich
Pilotprojekte	Tests in Pilotprojekten, Lessons-Learned-Workshops auf den Baustellen, Vertrauensgewinn des AGs
Agile Entwicklung	Bewertung von Teillösungen, iterative Implementierung der Benutzerfeedbacks
Prozesscontroller	Einbeziehung eines Bauingenieurs als Kommunikationsschnittstelle zwischen IT-Technikern und Baustellenteams

**Tab. 6.11:** Anforderung an Prüfung, Einführung, Betreuung und Betrieb

<b>Prüfung, Einführung, Betreuung und Betrieb</b>	
Nutzungskonzept	Berücksichtigung der Arbeitsaufgaben der Benutzer und die Umgebung in denen sie diese Arbeiten verrichten, Robustheit und Stabilität der Hard- und Software, Flexibilität in der Integration von Änderungen
Support	An die Baustelle angepasster Support, Einsatz verschlüsselter Messenger Dienste, Einsatz von Issue-Tracking-Systemen
Schulung	Kurze Einschulungszeiten, Integration von Hilfestellungen im System, Ausbildung von qualifizierten Arbeitern
Vertrag	Definition von technischen Anforderungen an das Datenmanagementsystem mit Funktionalitäten für die Angebotsphase, vertragliche Festlegung der Zugriffsmöglichkeiten der Interessensvertreter
Arbeitserleichterung	Reduktion der Dokumentationszeit, frühzeitiges Erkennen von bauwirtschaftlichen Misserfolgen
Externe Prüffunktionen	Plausibilitätschecks, externe Prüffunktionen für die Bauaufsicht
Kalkulation	Richtige Annahme der Leistungswerte durch standardisierte Auswertung

Die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen bilden die Grundlage für das digitale Prozessmodell und die darauf aufbauende Entwicklung des Systems eguana SCALES. Für die Datenmanagementsysteme teilen sich die funktionalen Anforderungen in die Gruppen der Eingabe, Funktionalitäten und Ausgaben.

Je mehr Datenquellen ein System verarbeiten kann, desto umfangreicher sind die Funktionalitäten, die durch intelligente Algorithmen in das Managementsystem implementiert werden können. Jede **Eingabe** in das System muss vorzugsweise direkt erfolgen. Bei den Injektions- und Bohrarbeiten müssen prioritär die Planungs- und Herstellungsdaten, Erfolgsprüfungen sowie Daten zum eingesetzten Personal, Material und Gerät zusammengeführt werden. Weitere Eingabeparameter betreffen die Geologie, Spezifikationen, Kalkulation und zusätzliche Dokumentation.

Aus der Inhaltsanalyse der standardisierten und projektspezifischen Anforderungen ergaben sich die **Funktionalitäten** des Datenmanagementsystems, die über Monitoringpflichten wäh-

rend der Ausführung weit hinausgehen. Beginnend bei Funktionen für die *Arbeitsplanung*, ist die Sicherstellung eines stabilen *Datenübertrags* von den Steuerungen und Kontrolleinheiten der Baugeräte zum zentralen System – und wieder zurück – entscheidend. Erst dadurch kann ein digitaler, papierloser Dokumentations- und Ausführungsprozess gewährleistet werden. In der *Datenkontrolle* agiert das Datenmanagementsystem im Sinne des Automatisierungsszenarios prozessverkürzend, indem ein standardisierter Dokumentationsprozess baustellenübergreifend etabliert werden kann. Der Freigabeprozess muss aber weiterhin durch Bautechniker auf der einen Seite und die Bauaufsicht auf der anderen Seite vorgenommen werden. Die Abbildung des ausgeführten täglichen *Bauprozesses*, inklusive Geräte- und Personaleinsatzzeiten, ist bereits im Hinblick auf leistungsorientierte alternative Vertragsmodelle wichtig. Die Notwendigkeit des digitalen Qualitätsmanagements für *Materialien* wird durch die Anforderung der Norm gegeben, welche durch die Verknüpfung der Konformitätsprüfung auf der Baustelle und digitale Prüfanweisungen erfüllt wird. Daraus könnten dynamische Toleranzen und Prüfintervalle für Injektionsmaterialien abgeleitet werden. Die automatischen *Auswertungen* reichen von punktuellen Abfragen von Herstellungsdaten bis hin zu Produktivitäts- und übergeordneten Projektvergleichen. Dynamische *Visualisierungen* unterstützen den gesamten Datenmanagementprozess bis hin zum Aufmaß und zur *Abrechnung* der Bauleistungen. Auf die wichtigsten geforderten Funktionalitäten wird im Kapitel 7 vertiefend eingegangen.

Die Anforderungen der **Ausgabe** gehen mit den Schnittstellen der übergeordneten Systeme im ERP und BIM einher. Dashboards in den Webplattformen digitaler Datenmanagementsysteme müssen die benutzerabhängigen *Übersichten* von Leistungsparametern ermöglichen. Vergleiche der ausgeführten Leistungen mit dem Bau-Soll werden innerhalb des Datenmanagementsystems erstellt. Bauwirtschaftliches Controlling und gewerksübergreifende Vergleiche werden übergeordneten Systemen zugeordnet. Für übergeordnete Systeme müssen daher geeignete *Exporte* zur Verfügung gestellt werden. Die Generierung herkömmlicher *Berichte* muss von den Datenmanagementsystemen solange ermöglicht werden, bis die Standardisierung der digitalen Dokumentationsprozesse erfolgt ist. Die benutzerabhängige Zertifizierung der Berichte durch die Systeme ist zu gewährleisten.

Die Rahmenbedingungen, in denen die Datenmanagementsysteme erstellt werden, sind durch die nicht-funktionalen Anforderungen beschrieben. Sie teilen sich in Qualitätsattribute, Bedingungen aus dem Gesamtkontext, Vorgaben für die Durchführung sowie Anforderungen an Prüfung, Einführung, Betreuung und Betrieb des Systems.

Die **Qualitätsattribute** umfassen die sichere Datenspeicherung und den unabhängigen Zugang zu den Daten. Als wichtige Anforderung ist die Dokumentation der eingesetzten Algorithmen für externe Prüfungen hervorzuheben. Intuitive Handhabung der Userinterfaces und die Etablierung eines einheitlichen Datenformats für Geräte- und Produktionsdaten im Baubetrieb sind **Anforderungen an das implementierte System im Gesamtkontext**. In den Entwicklungsteams muss während der **Durchführung der Systemerstellung** ein Prozesscontroller eingesetzt werden, der als Kommunikationsschnittstelle zwischen IT-Technikern

und Baustellenteams agiert. Die Freigabe von Gerätedaten unterschiedlicher Gerätehersteller ist für die übergeordnete Aggregation in Datenmanagementsystemen unerlässlich. Während der **Einführung, Betreuung, Prüfung** und dem **Betrieb** der neuen Systeme, steht das Nutzungskonzept im Mittelpunkt und muss in jeder Entwicklungsphase berücksichtigt werden. Die Bauverträge müssen die technischen Anforderungen und Zugriffsrechte bereits vor der Bauausführung festlegen. Im Betrieb werden die Reduktion der Dokumentationszeit und die Früherkennung von bauwirtschaftlichen Misserfolgen ermöglicht werden. Dazu dienen unter anderem die in Tabelle 7.4 ab Seite 190 dargestellten Leistungskennzahlen. Abschnitt 8.1.3 auf Seite 230 zeigt Möglichkeiten der Reduktion von Dokumentationszeiten auf.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



# Kapitel 7

## Modellbildung

Der Stellenwert des Baudatenmanagements in der digitalen Prozesskette wird zu Beginn dieses Kapitels verdeutlicht. In der Entwicklung sind dabei zwei unterschiedliche Programmarten zu unterscheiden. Echtzeit-Baudatenmanagementsysteme erhalten die Rohdaten zumeist aus direkten Schnittstellen zu Sensorik und Steuerungen und sind in der Bohr- und Injektionstechnik zu bevorzugen. Das digitale Prozessmodell dieser Systeme zeichnet sich durch fünf Stufen in der digitalen Dokumentation, ein begleitendes Qualitätsmanagement für die Materialprüfungen sowie baubegleitende Visualisierungen aus. In der Produktanalyse in Abschnitt 4.3 wurde erkannt, dass bestehende Datenmonitoringsysteme weiterentwickelt werden müssen, um die Anforderungen an ein digitales Datenmanagement erfüllen zu können.

Aus dieser Notwendigkeit wurde im Zuge des Forschungsprojektes „Automatisches Qualitätsmanagement für die Bau- und Umwelttechnik“ die Webplattform eguana SCALES entwickelt, die das Potential hat, dieses Modell vollständig umzusetzen. Im Unterkapitel eguana SCALES werden die bestehenden Funktionen für das digitale Datenmanagement in der Injektionstechnik ausgeführt.

### 7.1 Baudatenmanagement in der digitalen Datenkette

Der vermehrte Einsatz von Sensorik auf Baustellen, führt zur Generierung großer Datenmengen, die durch Gerätesteuern wie Mischanlagen, Injektions- und Bohrgeräte gespeichert werden. Weitere Dokumentationen in der Ausführungsphase, die durch Beobachtungen des Personals vorgenommen werden, bieten zusätzliche Datenquellen.

Digitale Baudatenmanagementsysteme ermöglichen die geordnete Aufbereitung und Freigabe der Daten für die weitere Verwendung in übergeordneten Systemen. ERP-Systeme, in denen beispielsweise die Bauabrechnung und Kostenkontrolle durchgeführt werden, benötigen dazu die aufbereiteten digitalen Daten. Dreidimensionale Modelle mit hinterlegten

bauteilbezogenen Parametern werden in der Ausführungsphase benutzt, um den Ist-Stand der Ausführungsplanung und der Bauarbeiten festzustellen. Aufbauend auf diesen Modellen und den digitalen Daten der Ausführung kann beispielsweise die automatisierte Abrechnung erfolgen. In Zukunft sollen die Modelle mit dem Baudatenmanagement interagieren, indem aus ihnen die genaue Bezeichnung von Bohrungen und Passen erzeugt und wesentliche Ausführungsparameter nach den Bauarbeiten wieder dem Modell zugeordnet werden können. Die Archivierung der digitalen Daten vereinigt nach Abschluss der Bautätigkeiten die Modelle mit den Baudatenmanagementsystemen.

Die digitale Datenkette in der Ausführung ist in Anlehnung an die Hierarchieebenen der Normung für DIN EN 62264-1: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen – Teil 1: Modelle und Terminologie [26, S. 16–21] gestaltet. In der industriellen Fertigung wird der Zusammenhang der Ebenen als Automatisierungspyramide bezeichnet. Sie geht von der Prozessebene im Level 0 bis zur Unternehmensebene im Level 4 und ordnet diesen Ebenen typische Aufgaben und eingesetzte Systeme zu.

Die Interaktion der digitalen Prozesskette in der Ausführungsphase ist in Abb. 7.1 dargestellt und teilt sich in vier Ebenen. Inwieweit sich einzelne Funktionalitäten in den Systemgrenzen verschieben, werden die weiteren Entwicklungen zeigen. Dabei werden physikalische Prozesse mittels Sensorik im Zeitraum von Sekunden in der ersten Ebene gemessen. Die Ebene 2 ist durch die Steuerung und das Qualitätsmanagement abgedeckt, da diese den Produktionsprozess überwachen, führen und automatisiert steuern. Die Baudatenmanagementsysteme, die innerhalb der Ebenen 3 die Schnittstelle von der Baustelle zum Büro bilden, können mit dem Betriebsmanagement gleichgesetzt werden und vereinigen die Produktionsdatenerfassung, die Produktionsplanung, die KPI-Ermittlung und das Material- und Qualitätsmanagement. Der Zeitrahmen der Aktivitäten umfasst Tage, Schichten, Stunden und Minuten. Dazu werden in der Baubranche unterschiedlichste Systementwicklungen verfolgt. Auf der Unternehmensebene werden die Bestellabwicklung und Verrechnung sowie die Produktionsgrobplanung vorgenommen. Dazu sollen in der Baubranche BIM-Modelle eingesetzt werden, die in Verbindung mit Bau-ERP-Systemen arbeiten. Der Zeitrahmen in der Datenebenen 4 liegt in Monaten, Wochen und Tagen.

Die Leserichtung in der Abb. 7.1 von links nach rechts kommt einem Zuwachs an erfassten Daten gleich. Wird die digitale Datenkette von rechts nach links durchwandert, so werden datenbasierte Planungen von ERP- und BIM-Systemen an untergeordnete Systeme übergeben.

Auf die Injektions- und Bohrsteuerungen wurde bereits im Abschnitt 4.3 eingegangen. Zur besseren Verständlichkeit werden Beispiele von Baudatenmanagementsystemen, ERP-Systemen und Software zum Arbeiten mit BIM vorgestellt.

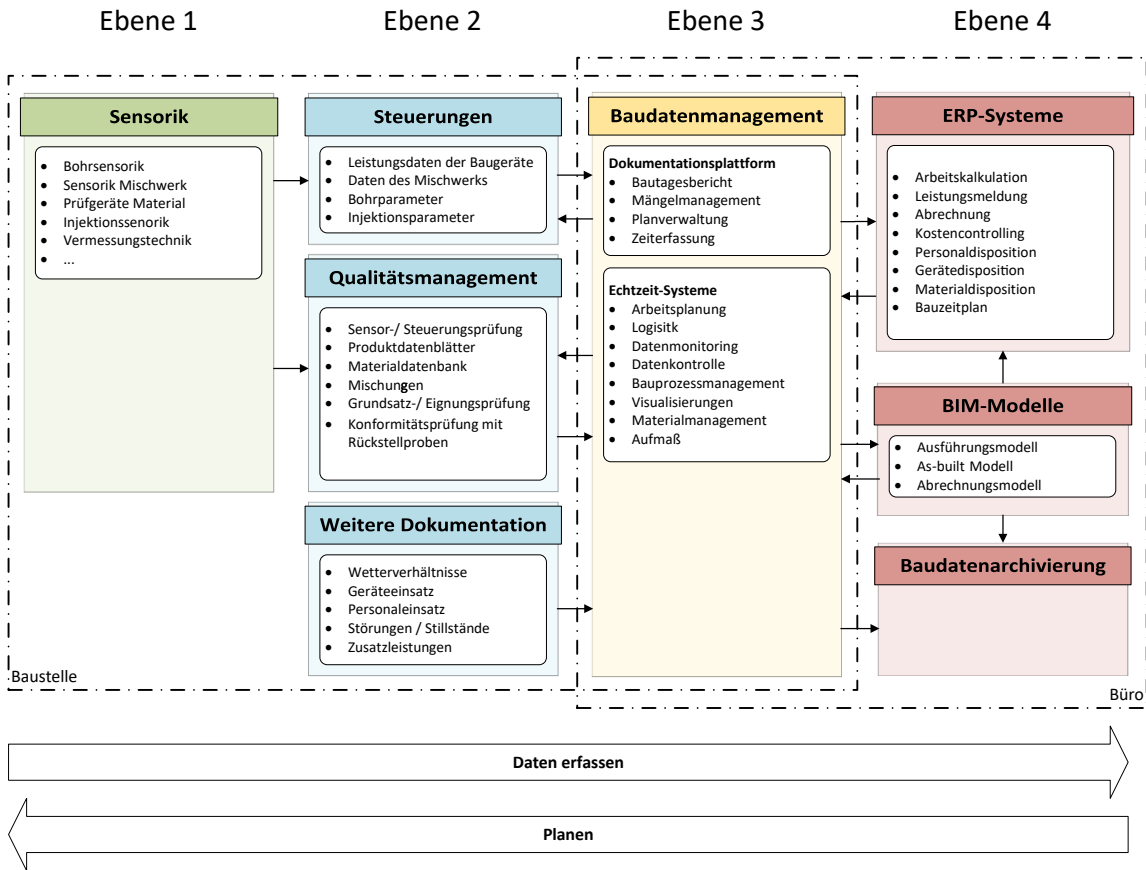


Abb. 7.1: Digitale Datenkette in der Ausführungsphase

### Baudatenmanagementsysteme

In der Entwicklung von Baudatenmanagementsystemen können zwei unterschiedliche Herangehensweisen beobachtet werden. Zum einen etablieren sich Systeme, die Dokumentenverwaltung, Planverwaltung, das digitale Bautagebuch und Mängel- und Zeiterfassungen in Webplattformen und als mobile App für Baustellen zur Verfügung stellen. Die Datenakquise wird bei diesen Plattformen vorwiegend über Eingabemasken erreicht. Diese Systeme werden in der Ausführung als *Projektdokumentationsplattformen* bezeichnet.

Die zweite Art der Baudatenmanagementsysteme hat sich gewerksspezifisch aus den Baudatenmonitoring in Echtzeit weiterentwickelt. Die Datenbeschaffung basiert zum größten Teil auf direkten Schnittstellen zu Sensorik und Steuerungen. Diese Baudatenplattformen vereinigen zumeist die Einsatzplanung und Arbeitsvorbereitung, die Kontrolle und Dokumentation der Prozesse in Echtzeit sowie Analysetools zur kontinuierlichen Verbesserung des Ausführungsprozesses. Diese Systeme werden als *Echtzeit-Baudatenmanagementsysteme* bezeichnet.

**Tab. 7.1:** Beispiele mobiler Projektdokumentationsplattformen

Unternehmen	Produkt	Beschreibung
Bauskript Software	Bautagebuch	Baustellendokumentation
Datengut GmbH	Digitale Bauakte iTWO site control	Bauakte, Planverwaltung, Ereignismanagement, Fotodokumentation, Bautagebuch, Adress- und Kontaktverwaltung, Personalakte, Zeiterfassung, Einsatzplanung
PlanRadar GmbH	PlanRadar	Baudokumentation, Aufgaben- und Mängelmanagement

**Tab. 7.2:** Beispiele von Echtzeit-Baudatenmanagementsystemen

Unternehmen	Produkt	Beschreibung
VOLZ Consulting GmbH	BPO Asphalt	Arbeitsvorbereitung, Taktplanung, Einbau- und Logistikkonzept, Dokumentation von Asphalteinbauprozessen
BabEng GmbH	TPC	Datenmonitoring, Berichterstattung und Statistiken beim maschinellen Vortrieb
Doka Österreich GmbH	Smart Pouring	Bestell- und Lieferprozess, Dokumentation von Ortbeton

Beispielhaft sind in Tabelle 7.1 und Tabelle 7.2 Projektdokumentationsplattformen und Echtzeit-Baudatenmanagementsysteme dargestellt<sup>61</sup>.

### ERP für das Bauwesen

Die ERP-Systeme im Bauwesen verbinden die Kalkulations- und Ausführungsprozesse. Die in Tabelle 7.3 dargestellten Lösungen werden vorwiegend von Bauunternehmen angewendet, um die Kernprozesse, beginnend von der Angebotsphase bis hin zur Abrechnung, zu unterstützen. ERP-Bausoftware integriert über externe Schnittstellen, Gebäudemodelle, normierte Leistungsverzeichnisse, Terminpläne und weitere Leistungsdaten aus den Baudatenmanagementsystemen. Die Kombination der unterschiedlichen Quellen ermöglicht eine übersichtliche Baustellenabwicklung. Der Aufbau der gegenständlichen Modelle ist modular ausgeführt, inwieweit gewisse Funktionalitäten innerhalb der Systemgrenzen von Baudatenmanagement- oder ERP-Systemen angesiedelt sind, ergibt sich aus den Anforderungen der Interessensvertretungen. Grundsätzlich werden gewerksübergreifende und kostenabhängige Analysen in

<sup>61</sup>Die Auswahl der Programme erfolgte nach bereits in Forschungsarbeiten untersuchten Systemen [12], [149], [3].

ERP-Lösungen integriert, spezifische und technische Berechnungen hingegen in den gewerksabhängigen Baudatenmanagementsystemen realisiert.

**Tab. 7.3:** Beispiele von ERP-Systemen für das Bauwesen

Unternehmen	Produkt	Beschreibung
NEVARIS Bausoftware GmbH	NEVARIS	Kalkulation, Bauabrechnung, Buchhaltung, Baucontrolling, Kundenmanagement, Dokumentenmanagement
RIB Software SE	iTWO 4.0	Kalkulation, Bauabrechnung, Terminplanung, Beschaffung, Kundenmanagement, Dokumentenmanagement

### Systeme zu BIM

In der Studie Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen [55] werden BIM-Programme als Konnektoren für Gebäudeplanung und -management beschrieben. BIM-Programme zeichnen sich durch digitale Gebäudemodelle und die Verknüpfung mit nicht geometrischen Informationen aus. Gewerkspezifisch haben sich dabei eine Vielzahl von Systemen etabliert, die von der Architektur- und Tragwerksplanung, der Haustechnik und Prüf- und Analysesoftware bis hin zu Kosten- und Terminplanungstools reichen. Für die Entwicklung der Baudatenmanagementsysteme für Injektionsarbeiten bedeutet dies, dass insbesondere die bauteilabhängigen Identifikationen übernommen und notwendige Parameter nach der Ausführung in diese Modelle überführt werden können. Eine Auflistung der aktuellen BIM-Softwarelösungen für Planung und Bauausführung ist unter [55, S. 50–51] zu finden.

## 7.2 Digitales Prozessmodell

Dieses Prozessmodell besteht aus den fünf Stufen der digitalen Baudokumentation und einem integrierten Qualitätsmanagement. Baubegleitende Visualisierungen unterstützen den Prozess. Diese Bestandteile müssen in modernen, digitalen Datenmanagementsystemen in der Injektionstechnik berücksichtigt werden.

### 7.2.1 Die fünf Stufen der digitalen Baudokumentation

Digitale Baudokumentation im Spezialtiefbau zeichnet sich nach Abb. 7.2 durch fünf wesentliche Bestandteile aus. Für die Teilautomatisierung des Dokumentationsprozesses muss in einem ersten Schritt dafür gesorgt werden, dass die Baustellen Daten in digitaler, verarbeitbarer Form aufgenommen und gespeichert werden. Benutzerschnittstellen mittels Eingabemasken sollten möglichst vermieden werden. In einem zweiten Schritt müssen die Daten kontrolliert und von befugtem Personal nachweislich freigegeben werden. Mit den Daten der Baugeräte kann für jeden Arbeitsprozess ein digitaler Prozessvorschlag erstellt und mittels Benutzereingaben verfeinert werden. Die Analyse der Daten erfolgt nach technischen und wirtschaftlichen Aspekten, wichtig ist die Definition von <sup>62</sup>KPIs zur Bewertung der Arbeitsprozesse. Digitale Datenmanagementsysteme gliedern sich nach Abb. 7.1 in die Datenkette der Bauausführung ein. Effektiv arbeitendes Baudatenmanagement zeichnet sich demnach durch geeignete Schnittstellen und Exporte zu ERP-Systemen und Baugerätesteuerungen aus.



Abb. 7.2: Die fünf Stufen der digitalen Baudokumentation

#### Digitale Verfügbarkeit

In der Datenverarbeitung werden unterschiedliche Formen von Schnittstellen eingesetzt und definiert. Für digitales Datenmanagement in der Injektionstechnik sind folgende Schnittstellen für den Benutzer wesentlich:

- **Benutzerschnittstellen:** Als solche werden jene Schnittstellen bezeichnet, die für die Interaktion von Mensch und System notwendig sind. Bei Datenmanagementsystemen am Bau müssen die Eingabemasken benutzerfreundlich nach den Benutzeranforderungen erstellt werden. Fachpersonal für Injektionstechnik muss während des Kontroll- und Freigabevorgangs mit dem System in Interaktion treten.
- **Hardwareschnittstellen:** Damit werden selbständig arbeitenden Funktionseinheiten einer Datenverarbeitungsanlage verbunden. USB, WLAN oder Ethernet zählen zu den bekanntesten Hardwarechnittstellen. In der Injektionstechnik spielen diese Schnittstellen als Konnektoren von Baugeräten und Steuerungen zu den Monitoringsystemen eine

<sup>62</sup>Key Performance Indicator bzw. Leistungskennzahl (KPI)

entscheidende Rolle. Für automatisierte Datenübertragung sollte von kabelgebundenen oder externen Datenträgern abgesehen werden.

- **Softwareschnittstellen:** Dazu zählen Kommunikationsschnittstellen, die den Datenaustausch zwischen Programmen und abgeschlossenen Programmteilen ermöglichen. Programmierschnittstellen, auch Application-Programming-Interface (API) genannt, führen bestimmte Funktionalitäten aus. Durch diese wird es anderen Programmen ermöglicht, sich an das System anzubinden. Insbesondere bei Webapplikationen können mit Hilfe von APIs Inhalte ausgetauscht und weiterverarbeitet werden. Mittels API ist es beispielsweise möglich, dass ERP-Systeme Baudaten aus Baudatenmanagementsystemen weiterverarbeiten und nützen.

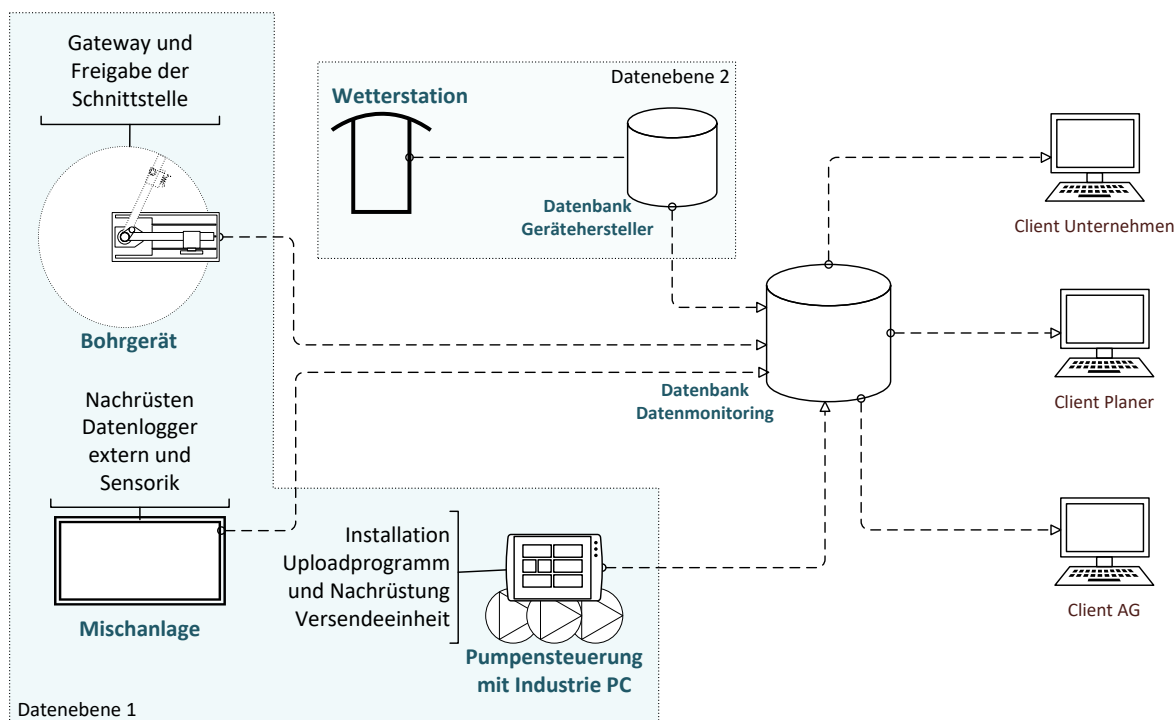
Die Zugänglichkeit für unabhängiges Datenmonitoring und -management auf der Baustelle erfolgt zur Zeit in zwei unterschiedlichen Datenebenen. Die neutrale Zugänglichkeit ist ein wesentlicher Faktor für übergeordnetes Monitoring, da auf einer Baustelle Geräte unterschiedlicher Hersteller gleichzeitig im Einsatz sind. Nach Abb. 7.3 können in der ersten Datenebene, relevante Gerätedaten direkt vom Endgerät bezogen werden. Dazu werden direkt in der Steuerung Uploadprogramme und gegebenenfalls eine Versendeinheit nachgerüstet, die den direkten Datenübertrag ermöglichen. Alternativ dazu besitzen moderne Baugeräte sogenannte Gateways, die bereits über diese Funktionalitäten verfügen. Die Baugerätehersteller schützen ihre Schnittstellen, die einen direkten Zugriff auf die Baudaten vom Gerät möglich machen. Nach Freigabe der Kommunikationsschnittstelle können diese Daten automatisch integriert werden. Als dritte Möglichkeit für eine herstellerübergreifende Aufnahme können Baugeräte mit externen Datenloggern und Sensorik nachgerüstet werden. Diese Möglichkeit wird bei älteren Geräten angewendet.

In der zweiten Datenebene greifen neutrale Datenmanagementsysteme auf die Datenbanken der Drittsysteme zu, die selbst Gerätedatenbanken betreiben.

### Kontrolle und Freigabe

Die Anforderungsprofile zeigen, dass zur Steigerung der Akzeptanz und für eine zentrale Kommunikation im System digitale Baudatenmanagementsysteme einen integrierten Freigabeprozess implementieren müssen. Dabei gilt, dass Systeme sicherstellen, dass veränderte oder manuell hinzugefügte Herstellungsdaten für alle Benutzer ersichtlich sind und die Freigabe nur durch befugtes Personal erfolgt.

Sofern es durch digitale Baudatenmanagementsysteme vermehrt zu leistungsbezogenen Vergütungen kommt, ist die Baudokumentation zentrale Grundlage für den Nachweis. Der Workflow für die Freigabe von Herstellungs- und Prozessdaten beinhaltet demnach zuerst eine Kontrolle und Freigabe durch das Ausführungsunternehmen und danach eine Bestätigung oder Korrektur durch die Bauaufsicht. Die Kontrolle und Freigabe der Herstellungs- und Prozessdaten



**Abb. 7.3:** Optionen der digitalen Verfügbarkeit von Baustellen- und Maschinendaten

kann als vorgezogenes gemeinsames Aufmaß für Leistungspositionen verstanden werden, da sich aus diesen Daten eine Abrechnung generieren lässt.

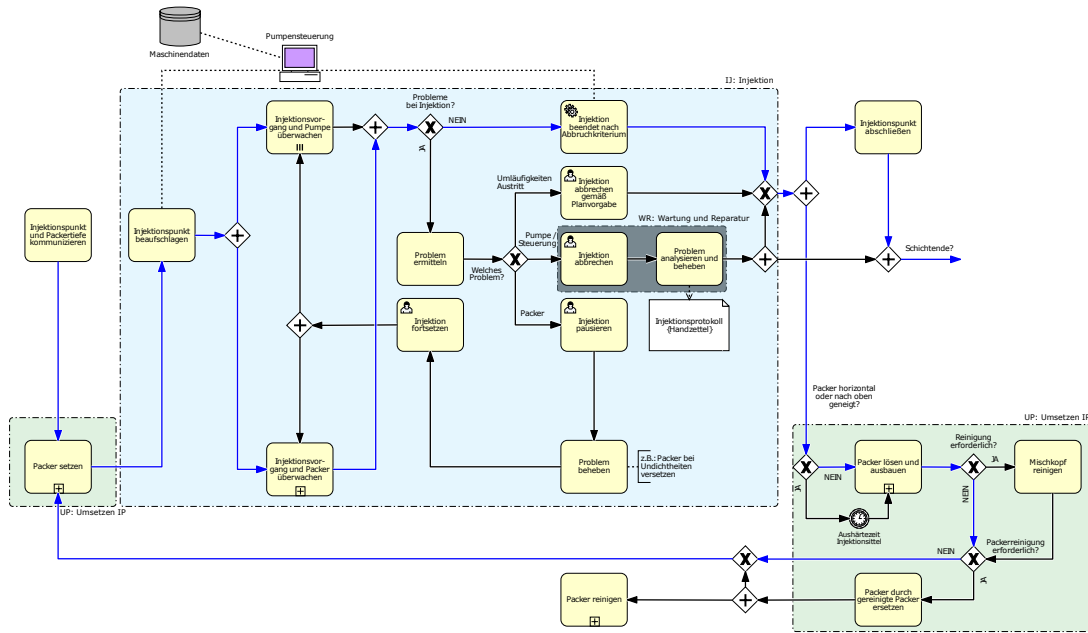
### Bauprozessmanagement

In Abschnitt 5.1.3 ab Seite 104 wird der Zusammenhang von Dokumentations- und Ausführungsprozessen beschrieben. Digitales Bauprozessmanagement baut auf diesen Prozessvisualisierungen auf. Zu Beginn der Ausführung von Herstellungsprozessen auf einer Baustelle muss der Soll-Ausführungsprozess mit allen Tätigkeiten definiert werden. Mit Hilfe der freigegebenen Maschinendaten kann eine zeitliche Aufschlüsselung der Prozesse gebildet werden. Die gewählte Vorgangsweise des Prozessvorschlags mit Hilfe von Sequenzierung ist in Abschnitt 7.3.3 erklärt. Die Prozessdiagramme sind notwendig, damit nach Analyse der Zeiten der Ausführungsprozess mit Hilfe der standardisierten Abfolgen angepasst werden kann. Abb. 7.4 zeigt einen Ausschnitt eines Arbeitsprozesses von Abdichtungsinjektionen und die Zusammenfassung in Bauprozesse für Wartung und Reparatur (WR), Umsetzen (UP, UA) sowie Injektion (IJ).

Der Bauprozess kann für jede Maschine einzeln definiert werden. Sofern mehrere Maschinen eine Anlageneinheit bilden, wird mit Hilfe von definierten Prioritäten eine Datenaggregation in Anlageebenen durchgeführt, siehe dazu Abb. 7.15 auf 210. In Anlageebenen können den Bauprozessen Ressourcen zugeteilt werden. Beispielsweise werden Injektionsanlagen mit



Ausführungsprozess:



Bauprozess:

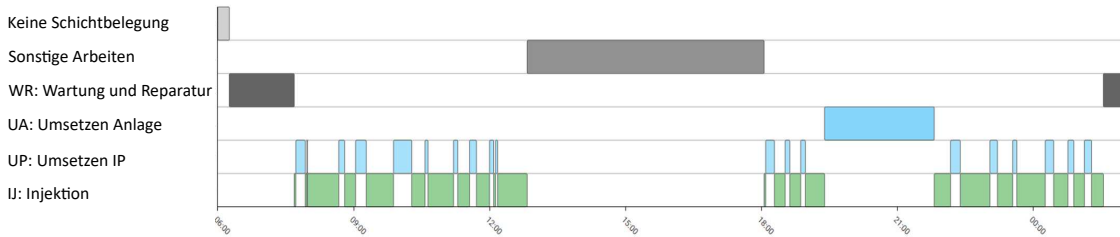


Abb. 7.4: Ausführungsprozesse und Zusammenfassung in Balkendiagramm

3 bis 4 Pumpen durch einen Pumpenfahrer, 2 Hilfsarbeiter zum Packer setzen und einem Mischmeister betrieben.

Analyse und Abrechnung

Mit Hilfe der Herstellungs- und Bauprozesse können Analysen des Bauablaufes und die Abrechnung der Leistungspositionen durchgeführt werden. Die wichtigsten Abrechnungspositionen und deren automatische Berechnung aus den Datensätzen sind in Tabelle 7.9 auf Seite 216 beschrieben. Sofern die Herstellungsparameter der Bohr- und Injektionsdaten vorliegen, können für die Injektionsarbeiten KPIs gebildet werden.

Für die Abrechnung von Pumpengleichzeitigkeiten nach Kommentar zur EN 12715 Injektionen [147] muss im System ein Algorithmus integriert werden, der die Gleichzeitigkeiten ermittelt. Als Grundlage dient die schichtweise Aufschlüsselung der Herstellungstätigkeiten.

Beispielsweise wird pro Arbeitstag in zwei Schichten eine Anlage mit 4 Pumpen von einer Injektionsmannschaft betrieben. Die Start- und Endzeitstempel jeder Pumpe sind im Baupro-

zessmanagement hinterlegt. Die aggregierte Betriebszeit der Anlage ist dadurch bekannt. Für die leistungsorientierte Vergütung müssen daher die Abschnitte ermittelt werden, in denen für die Anlage eine Pumpe bzw. zwei, drei und vier Pumpen gleichzeitig im Betrieb waren. In Leistungspositionen sind bei adäquater Kalkulation die Lohnkosten für den Betrieb der Anlage in der Position der Betriebsstunden einer ersten Pumpe inkludiert<sup>63</sup>.

Jeder weitere gleichzeitige Betrieb einer Pumpe ist mit geringeren Anteilen für die Lohnkosten eingepreist. Bei anfallenden Anlage- und Pumpenkosten hingegen kann davon ausgegangen werden, dass alle Pumpen anteilmäßig etwa ähnlichen Betriebsstunden ausgesetzt sind und die Kosten daher auf alle Positionen gleich aufgeteilt sind.

Abb. 7.5 verdeutlicht die Funktion des Algorithmus, der auf die freigegebenen Datenpunkte angewendet wird. Die Startzeiten, in der Abbildung grün dargestellt, und die Endzeiten der Herstellungstätigkeiten von Pumpe 1-4, in rot hinterlegt, werden zu Beginn chronologisch geordnet. Nach der Sortierung wird eine Zählvariable eingesetzt, die ermittelt, wie viele Maschinen gleichzeitig arbeiten. Kommt ein Startereignis einer Pumpe in der Reihenfolge hinzu, so wird die Zählvariable um eins erhöht, bei Antreffen einer Beendigung wird die Zählvariable um eins herabgesetzt. Die Zeitdifferenz zwischen zwei Ereignissen wird in der Spalte Stunden berechnet. In Abb. 7.5 waren zum Beispiel von 02:26:13 bis 02:29:58 3 Pumpen im Einsatz, bis um 02:29:58 die auf der Baustelle befindliche Pumpe 2 abgeschaltet wurde und sich die zwei Maschinen mit dem Namen Pumpe 1 sowie Pumpe 4 weiterhin im Betrieb befanden. Durch die Zählvariable können die Zeitstempel der Pumpengleichzeitigkeit zugeordnet werden.

Durch dieses Beispiel wird verdeutlicht, dass die auf der Baustelle befindlichen Pumpen mit dem Namen Pumpe 1 bis Pumpe 4 nicht der in Ausschreibung nach [147] 1. bis 4. Pumpe entsprechen. Eine Datenbank mit dem integrierten Algorithmus ist erforderlich, um die Vordersätze der Leistungsposition mittels einer Schleife für die freigegebenen Punkte täglich oder schichtweise zu berechnen. Die Berechnung aus Abb. 7.5 ist in Abb. 7.6 visualisiert. Im unteren Bereich sind die Herstellungstätigkeiten nach den Namen der Pumpen im Container angeordnet, dies entspricht dem Bauprozessmanagement der einzelnen Maschinen und der Berechnung nach Pumpennummerierung in Abb. 7.5. Der obere Bereich der Balkendiagramme mit 1.-4. Pumpe entspricht der Gleichzeitigkeit. Die Zeit der 1. Pumpe ist mit der Anlagenbetriebszeit identisch, sofern die Start- und Endtätigkeiten sowie die Herstellungsunterbrechungen in beiden Anteilen gleich beinhaltet sind. Die Anteile für die Zeiten der 2. bis 4. Pumpe sind entsprechend der Berechnung monoton fallend.

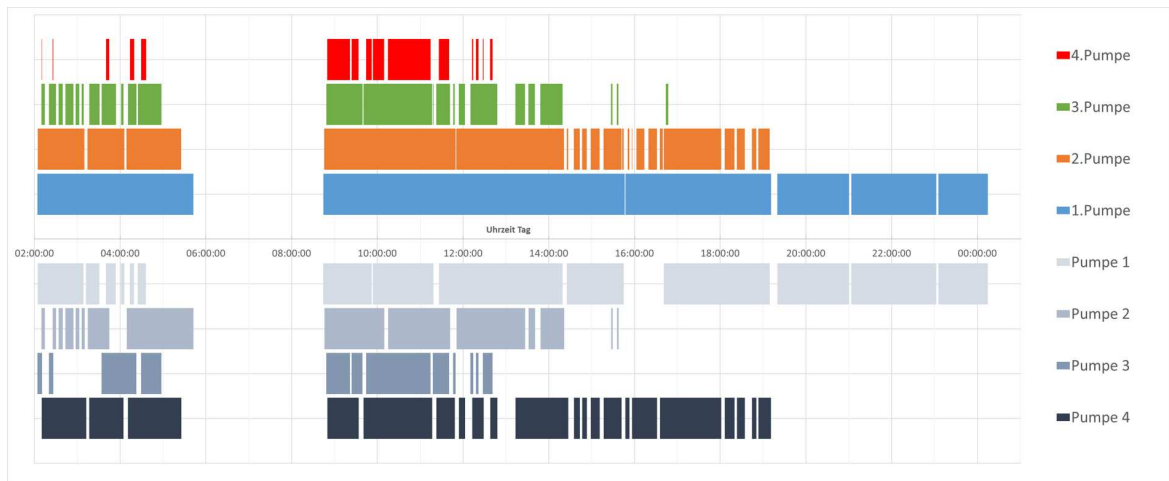
<sup>63</sup>siehe dazu Tabelle 6.3, Positionsnummer 7.01 bis 7.03

<sup>64</sup>Die Pumpennummerierung Pumpe 1 bis Pumpe 4 entspricht dem physischen Pumpeneinsatz auf der Baustelle. Die Pumpengleichzeitigkeit mit dem Namen 1. (betriebene) Pumpe, 2. Pumpe (gleichzeitig mit 1. Pumpe betrieben), 3. Pumpe (gleichzeitig mit 1. und 2. Pumpe betriebene) usw. entspricht der Abrechnungsgrundlage nach Tabelle 6.3.

Pumpennummerierung				Pumpengleichzeitigkeit					
Zeitstempel [hh:mm:ss]				Zählung	Stunden	Zeitstempel [hh:mm:ss]			
Pumpe 1	Pumpe 2	Pumpe 3	Pumpe 4			1. Pumpe	2. Pumpe	3. Pumpe	4. Pumpe
		02:04:05		1		02:04:05			
02:04:52				2	0,01		02:04:52		
	02:09:30			3	0,08				
			02:10:02	4	0,01			02:09:30	
		02:10:29		3	0,01				02:10:02
	02:14:20			2	0,06			02:10:29	
		02:20:05		3	0,10			02:14:20	
	02:25:20			4	0,09			02:20:05	
		02:26:13		3	0,02				02:25:20
	02:29:58			2	0,06			02:26:13	
	02:33:33			3	0,06			02:29:58	
	02:39:24			2	0,10			02:33:33	
	02:43:03			3	0,06			02:39:24	
	02:54:22			2	0,19			02:43:03	
	02:57:26			3	0,05			02:54:22	
	03:02:33			2	0,09			02:57:26	
	03:05:51			3	0,06			03:02:33	
03:08:43				2	0,05			03:05:51	
	03:10:11			1	0,02		03:10:11		
03:12:20				2	0,04		03:12:20		
			03:12:26	1	0,00		03:12:26		
	03:14:25			2	0,03		03:14:25		
			03:16:31	3	0,04				
03:31:00				2	0,24			03:16:31	
		03:33:49		3	0,05			03:31:00	
03:40:07				4	0,11			03:33:49	
	03:44:32			3	0,07				03:40:07
03:53:59				2	0,16				03:44:32
04:01:04				3	0,12			03:53:59	
			04:04:29	2	0,06			04:01:04	
04:06:01				1	0,03		04:06:01		
	04:08:58			2	0,05		04:08:58		
			04:10:44	3	0,03				
04:13:40				4	0,05			04:10:44	
04:19:30				3	0,10				04:13:40
		04:22:36		2	0,05				04:19:30
04:24:39				3	0,03			04:22:36	
		04:29:12		4	0,08			04:24:39	
04:36:18				3	0,12				04:29:12
		04:57:40		2	0,36			04:36:18	
			05:25:30	1	0,46			04:57:40	
	05:42:22			0	0,28	05:42:22		05:25:30	

Abb. 7.5: Beispiel zur Berechnung der Pumpengleichzeitigkeit<sup>64</sup>

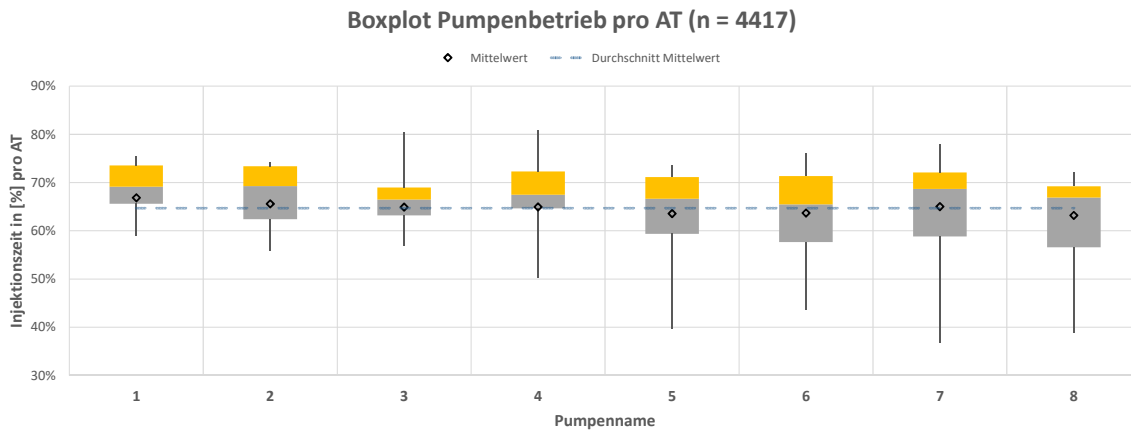
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



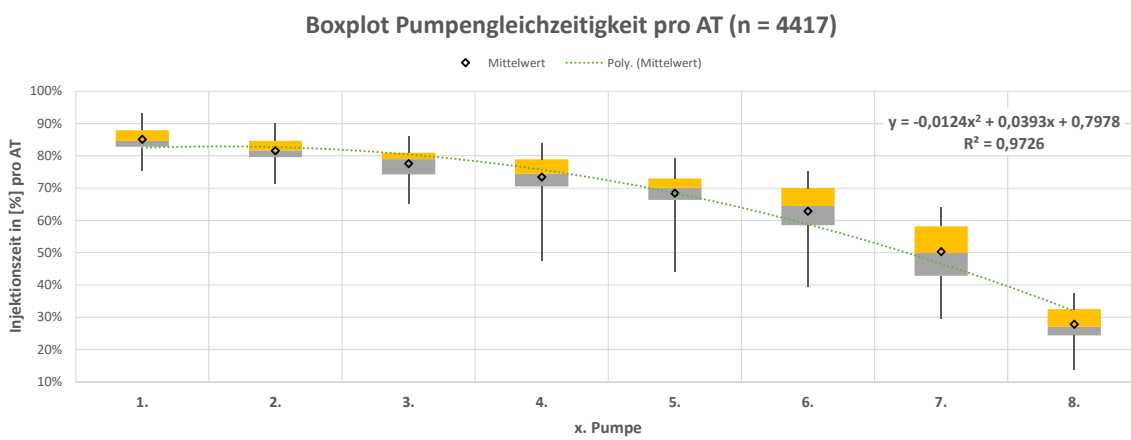
**Abb. 7.6:** Abrechnungsmodalitäten von Pumpenzeiten im Vergleich

Bei einer Tunnelsanierung, die störungsfrei im Durchlaufbetrieb durchgeführt wurde, konnte der Algorithmus in die Webapplikation eguana SCALES integriert und erstmalig getestet werden. Die Auswertung in Boxplots in Abb. 7.7a und Abb. 7.7b zeigt, dass die Injektionsanlage mit acht Pumpen betrieben wurde. Die Pumpen auf der Baustelle wurden im Durchschnitt 65 % der Arbeitszeit eingesetzt. Abb. 7.7b zeigt, dass eine Gleichzeitigkeit aller Maschinen in ca. 30 % der Arbeitszeit erreicht werden konnte, jedoch in 50 % der benötigten Arbeitszeit mindestens sieben der acht Maschinen im Einsatz waren. Die Minimal- und Maximalwerte verdeutlichen, dass bei diesem Projekt mindestens 3 Pumpen konstant im Betrieb gehalten werden konnten. Dies bedeutet, dass die Personalkosten auf bis zu drei Pumpen aufgeteilt werden können, die Ausschreibung der Pumpenbetriebsstunden sollte ausgehend von der Gesamtpumpenanzahl nach der polynomischen Funktion in Abb. 7.7b getroffen werden.

Durch Aufnahme und Vergleich dieser Kennlinien kann in Zukunft die Kalkulation bei Einsatz gleicher Belegung und Anlagengröße nach Pumpengleichzeitigkeit erfolgen und es können die Anlagengrößen mit der Personalbelegungen im Betrieb bestmöglich abgestimmt werden. Die gleiche Vorgangsweise ist auf mehrarmige Bohrgeräte umzulegen, indem jeder Bohrarm als separate Maschine betrachtet wird.



(a) Pumpenauslastung



(b) Pumpengleichzeitigkeit

Abb. 7.7: Boxplot für Pumpenbetriebe bei einer Tunnelsanierung mit einer Anlage und 8 Pumpen

## Leistungskennzahlen KPIs

Zu Kontrolle und Steuerung der Injektions- und Bohrprozesse müssen aus den Herstellungs-, Prozess- und Plandaten Kennzahlen, sogenannte KPIs, definiert werden, die in Übersichten, sogenannten Prozesscockpits, in unterschiedlicher Art und Weise dargestellt werden. Die Kennzahlen gehen über die im Baubetrieb bekannten Aufwands- und Leistungswerte hinaus, da sie nicht nur Produktionsmengen zur Produktionszeit ins Verhältnis setzen. KPIs machen im Sinne des Qualitätsmanagements die Arbeitsprozesse erst überprüfbar und quantifizieren die Stabilität des Produktionsprozesses. Für Bohr- und Injektionstätigkeiten werden vier Gruppen von Leistungskennzahlen definiert [107]:

- **KPI-Leistung:** Diese Parameter setzen die Herstellungszeiten und abgeschlossenen Tätigkeiten miteinander in Verbindung.
- **KPI-Material:** Diese Parameter setzen die Herstellungsmengen und abgeschlossenen Tätigkeiten miteinander in Verbindung.
- **KPI-Plan:** Diese Parameter setzen die Herstellungsparameter im Ist mit dem Soll der Plandaten in Beziehung.
- **KPI-Prozess- und Arbeitszeit:** Diese Parameter sind auf Produktivitätskontrolle ausgelegt und werden in Verbindung mit den anderen Gruppen für Nachkalkulationen verwendet.

In Tabelle 7.4 sind die wichtigsten Kennzahlen dargestellt. Bauverfahrens- und projektspezifische Kennzahlen ergänzen diese Tabelle.

**Tab. 7.4:** Leistungskennzahlen im digitalen Prozessmodell

KPI	Ansatz	Einheit	Beschreibung
<b>Leistung</b>			
Verpresszeit pro Beaufschlagung	$\frac{\sum t_I}{\sum n_{BA}}$	min/Stk	Das Verhältnis zwischen Nettoinjektionszeit und Beaufschlagungen
Gesamtzeit pro Beaufschlagung	$\frac{\sum t_G}{\sum n_{BA}}$	min/Stk	Das Verhältnis zwischen Gesamtzeit, in der die Maschine belegt ist, und Beaufschlagungen
Bohrzeit pro Bohrloch	$\frac{\sum t_B}{\sum n_{BLB}}$	min/Stk	Das Verhältnis zwischen Netto-Bohrzeit und gebohrten Bohr- löchern

**Tab. 7.4:** (Forts.) Leistungskennzahlen im digitalen Prozessmodell

KPI	Ansatz	Einheit	Beschreibung
Bohrzeit pro Bohrmeter	$\frac{\sum t_B}{\sum BM_B}$	min/m	Das Verhältnis zwischen Netto-Bohrzeit und gebohrten Metern
Beaufschlagung pro Bohrloch	$\frac{\sum n_{BA}}{\sum n_{BL_I}}$	Stk/Stk	Das Verhältnis zwischen Beaufschlagungen und injizierten Bohrlöchern
Beaufschlagung pro Bohrmeter	$\frac{\sum n_{BA}}{\sum n_{BM_I}}$	Stk/m	Das Verhältnis zwischen Beaufschlagungen und injizierten Bohrmetern
<b>Material</b>			
Mehrverbrauch	$\frac{GV_M}{\sum V}$	%	Das Verhältnis zwischen Gesamtverlustmenge und Verpressmenge
Verpressmenge pro Beaufschlagung	$\frac{\sum V}{\sum n_{BA}}$	l/Stk	Das Verhältnis zwischen Verpressmenge und Beaufschlagungen
Verpressmenge pro Bohrmeter	$\frac{\sum V}{\sum BM_I}$	l/m	Das Verhältnis zwischen Verpressmenge und injizierten Bohrmetern
Verpressmenge pro Verpresszeit	$\frac{\sum V}{\sum t_I}$	l/min	Das Verhältnis zwischen Verpressmenge und Netto-Injektionszeit
<b>Plan</b>			
Bohrmetervergleich Ist-Soll	$\frac{\sum BM_B - \sum BM_P}{\sum n_{BL_B}}$	m/m	Gebohrte Meter abzüglich der geplanten Meter im Verhältnis zur Anzahl der gebohrten Bohrlöcher

**Tab. 7.4:** (Forts.) Leistungskennzahlen im digitalen Prozessmodell

KPI	Ansatz	Einheit	Beschreibung
Injektionsmengen- vergleich Ist-Soll	$\frac{\sum V - \sum V_P}{\sum V_P}$	%	Das Verhältnis zwischen Differenz Verpressmenge und geplanter Verpressmenge zur Verpressmenge
<b>Prozess- und Arbeitszeit</b>			
Herstellungstätigkeiten zu Gesamtzeiten	$\frac{\sum t_I}{\sum t_G}$	%	Anteil der Injektionszeit an der Gesamtzeit, in der die Maschine belegt ist
Verhältnis Haupt- zu Gesamtzeiten	$\frac{\sum t_I + \sum t_U}{\sum t_G}$	%	Produktivität als Verhältnis von Haupttätigkeiten zur Gesamtzeit
Umsetzzeit Injektion	$\frac{\sum t_{U_I}}{\sum n_{BA}}$	min/Stk	Die durchschnittliche Umsetzzeit pro Injektionspunkt
Umsetzzeiten pro Bohrung	$\frac{\sum t_{U_B}}{\sum n_{BL}}$	min/Stk	Die durchschnittliche Umsetzzeit des Bohrergeräts pro Bohrpunkt
Arbeitsstundenvergleich Ist-Soll	$t_{Abr} - t_{Ist}$	h	Vergleich der Arbeitsstunden im Leistungsverzeichnis mit Stundenaufzeichnung laut Bautagesbericht

Alle Parameter sollten auf ein jeweils unterschiedliches Start- und Enddatum abgrenzbar und separat für Anlagen, Maschinen sowie Schichten auswertbar sein. Filterungen nach Parametern aus der Datenbank können die Kennzahlen weiter modifizieren. Die Gesamtzeit  $t_G$  beinhaltet die Schichtbeginn- und Schichtendtätigkeiten, Start-, und Endtätigkeiten, Herstellungstätigkeiten und Herstellungsunterbrechungen je eingesetzter Maschine. Als Haupttätigkeiten werden Aktivitäten verstanden, die in der Abrechnung vergütbar sind. Beispiele dafür sind Umsetzzeiten bei Bohrung und Injektion.



## Export

Für die Aufmaßerstellung und die Weitergabe kommen im europäischen Raum unterschiedliche Austauschformate zum Einsatz [151, S. 56–63]. Vorgaben für die Datenaustauschformate in Österreich finden sich in der ÖNORM A 2063: Austausch von Leistungsbeschreibungs-, Elementkatalogs-, Ausschreibungs-, Angebots-, Auftrags- und Abrechnungsdaten in elektronischer Form. Dabei wird für den Datenaustausch die Aufzeichnungssprache XML verwendet. Die Form der Mengenberechnungen und Struktur der Daten zur Abrechnung werden im Schemadokument onre.xsd geregelt [112].

In Deutschland kommen die REB-VB 23.003: REB-Verfahrensbeschreibung – Allgemeine Mengenberechnungen mit der DA11-Austauschdatei, sowie GAEB-VB 23.004: Allgemeine Mengenberechnungen, die die DA12-Austauschdatei beinhaltet, zum Einsatz. Die Endung dieser Dateien lautet \*.d11 oder \*.d12 [130],[48]. Die DA11-Datei ist eine ASCII-Datei und enthält die Positionsnummer, eine Formelnummer und die Blattadresse. Kommentare können nach der Kennzeichnung mit dem Zeichen \* markiert werden. Die Satzlänge beträgt genau 80 Stellen und beginnt mit der Ziffer 11. Die DA12-Datei im American National Standards Institute (ANSI)-Zeichencode hat in der Baubranche keinen breiten Einsatz gefunden. Das DA11-Format wurde deshalb weiterentwickelt und ist heute flächendeckend von den ERP-Bausystemen für die Mengenberechnung integriert [156]. Die Verfahrensbeschreibungen GAEB DA XML 3.3 sollen zukünftig die Verbindung zum BIM-Modell herstellen.

Welches Datenformat und welche Parameter der Herstellungs- und Materialdaten in ein Ausführungsmodell in BIM übergeben werden, zeigt sich in zukünftigen Projekten. Eine Möglichkeit der Kollaboration bieten die offenen Standards von buildingSMART<sup>65</sup>. Das BCF–Building Collaboration Format ermöglicht die Dokumentation der Ausführung und Kommunikation über die Modellebene. IFC – Industry Foundation Classes setzt sich zunehmend in der Baubranche für den Datenaustausch zwischen unterschiedlicher Bausoftware durch. Die ISO 16739 repräsentiert diesen offenen internationalen Standard für BIM-Daten [118].

### 7.2.2 Qualitätsmanagement

Die Anforderungsanalyse hat gezeigt, dass in einem digitalen Datenmanagementsystem die Herstellungsdaten mit den Daten der Qualitätsprüfung von Injektionsmitteln verknüpft werden müssen. Dabei existieren zur Zeit keine übergreifenden Plattformen für alle im Rahmen der Qualitätssicherung beteiligten Interessensvertretungen.

Mit der Verknüpfung der Qualitätssicherungsmaßnahmen auf der Baustelle und im Labor wären Datenanalysen mit intelligenten Algorithmen möglich, die selbstständig den optimalen

---

<sup>65</sup><https://technical.buildingsmart.org/>

Prüfzeitpunkt für Konformitätsprüfungen vorschlagen, Abweichungen erkennen und potentielle sowie tatsächliche Mängel feststellen. Für die Entwicklung dieser Berechnungen, die unter Einsatz von Machine Learning umgesetzt werden können, sind umfassende Probephasen erforderlich, um diese im Echtbetrieb einsetzen. Ein Kernelement des digitalen Qualitätsmanagements ist daher die Entwicklung eines flexiblen Datenmodells, welche für alle im Tief- und Tunnelbau eingesetzten Materialarten anwendbar und flexibel für die laufenden Anforderungen bleibt. Für die Auswertung und Analyse von Messdaten müssen diese vorab kategorisiert und normiert werden, um einheitliche Qualitäten, Toleranzen und Messbereiche bewerten zu können.

Neben der vollständigen Dokumentation und Analyse der Prüfungen wird durch die Bereitstellung von digitalen Prüfanweisungen, die in das System eingearbeitet werden, ein standardisierter Prüfprozess auf der Baustelle vorgegeben. Dadurch kann die räumliche und zeitliche Zuordnung der Prüfungen von Herstellungsprozessen ermöglicht werden. Die Algorithmen gewährleisten überdies eine Verknüpfung der Laborprüfergebnisse (Grundsatz- und Eignungsprüfung) mit den Kontrollprüfungen auf der Baustelle. Ein lückenloses digitales Qualitätsmanagement von den Herstellerangaben der Einzelkomponenten bis hin zum Einbauzustand der Materialien kann somit erreicht werden. Die Abb. 6.3 auf Seite 142 zeigt, dass erst durch die Vernetzung von Prüfungen im Labor und auf der Baustelle die Materialien lückenlos überprüft werden können. Erst durch eine Verknüpfung mit Herstellungsdaten sind eine Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit, die in den Anforderungen eines Qualitätsmanagementsystems<sup>66</sup> vorhanden sein müssen, möglich. Nach Speicherung der Eignungsprüfung von mehreren durchgeführten Projekten in die Datenbank, können bei weiteren ähnlichen Projekten diese gegebenenfalls entfallen<sup>67</sup>. Dies führt zu einem verkürzten Entscheidungsprozess des Materialeinsatzes, wie zu einer Ressourcenreduktion.

Zusätzlich zu der Softwarekomponente ist die Entwicklung eines robusten Messgerätes notwendig. Dieses kann direkt auf den Baustellen zum Einsatz kommen und die derzeit manuell durchgeführten Prüfungen entsprechend automatisieren. Das Gerät soll universell eingesetzt werden können und normgemäße Kennwerte, wie Dichte, Viskosität, Fließgrenze, Gel-/ Topfzeit und Erstarrungsbeginn, automatisch ermitteln und an die zentrale Datenbank übertragen. Dort werden die Messwerte anhand von Algorithmen analysiert, mit entsprechenden Referenzwerten abgeglichen und für den Endnutzer statistisch zur Beurteilung aufbereitet. Langfristig soll ein solches Gerät herkömmliche Baustellen-Prüfgeräte wie Marsh-Trichter, Kugelharfe etc. ablösen. Für den Einsatz im Tief- und Tunnelbau, muss das Gerät für den Einsatz unter Tage konzipiert werden, verschmutzungsresistent und weitgehend stoß- bzw. spritzwasserfest sein<sup>68</sup>.

<sup>66</sup>siehe dazu [29, Kapitel 8.5.2 Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit]

<sup>67</sup>siehe dazu [116, Kapitel 5.2 Eignungsprüfungen]

<sup>68</sup>Für das Prüfgerät und die Qualitätsplattform wurden bereits Machbarkeitsstudien durchgeführt, die aber auf Grund des Urheberrechts des Entwicklungsteams in dieser Arbeit nicht veröffentlicht werden können.

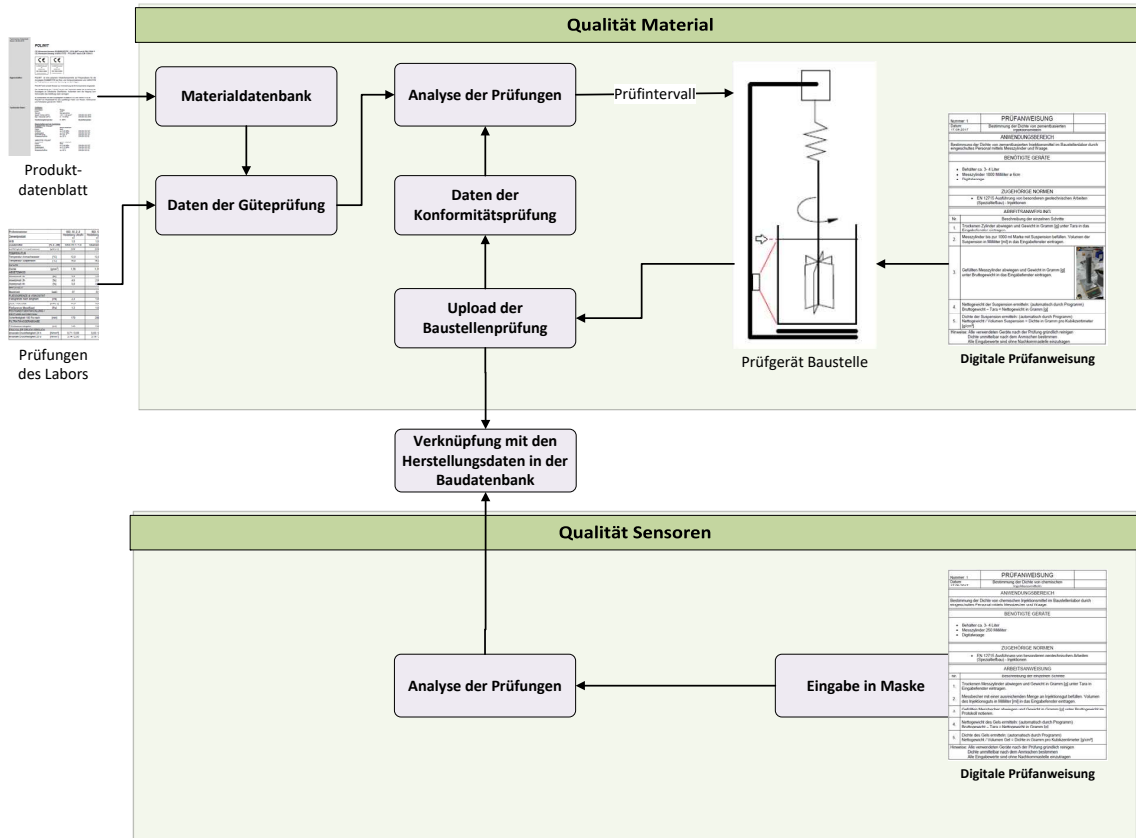


Abb. 7.8: Digitales Qualitätsmanagement von Injektionsmitteln im Überblick

Essentiell ist in diesem Kontext vor allem die einfache, intuitive Bedienung des Prüfgerätes. Dies beinhaltet eine leichte Reinigung, die Möglichkeit einer Bedienung über nur einen Knopf, vereinfachte und vor allem nur wenige Arbeitsschritte sowie die Etablierung eines standardisierten Prüfprozesses. Die Abb. 7.8 zeigt das Schema der direkten Vernetzung als grundlegenden Bestandteil des digitalen Qualitätsmanagement. Die Materialdatenbank und die Verknüpfung mit den Produktdatenblättern gewährleisten einen optimalen Einsatz und einen möglichen Vergleich der Materialien bereits beim Auswahlverfahren. Planern und Ausführenden kann durch einen Vergleich der wesentlichen Parameter mit Hilfe von graphischen Auswertungen die herstellerübergreifende Auswahl von Materialien erleichtert werden.

In einem Ausführungsprojekt wird durch die Verknüpfung der Materialdatenbank mit dem Baustellenprüfgerät und dem standardisierten, geführten Prüfprozess, der über eine Webapplikation ermöglicht wird, ein ständiger Soll-Ist Vergleich erreicht. Standardisierte Prüfanweisungen für alle gängigen Prüfungen von chemischen und zementgebundenen Injektionsmitteln wurden in einer vom Autor betreuten Forschungsarbeit bereits angefertigt [61]. Exemplarisch ist eine Prüfanweisung, die in dem digitalen Prüfprozess integrierbar wäre, in Abb. D.1 auf Seite 303 dargestellt. Der automatische Upload der Daten des Prüfgeräts und das Modul zur Detailauswertung der Tests minimieren die Fehleranfälligkeit während des Prozesses und

ermöglichen eine statistische Analyse der Ergebnisse. Ein implementierter Freigabeprozess, sowie die Schaffung von standardisierten Prüfprotokollen und einer Schnittstelle zum Datenmanagementsystem der Herstellungsdaten ermöglichen die zeitlich und räumlich exakte Zuordnung der Parameter der Prüfung zu den Bauteilen im Untergrund. Diese Speicherung erlaubt über die Ausführungsphase hinweg die Klärung von Gewährleistungsfragen und Instandhaltungsmaßnahmen.

### 7.2.3 Visualisierung

Visualisierungen von Herstellungs- und Qualitätsdaten und den damit verbundenen Prozessen helfen bei der Planung und Ausführung von Bohrungen und Injektionen. Die Prozessvisualisierung ist ein Teil des Bauprozessmanagements und wurde bereits in Abschnitt 7.2.1 diskutiert. Im Spezialtiefbau werden Visualisierungen von Herstellungs- und Qualitätsdaten als Kommunikationshilfsmittel verwendet. Dabei dient die Verknüpfung von Plänen mit farblichen Kodierungen als gemeinsame Sprache. Es wird das Verständnis erhöht und die Aufmerksamkeit auf Probleme gerichtet, die in Interaktion der Planer mit den Ausführenden zu lösen sind.

Grundsätzlich kann bei Baustellenvisualisierungen von zwei Kategorien ausgegangen werden. Bei Injektionsmaßnahmen bei Infrastrukturprojekten wie Tunnel, sogenannten Linienbauwerken, ist eine Visualisierung in mehreren Ebenen erforderlich. Die Anforderungen der Interessensvertretungen zeigten, dass die Herstellungsdaten in sequenzierten Darstellungsformen überprüfbar und übersichtlich gemacht werden sollen. Bei Baufeldern mit stationären Baumaßnahmen, wie etwa der Herstellung von Weichgelsohlen wird eine Visualisierung im Lageplan bevorzugt.

Die baubegleitende digitale Visualisierung spannt den Bogen von Planung und Arbeitsanweisung bis hin zu Abarbeitung und Freigabe von Injektionsstellen. Das frühzeitige Erkennen von Störzonen, Problemstellen, Bereichen großer Mengenaufnahmen und Ausbreitung ist bei den Darstellungen wichtig, um den technischen Erfolg gewährleisten zu können. Außerdem wird es durch die Entwicklung von Visualisierungen in Echtzeit möglich, Arbeitsprozesse zu steuern, zu kontrollieren und zu analysieren.

Das Modell des digitalen Injektionsdatenmanagements sieht zur Erfüllung aller Anforderungen ein 5-stufiges Konzept für die ausführungsbegleitende Visualisierung vor:

- Erstellung eines Grundgerüsts für die Visualisierung, Festlegung der Konfigurationen und Darstellungsebenen (einmalig)
- Eingabe der Plandaten (kontinuierlich oder einmalig je nach Ausführungskonzept)

- Digitale Anweisung der Injektions- und Bohrdaten
- Erfassung des Ist-Stands in Echtzeit
- Vergleich des Soll-Ist

Baubegleitende Visualisierungen, die den aktuellen Stand jederzeit widerspiegeln, dienen als Kommunikationsbehelf zwischen Bauaufsicht und Unternehmen, der Übersichtlichkeit von aktuellen Tätigkeiten bei langgestreckten Injektionsabschnitten und der Lokalisierung von Herstellungsdaten.

## 7.3 eguana SCALES

Im Zuge des Forschungsprojektes „Automatisches Qualitätsmanagement für die Bau- und Umwelttechnik“ mit der FFG-Projektnummer 860440, indem der Autor für Literaturstudien, Anforderungsanalysen, die Grundlagenforschung der Analyse- und Auswertungsalgorithmen, Feldtests sowie die Dissemination verantwortlich war, wurde das digitale Prozessmodell in das Datenmanagementsystem für die Injektionstechnik, eguana SCALES, implementiert. Die, der Webapplikation zu Grunde liegenden, Abläufe sind in diesem Kapitel dargestellt.

### 7.3.1 Das Forschungsprojekt

Die eguana GmbH<sup>69</sup> wurde am 17. Jänner 2015 mit Firmensitz in Wien gegründet. Das Gründungsteam besteht aus vier international erfahrenen Hardware- und Softwareentwicklern und Projektleitern, welche über einen gemeinsamen Erfahrungsschatz im Bereich sicherheitskritischer Embedded Systems und IT-Systeme von mehr als dreißig Jahren verfügen. Der Fokus der eguana GmbH liegt auf der Entwicklung von Lösungen für Bauprozessmanagement, der Verwaltung von Bauprozessdaten und Baudaten-Monitoring für den Tief- und Tunnelbau. Das Unternehmen hat mehrere wichtige Kooperationen mit Unternehmen wie der Züblin Spezialtiefbau GmbH, der Renesco-Marti Geotechnik GmbH und der Porr Spezialtiefbau GmbH.

In einem von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unterstützten Projekt mit dem Titel: „Automatisches Qualitätsmanagement für die Bau- und Umwelttechnik“ arbeitete das Unternehmen eguana mit dem Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik in der Projektlaufzeit von Jänner 2016 bis März 2018 acht Arbeitspakete ab. Insbesondere beim Arbeitspaket 2 – Analyse- und Auswertungsalgorithmen brachte sich der Autor der gegenständlichen

<sup>69</sup>Informationen zum Unternehmen und dessen Leistungen sowie Blogbeiträge können unter [www.eguana.at](http://www.eguana.at) eingesehen werden.

Forschungsarbeit innerhalb des Projektes ein. Die Entwicklung umfasste im ersten Jahr die Analyse der Daten und Datenformate im tradierten Dokumentationsprozess, die Definition und Analyse der Datenströme sowie die Entwicklung kompakter und übersichtlicher Basisdarstellungsformen. Im zweiten Forschungsjahr wurde in diesem Arbeitspaket auf die Entwicklung automatischer Echtzeitanalysen und die Modalitäten der automatischen Abrechnung fokussiert. Feldstudien auf Baustellen brachten wichtiges Feedback der Benutzer und weitere Entwicklungsmöglichkeiten von Funktionalitäten.

Ziel des Forschungsprojektes war es, ein drahtloses Monitoringsystem zu entwickeln, das es ermöglicht, den gesamten Arbeits- bzw. Herstellungsprozess zu erfassen. Die Basisplattform sollte dabei entsprechend den individuellen Anforderungen der Benutzer adaptierbar sein. Die wichtigste Zielsetzung war es, die Messwerte nicht nur digital zu sammeln, sondern darüberhinaus konkrete Aussagen im Hinblick auf den Baufortschritt, etwaige Fehler und Mängel zu ermöglichen. Die Qualität der Baumaßnahmen, sowie Verbrauchsmengen und Maschinenzustände wollte man dabei in Echtzeit auswerten und in einer Plattform darstellen. Auf Basis der extrahierten Sensordaten und intelligenter Algorithmen sollten die neue Hard- und Software die vorhandenen Qualitätssicherungs- und Überprüfungs-Prozesse im Baustellenbereich verbessern. Das Ziel der wesentlichen Administrationserleichterung im Vergleich zum tradierten Dokumentationsprozess wurde stets verfolgt.

Innerhalb des Forschungsprojektes konnten folgende drei Fragen beantwortet werden:

- Welche Anforderungen ergeben sich durch die unterschiedlichen Interessensvertretungen?
- Welche Bestandteile benötigt ein Datenmanagementsystem im Tiefbau, um konkrete Aussagen im Hinblick auf den Baufortschritt und die Bauqualität treffen zu können?
- Welche Komponenten (Soft- und Hardware) und Berechnungen müssen dafür wie entwickelt werden?

Das Projekt umfasste im wesentlichen zwei Kernkomponenten:

- NODE, eine intelligente, drahtlose Logik- und Messeinheit, welche die Integration von Sensoren, Aktoren und Drittsystemen ermöglicht.
- SCALES, eine Analyse- und Auswertungssoftware, welche Daten aus unterschiedlichsten Quellen miteinander verknüpft und darstellt. Das System ist als Expertensystem konzipiert und hilft dem Benutzer, die Baudaten in anschaulicher und verständlicher Weise zu analysieren.

Die Planung der Systemkomponenten umfasste:

- **Drahtlose Kommunikation**, die durch Entwicklung geeigneter Kommunikationsprotokolle und Methoden zur Störungskompensation eine zuverlässige Datenübertragung gewährleistet. Dazu besitzt der NODE einen zusätzlichen Speicher, in dem Messwerte bei einem Verbindungsausfall temporär gespeichert werden.
- **Schutz vor Datenmanipulation** mit Hilfe von kryptologischen Verfahren. Manuelle Korrekturen an den Daten sollen zwar weiterhin möglich sein, jedoch werden diese protokolliert. Im Weiteren muss durch den Benutzer eine Begründung für die Datenkorrektur angeführt werden. Dies gilt gleichermaßen für das nachträgliche Löschen oder Einfügen von Datensätzen.
- **Benutzerfreundliche Bedienung** über eine browserbasierte Oberfläche und jedes HTML-fähige Endgerät wie PC, Notebook, Smartphone oder Tablet. Es soll keine proprietäre, betriebssystemabhängige Auswertungssoftware installiert werden müssen. Bei Problemen mit zusätzlichem Klärungsbedarf müssen nicht mehr Protokolldateien manuell weitergegeben werden. Ein einfacher Link auf die entsprechenden Datensätze sowie eine entsprechende Freigabe genügen. Im Weiteren kann der Adressat die Daten nicht mehr nur isoliert betrachten, sondern auch im umgebenden Kontext. Auf diese Weise lassen sich frühzeitig Abweichungen von der geplanten Ausführung erkennen und es können gemeinsam mit den Interessensvertretern entsprechende Korrektur-, Anpassungs- oder Zusatzmaßnahmen einfach und unkompliziert erarbeitet und kommuniziert werden.
- **Echtzeit-Datenanalyse, Prognosen und Alarme** durch Implementierung von Prüfalgorithmen. Zusätzlich sollen Prognosen betreffend Verbrauchsmengenmanagement, Baufortschritt und Qualität der Baumaßnahmen in Echtzeit erstellt werden. Fehler, die sich aus der manuellen Aufbereitung und der Konvertierung der Daten ergeben können, müssen ausgeschlossen werden.
- **Offene Schnittstellen und Systemintegration** durch Dokumentation der System-schnittstellen und Weitergabe der Daten in übergeordnete und untergeordnete Systeme.

Die Entwicklung der Messeinheit NODE wurde von eguana selbstständig durchgeführt und bildet die Grundlage für die drahtlose Übertragung unterschiedlicher Messdaten in die Datenbank der Webapplikation. Der Datenlogger ermöglicht die digitale Verfügbarkeit der Baudokumentation und ist die Hardwarekomponente zwischen Sensorik, Steuerung und dem Baudatenmanagement. Die Erfassung zusätzlicher Maschinendaten, die nicht über Steuerungen erfasst werden, eigenständige Messwerte wie Temperatur oder Wasserpegel, sowie die Erfassung von Arbeitsvorgängen sind die drei unterschiedlichen Anwendungsfälle für die Messeinheit. Für die Datenübertragung wurden grundsätzlich das Format JavaScript Object Notation (JSON) eingesetzt, bei Systemen mit Speicherlimitierung das Format Concise Binary Object Representation (CBOR). Der Datenlogger verfügt über drei Steckverbindungen, eine Statusanzeige via LED sowie eine Antennensteckverbindung. Der Logger, abgebildet in Abb. 7.9 ist mit unterschiedlichen kabellosen Übertragungstechnologien ausgestattet.



Abb. 7.9: Messeinheit NODE

Die Software eguana SCALES ermöglicht die Standardisierung des Dokumentationsprozesses und wurde aufbauend auf die Anforderungsanalyse in Kapitel 6 entwickelt. Die Beschreibung erfolgt in Abschnitt 7.3.2 und Abschnitt 7.3.3.

### 7.3.2 Aufbau

Die Webapplikation wird auf der unternehmenseigenen Domain eguana.io betrieben. Die Authentifizierung erfolgt über ein Simple Authentication and Security Layer (SASL)-Protokoll. Registrierte Benutzer müssen dazu in einem ersten Schritt ihre E-Mail Adresse verifizieren. Erst nach dieser Bestätigung wird ein neuer Account aktiviert. Beim Anmeldevorgang wird ein Benutzername bzw. eine E-Mail-Adresse und ein Passwort benötigt. Nach erfolgreichem Login wird dem User ein Authentifizierungstoken zugeordnet, welcher bei jeder Anfrage an den Server überprüft wird. Meldet sich der Benutzer über ein anderes Gerät erneut an, wird der alte Token automatisch ungültig.

Direkte Datenbankabfragen sind in diesem Datenmanagement nicht erlaubt. Alle Abfragen werden am Server in spezifischen Funktionen abgearbeitet. Es ist somit nicht möglich, missbräuchliche Datenbankstatements über Server-Requests in der Datenbank auszuführen, und auf diese Art und Weise Daten zu manipulieren oder zu löschen. Alle durch Benutzer durchgeführten Änderungen werden mit Zeitpunkt und Useridentifikation in der Datenbank gespeichert. Dies führt zu einer vollständigen Nachvollziehbarkeit. Als weitere Sicherheit wer-



den kundenspezifische Datenbanken und Serverapplikationen eingesetzt, welche in getrennten Containern laufen. Daten von unterschiedlichen Mandanten sind damit strikt voneinander getrennt und Benutzer haben exklusive Zugriffsrechte auf die eigenen Daten. Die Umleitung der Datenbankabfragen zu den jeweiligen Serverapplikationen erfolgt automatisch am Server.

Hierarchiestufen auf Benutzerebene wurden eingeführt, damit unterschiedlichen Interessensvertretern der Zugriff auf das System ermöglicht wird. Die Stufen werden in drei Ebenen geteilt, wobei feinere Unterscheidungen innerhalb einer Ebene durch spezifische Rechtevergabe, sogenannte Feature-Flags, möglich sind.

- **Prime:** Kann als Administrator seines Unternehmens angesehen werden. Er darf Baustellen und Gewerke erstellen, Benutzer verwalten und projektspezifische Einstellungen verändern.
- **Manager:** Der Bauleiter hat Zugriff auf alle Daten der ihm zugewiesenen Bauvorhaben und kann die Einstellungen dieser Vorhaben in einem reduzierten Rahmen anpassen.
- **Viewer:** Hierarchiestufe für Planer, Auftraggeber oder Bauüberwachungen in einem Bauprojekt. Diese Benutzer haben Lesezugriff auf zugewiesene Projekte, können aber keine Änderungen vornehmen. Daten des Bauvorhabens können erst nach erfolgter Freigabe durch einen Bauleiter eingesehen werden.

Die Hauptansicht der Webplattform ist in Abb. 7.10 zu sehen<sup>70</sup>. Im **Baustellen-Cockpit** werden die persönlichen Widgets dargestellt, die Daten zu Prozessmanagement, kalkulatorische Mittelwerte, KPIs einzelner Baustellen, Wetterinformationen und Leistungsüberblicken beinhalten. Darüber hinaus gibt es die Funktion **Evaluator**, die Suchen nach Namen und Label ermöglicht sowie KPIs berechnet. Der Benutzer kann zu den für ihn freigegebenen Baustellen über die links abgebildete Auflistung navigieren.

<sup>70</sup>In der Arbeit wird der Entwicklungsstand vom Juli 2019 beschrieben. Im Sinne einer agilen Entwicklung werden kontinuierliche Module und Funktionen ergänzt und weiterentwickelt.

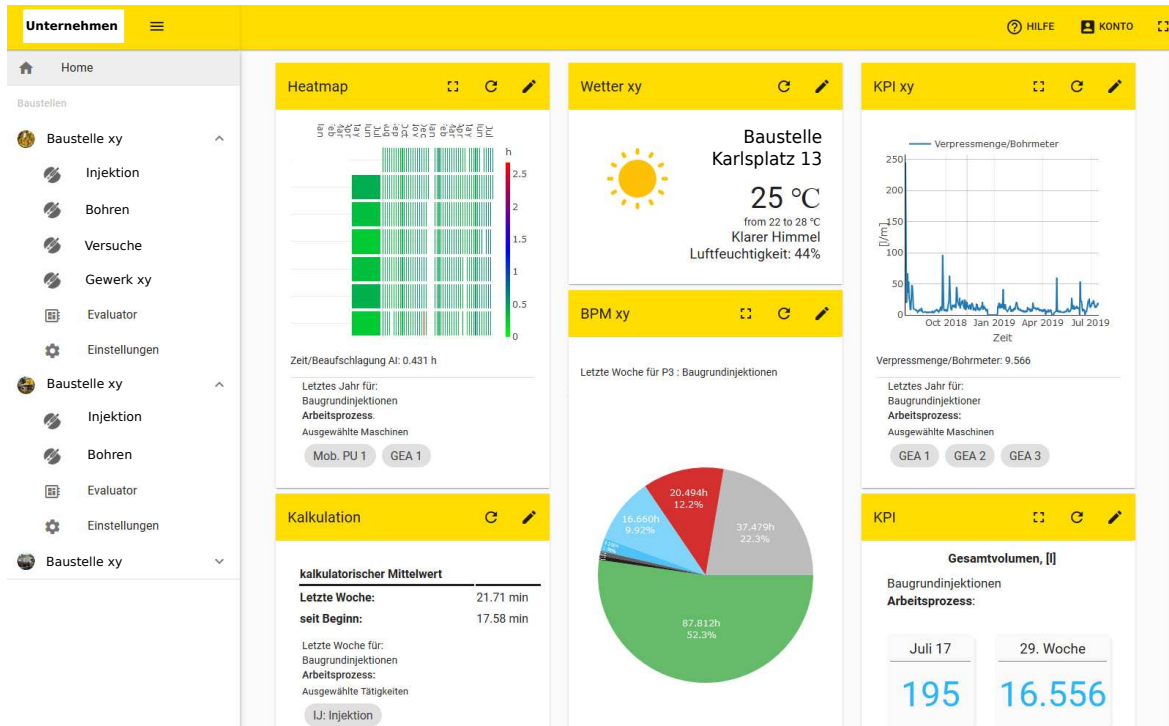


Abb. 7.10: Baustellennavigation und Widgets in euana SCALES

In der Ebene der Arbeitsprozesse werden fünf Module sichtbar, auf die in Abschnitt 7.3.3 eingegangen wird.

- **Daten:** Plan- und Rohdatenupload<sup>71</sup>, Datenkontrolle, Filteroptionen, Freigabeoption, Protokollerstellung
- **Prozessmanagement:** Prozessverwaltung und Dokumentation, Balkendiagramme und Kreisdiagramm von Prozesszeiten pro Anlage und Maschine, Gleichzeitigkeiten der laufenden Maschinen, Aktivitätentrends
- **Aufmaß:** Automatische Zuordnung und Zählung der Vordersätze von Leistungspositionen aus den freigegebenen Daten und dem Prozessmanagement
- **Visualisierung:** Lageplan mit GIS-Positionierung und weiteren Abstraktionsebenen, Rückkoppelung zu Detailverläufen, Injektionsfestlegungen und Arbeitsanweisungen
- **Materialien:** Materialmanagement, Eingabe der Mischdaten, Eingabe von Materiallieferungen und Inventur

In den Einstellungen zu einzelnen Arbeitsprozessen werden Randbedingungen für die fünf Module definiert. Für die Kontrolle der Verläufe sind innerhalb der Einstellung unterschiedliche

<sup>71</sup>Diese Funktion wird nur benötigt sofern dies nicht automatisch möglich ist. Der Rohdatenupload wird erforderlich, sofern keine stabile Internetverbindung zwischen den Sendeinheiten der Baugeräte und dem Webplattformserver besteht. Plandaten müssen gegebenenfalls während der Bauausführung aktualisiert werden.

**Tab. 7.5:** Die wichtigsten Parameter der Datenkontrolle von Injektions- und Bohrverläufen

Parameter	Bohren	Injizieren
Identifikation	Bohrlochnummer	Verpresstelle
Typ	Art der Bohrung	Art der Injektion
Material	–	Injektionsmischung
Einheit	Tiefe der Bohrung	Volumen Injektionsmischung
Maschine	Bohrgeräteidentifikation	Pumpenidentifikation
Steuerungsparameter	Maximaldrücke, Vorschubgeschwindigkeit	Haltedauer, Mindest- und Maximalflussraten und -drücke, Maximalmenge, GIN Faktor
Messtoleranzen	Bohrabweichungen	Mischungsverhältnis der Komponenten
Zeit	Zeitstempel von Beginn und Ende des Vorgangs	
Dauer	Zeitdauer des Vorgangs	
Kommentar	Manuelle Ergänzungen zum Vorgang	
Plan	Verweis auf die Plannummer	
Freigabe	Vermerk, ob die Verläufe kontrolliert wurden	
Status	Klassifikation des Vorgangs aus der Steuerung	
Label	Baustellenbezogene Klassifikation der Vorgangsdaten	

Parameter wählbar, die in der Datentabelle sichtbar gemacht werden. Die wesentlichen Parameter für Injektionsarbeiten sind in Tabelle 7.5 dargestellt und hängen von der integrierten Bohr- und Injektionssteuerung ab. Der Vorgang der Datenkontrolle wird in Abschnitt 7.3.3 erklärt.

In den Einstellmöglichkeiten zu Anlagen und Maschinen werden die Pumpen und Bohrgeräte definiert, von denen die Daten stammen. Maschinen können zu Gerätekombinationen zusammengestellt werden, die bei den Prozesszeitanalysen aggregierte Betrachtung ermöglichen.

Für die gezielte Suche und Analyse von Daten werden die Status, Kommentare und Labels vordefiniert, die bei der Datenkontrolle ausgewählt werden können. Die Status werden nach den vordefinierten Bezeichnungen der Steuergeräte übernommen und definieren, ob ein Arbeitsprozess von der Steuerung laut den Steuerungsparametern abgefahren, ein manueller Abbruch durchgeführt wurde oder eine Störung der Technik vorlag. In der Kommentarfunktion können die Vermerke, die durch das gewerbliche Personal festgestellt wurden, beschrieben und dem Arbeitsprozess zugeordnet werden. Beispielsweise kann der Status des manuellen Abbruchs

durch die Kommentarfunktion weiter präzisiert werden. Labels dienen der baustellenbezogenen Klassifikationen von Vorgängen für spätere Analysen und Zuordnungen.

Die Standardeinstellungen für die Definition der Prozesszeiten eines Arbeitsprozesses werden unter dem Reiter „Tätigkeiten“ definiert. Diese helfen, das von den Gerätedaten abhängige Prozessmanagement auszufüllen. Es können die Herstellungstätigkeit, Unterbrechungen, Start- und Endtätigkeiten und deren maximale Dauern vorkonfiguriert werden. Die Definition der Standardtätigkeit dient der automatischen Zuordnung im Bauprozessmanagement, sofern keine anderen Prozesse in diesem Zeitraum definiert werden.

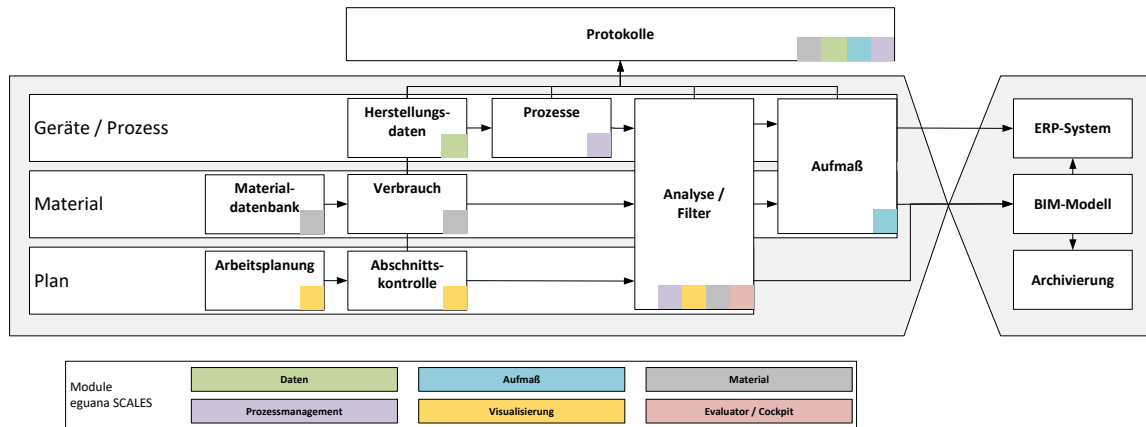
In den Einstellungen zum Aufmaß können die Leistungspositionen aus dem Vertrag eingegeben und die Konfiguration für die automatische Zuordnung aus der Datentabelle und den Prozesszeiten für die Berechnung der Vordersätze gebildet werden. Die Zuordnung für Zeiten, wie beispielsweise bei Verpressbetriebsstunden, berücksichtigt, ob sich der Filter auf Maschinen oder Anlageebenen bezieht. Des Weiteren werden, abhängig von der Tätigkeit, Materialmengen-zählungen bzw. Abrechnungen per Stück erzeugt. Die Konfiguration ist zusätzlich so konzipiert, dass weitere Filtermöglichkeiten zur Verfügung stehen. Es können bei der Abrechnung nur spezielle Maschinen, Anlagen, Materialien und Tätigkeiten einbezogen werden. Über die Identifikationsnummer der Herstellungsvorgänge können mittels Nomenklatur-Level und Regular Expression (Regex)-Filter weitere Einschränkungen vorgenommen werden.

Die Materialdatenbank dient zur Eingabe der Komponenten für Mischungen von chemischen und zementbasierten Injektionsmitteln. Dabei werden zuerst die Einzelkomponenten im Reiter „Materialien“ eingegeben, die anschließend zu Mischungen laut der vorgegeben Güteprüfungen zusammengestellt werden können. Die Eingabemaske unterscheidet dabei zwischen zementbasierten und chemischen Injektionsmitteln. Aufgrund der unterschiedlichen Angaben der Hersteller ist eine Mischungszusammenstellung nach Massen oder Volumen möglich.

Die Definition der Schichtzeiten ermöglicht eine differenzierte Betrachtung nach Tag- und Nachtschichten in den Analysen. In den Einstellungen „Protokoll“ werden Kopfzeile, Unterschriftenfelder, anzuzeigende Parameter und Zusammenfassungen für Injektionsprotokolle und Tagesprotokolle, nach den Anforderungen des AGs, definiert. Darüber hinaus stellt das System Berichte mit örtlicher Zuweisung, Zeitreports aus dem Prozessmanagement und Aufmaßblätter im PDF-Format zur Verfügung.

### 7.3.3 Funktionen

Die Funktionen von eguana SCALES gliedern sich in fünf Hauptbestandteile je Arbeitsprozess und die übergeordneten Funktionen des Baustellen-Cockpits und Evaluators. Dabei greift das System auf drei grundsätzliche Datenquellen zurück. Die Herstellungs- und Gerätedaten bilden



**Abb. 7.11:** Datenverarbeitung und Module in eguana SCALES

die Grundlage für das Prozessmanagement. Daten der zu verbauenden Materialien bilden die Materialdatenbank, aus der die Mischungen zusammengestellt werden. Die Ausführungsdaten und Injektionsfestlegungen bilden den Ursprung für die Arbeitsplanung und die planbasierten Arbeitsanweisungen. Durch die Verknüpfung der drei Datenquellen können Analysen und Filter gebildet werden, die entweder direkt in übergeordnete Systeme und Modelle übernommen, oder in der automatischen Aufmaßerstellung weiterverwendet werden können. Die offenen Schnittstellen der Webplattform zu ERP-Systemen und BIM-Modellen gewährleisten den digitalen Übertrag der Baudaten. Als Zwischenschritt im Entwicklungsprozess werden durch die einzelnen Module von eguana SCALES Berichtsoptionen im PDF-Format oder CSV-Format angeboten. Der Aufbau des Datenverarbeitungsprozesses in der Plattform ist in Abb. 7.11 dargestellt. Ersichtlich ist dabei, dass die Module unterschiedliche Aufgaben im Datenverarbeitungsprozess erfüllen.

## Daten

Dieses Modul gewährleistet die kontinuierliche Kontrolle der Daten. Diese werden entweder, wie in Abb. 7.3 dargestellt, direkt an die hinterlegte Datenbank übermittelt, oder mittels Datenupload von einem Speichermedium eingespielt. Beim Upload der Daten werden die wichtigsten Integritätsabfragen durchgeführt. Diese umfassen die Abfrage der passenden Nomenklatur der Datenpunkte zu den Baustellendefinitionen und ob das Datenformat den definierten Maschinengruppen entspricht. Können Datensätze nicht zugeordnet werden, verbleiben diese in einem Rohdatenspeicher. Damit ist gewährleistet, dass weder Daten doppelt vorliegen, noch verloren gehen.

In der Hauptansicht können die Einträge von bestimmten Tagen und Zeiträumen eingesehen und bearbeitet werden. Hierzu wählt man den gewünschten Zeitraum über den Kalender aus. In der Ansicht erscheinen die Datensätze, die mit einem Farbschema belegt sind. Dadurch wird es ermöglicht, Fehler unterschiedlicher Injektionstypen visuell in der Datenansicht zu unterscheiden und Messungenauigkeiten hervorzuheben. Bei Klick auf einen Datensatz wird

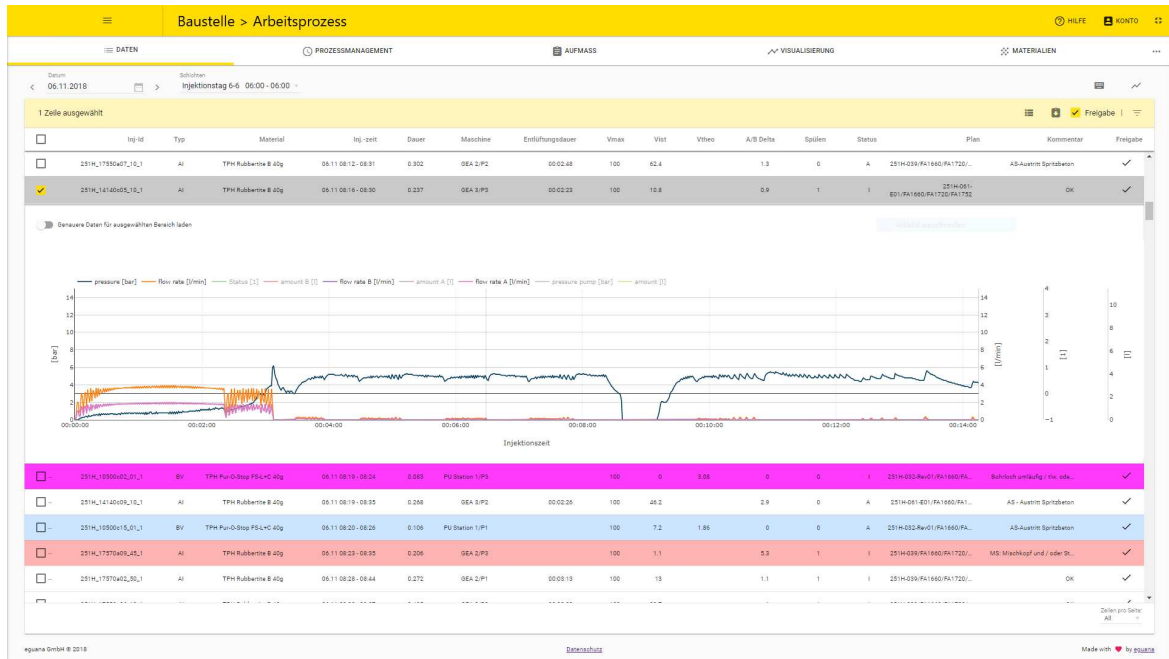


Abb. 7.12: Ansicht Modul Daten mit Detailansicht eines Injektionsverlaufs

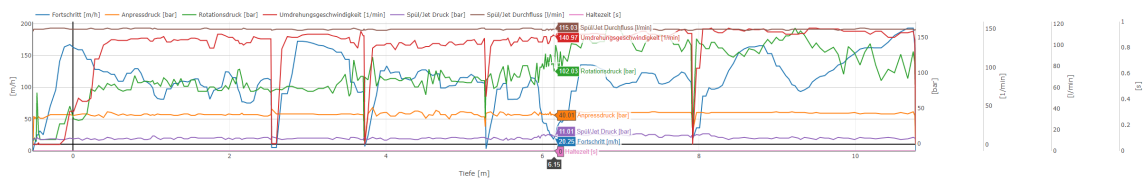










Abb. 7.13: Detailansicht eines Bohrverlaufs

der Herstellungsverlauf dargestellt. In Abb. 7.12 ist ein Injektionsverlauf mit Druck und Flussrate abgebildet, Abb. 7.13 zeigt einen Bohrvorgang beim Düsenstrahlverfahren (DSV). Durch An- und Abwählen der gewünschten Parameter können die Verläufe personalisiert dargestellt werden, mit der Zoomfunktion werden Detailansichten von Verläufen ermöglicht. Beim Kontrollvorgang müssen täglich eine Vielzahl von Messwerten durch den Bautechniker überprüft werden. Tastaturkurzbefehle helfen dem Benutzer beim schnellen Navigieren und Freigeben der Datensätze. Sollten Datensätze beispielsweise durch Stromausfälle fehlen, können diese nachträglich hinzugefügt werden. Bearbeitete Einträge sowie manuell hinzugefügte Datensätze müssen jedoch mit einem Kommentar versehen werden, damit die Daten transparent dargestellt werden und die Bauaufsicht manuelle Änderungen nachvollziehen kann.

Nach vollständiger Überprüfung eines Datensatzes kann dieser freigegeben werden. Dieser Vorgang bewirkt, dass die Daten für Prozessmanagement und Abrechnung berücksichtigt werden können und der Datensatz nicht mehr weiter bearbeitet oder kommentiert werden kann. Der Freigabeprozess ist eine wesentliche Funktion des Baudatenmanagements, da dadurch gewährleistet wird, dass die technisch und vertragsrelevanten Daten im Nachhinein

Tab. 7.6: Icons im Modul Daten

Icon	Beschreibung der Funktion
	Upload von Daten und Messwerten bei fehlender Direktübertragung
	Hinzufügen von fehlenden Herstellungsvorgängen
	Anzeigen der einzelnen Messwerte
	Bearbeiten eines Eintrags, beinhaltet die Eingabe von Kommentaren und die Änderung von Bezeichnungen
	Filtern der Datensätze nach Suchbegriff oder Parameter der Datenkontrolle
 Freigabe	Bestätigen der erfolgten Kontrolle und Freigeben der Datensätze für weitere Verarbeitung
	Ausgeben der Injektionsprotokolle im PDF- und CSV-Format
	Ausgeben der Tagesprotokolle, Anlagen- und Pumpenübersichten im PDF- und CSV-Format, Automatische Weitergabe auf externe Projektplattform

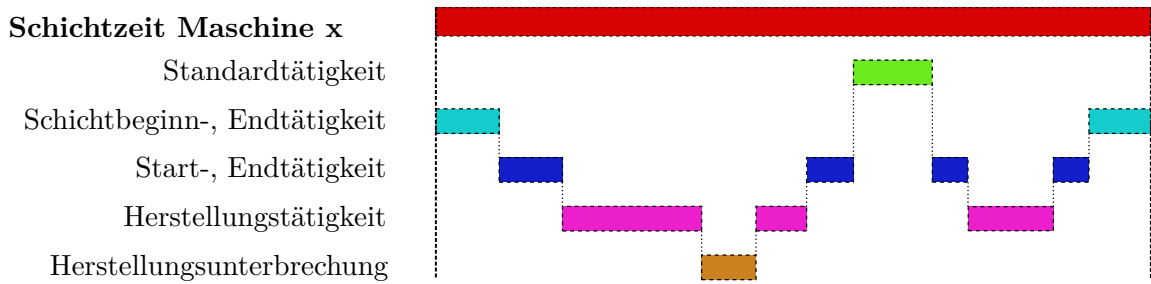
nicht mehr geändert werden können und dadurch keine redundanten Datenpunkte entstehen.

Die wichtigsten Icons, die im Modul Daten abgebildet sind, werden in Tabelle 7.6 aufgelistet und hinsichtlich der Funktion beschrieben. Die dargestellte Reihenfolge, beginnend beim Upload, bis hin zur Erstellung der Tagesübersichten, beschreibt den standardisierten Workflow wie Benutzer die Daten aufbereiten. Die Funktion zum Druck der Protokolle stellen eine Übergangslösung dar und sollten durch einen beidseitig digitalen Freigabeprozess ersetzt werden.

### Prozessmanagement

Im Modul Prozessmanagement werden die freigegeben Gerätedaten hinsichtlich der Prozesszeiten schichtweise aufbereitet. Dazu können, angepasst an den Arbeitsprozess, Tätigkeiten mit Prioritäten definiert werden.

In eguana SCALES ist für jeden Arbeitsprozess eine standardisierte Sequenzierung hinterlegt. Diese ermöglicht es, auf Grundlage der Herstellungsdaten einen Prozessvorschlag je Maschine zu bilden, der durch den Benutzer weiter verfeinert werden kann. Der Prozessvorschlag je Maschine ermöglicht es, die Prozessdokumentation schnell zu vervollständigen. Abb. 7.14



**Abb. 7.14:** Sequenzierung für eine Maschine pro Schicht

zeigt die sieben Verwendungsgruppen. Ausgehend von den geloggtten und freigegebenen Zeiten einer Beaufschlagung oder eines Bohrlochs ergibt sich die Prozesszeit für die Herstellungstätigkeit. Wird die Herstellungstätigkeit unterbrochen und danach wieder fortgesetzt, so wird eine Herstellungsunterbrechung definiert. Vor Beginn eines Herstellungsvorgangs kann eine Starttätigkeit notwendig sein. Endtätigkeiten nach einem Herstellungsvorgang schließen einen definierten Herstellungsprozess ab. Am Beginn und am Ende der definierten Schichtgrenzen können Zeiten für Tätigkeiten definiert werden. Für die Verwendungsgruppen können Maxima definiert werden, die sich aus Erfahrungswerten oder vertraglichen Aspekten ergeben. Beispielsweise können die dadurch vergütbaren Herstellungsunterbrechungen nach Abschnitt 6.2.2 von anderen Prozessen unterschieden werden. Die Standardtätigkeit füllt die Lücken im Prozess aus, die nicht durch andere Verwendungen belegt werden. Bei der Kontrolle der Maschinenprozesse können die Standardtätigkeiten auf Grund der Beobachtungen aufgeteilt und weiter verfeinert werden.

Nutzer definieren unabhängig von den Verwendungsgruppen die Bohr- und Injektionstätigkeiten nach deren Bedürfnissen. Eine Auflistung von typischen Tätigkeiten ist in Tabelle 7.7 zu sehen. In den Einstellungen zu den Prozesszeiten wird jeder Tätigkeit eine Priorität, Farbwahl und Verwendungsgruppe zugewiesen. Die Festlegung der Priorität spielt eine entscheidende Rolle für die Aggregation der einzelnen Maschinenprozesse zu definierten Anlagengruppen. Prozesse mit höherer Priorität<sup>72</sup> überschreiben bei der Aggregation Prozesse mit niedrigerer Priorität. Mit Zuweisung zu den Verwendungsgruppen wird mit den definierten Tätigkeiten der Prozessvorschlag je Maschine erstellt, der danach durch das Baustellenpersonal weiter verfeinert oder kontrolliert wird.

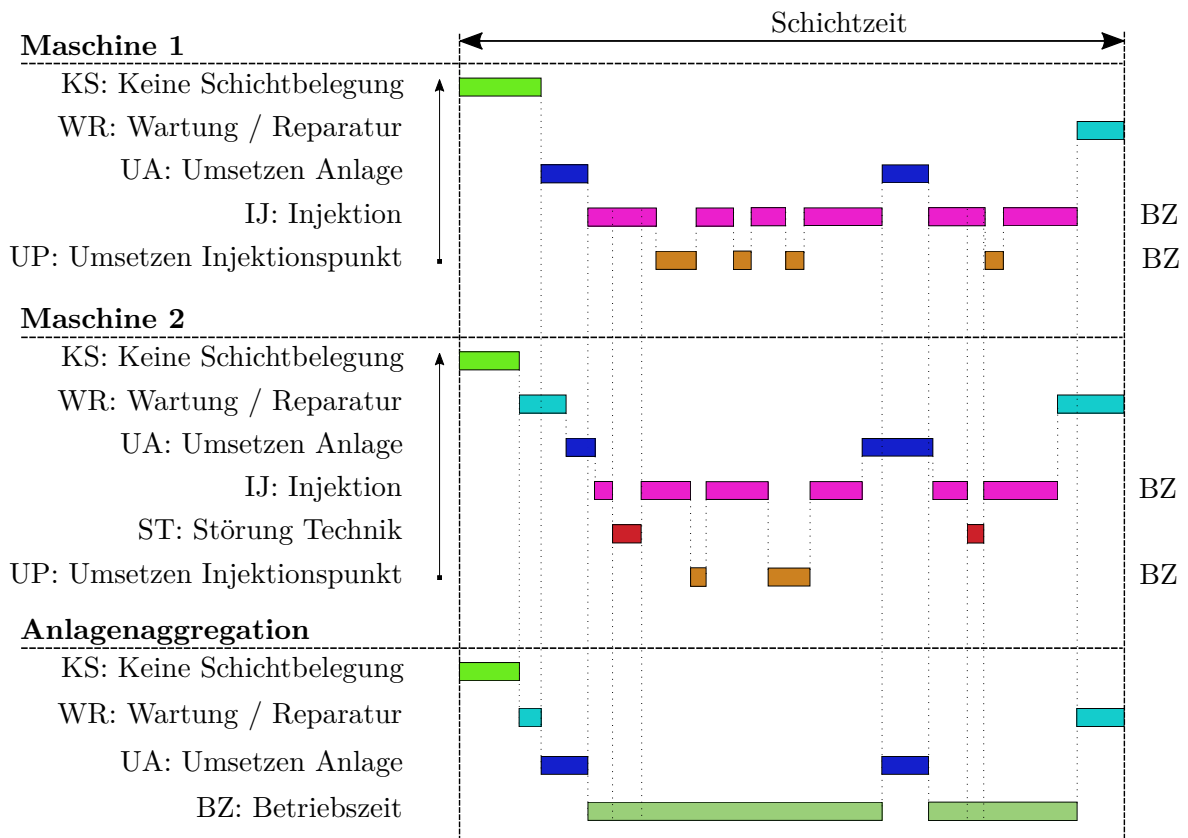
Die Anlagenbetriebszeit spielt für die Bewertung der Produktivität sowie für alternative Vertragsabwicklungen eine wichtige Rolle. Deshalb wurde im System eine Funktion für die Zusammenfassung von Tätigkeiten zur Anlagenbetriebszeit implementiert. In den Einstellungen können für jede Anlage die Tätigkeiten der Maschinen definiert werden, die in die Berechnung der Betriebszeit eingehen. Bei Injektionsarbeiten sind dies die Injektionszeiten IJ und Umsetzzeiten UP von Punkt zu Punkt. Bei den Umsetzzeiten werden die Tätigkeiten „Packer Setzen“ und „Packer Ausbauen“ zumeist in einer Tätigkeit zusammengefasst. Die

<sup>72</sup>Eine höhere Priorität entspricht im System einem höheren Rang und einer niedrigeren Zahl.



**Tab. 7.7:** Beispiele von Bohr- und Injektionstätigkeiten mit typischer Zuordnung zu einer Verwendungsgruppe

<b>Verwendung</b>	<b>Bohren</b>	<b>Injektion</b>
Schichtbeginn	Ü: Übergabe	Ü: Übergabe Q: Qualitätsprüfung M: Mischen
Starttätigkeit	R: Richten	PS: Packer Setzen
Herstellungstätigkeit	B: Bohrung	IJ: Injektion
Herstellungs- unterbrechung	GE: Gestänge Einbau ST: Störung Technik	UP: Umsetzen Injektionspunkt ST: Störung Technik
Endtätigkeit	GA: Gestängeausbau UB: Umsetzen Bohrgerät	PA: Packer Ausbauen DP: Druckhaltephase UA: Umsetzen Anlage
Standardtätigkeit	KS: Keine Schichtbelegung	KS: Keine Schichtbelegung
Schichtende	R: Reinigen D: Dokumentation	R: Restmengen / Reinigen D: Dokumentation
manuelle Eingaben	St: Stillstand GV: Gerätevorhaltung SoA: Sonstige Arbeiten WR: Wartung / Reparatur V: Vermessung S: Störzone	St: Stillstand GV: Gerätevorhaltung SoA: Sonstige Arbeiten WR: Wartung / Reparatur V: Versuch S: Störzone

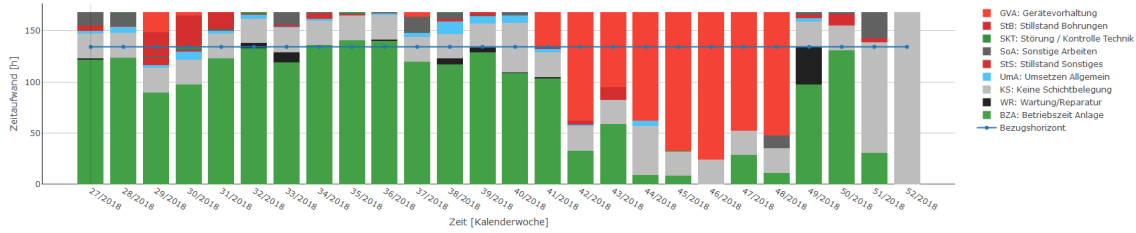


**Abb. 7.15:** Zusammenfassung der Maschinentätigkeiten in Anlagenebene

Prozesszeiten pro Anlage ergeben sich als Zusammenfassung aus der Betriebszeit BZ und Tätigkeiten, die nicht in dieser enthalten sind.

Die Aggregation ist in Abb. 7.15 für ein Beispiel von einer Anlage mit zwei Injektionspumpen verdeutlicht. Dabei sind die Prozesse so dargestellt, dass von unten nach oben die Priorität abnimmt. Bei der Darstellung in Anlagenebene errechnet sich die Betriebszeit aus den dafür definierten Prozessen IJ: Injektion und UP: Umsetzen Injektionspunkt. Sofern einer dieser Tätigkeiten von mindestens einer Maschine erledigt wurde, bildet sich daraus die Betriebszeit. Der Prozess ST: Störung Technik der Maschine 2 ist in der Anlagenebene nicht wiedergegeben, da dieser Tätigkeit eine niedrigere Priorität zugewiesen ist und von der Betriebszeit überschrieben wird. Gleiches gilt für die weiteren Tätigkeiten in der Anlagenebene. Sind in Maschinenebenen die Prozesse vollständig definiert und kontrolliert, kann eine logische Zusammenfassung in Anlagenebenen gebildet werden. Für einen Injektionstag ist die implementierte Darstellung der Aggregation in eguana SCALES mit aufklappbaren Unterprozessen im Anhang in Abb. C.2 dargestellt.

Nach einer Kontrolle der Tätigkeiten in der Maschinenebene können im Multichart Modus mehrere Maschinen und Anlagen miteinander verglichen werden. Ein Beispiel dazu findet sich im Anhang in Abb. C.1 auf Seite 297. Für die Zeiträume, in denen das Prozessmanagement vollständig kontrolliert wurde, können die Analysen zur Produktivität ausgegeben werden.



**Abb. 7.16:** Aktivitätentrend mit Bezugshorizont 80 %

Dazu zeigt das Modul in eguana SCALES über einen definierten Zeitbereich Kreisdiagramme an, mit den absoluten Stunden und der Verteilung der Tätigkeiten. Im Aktivitätentrend können die Maschinen und Anlagen tage-, wochen- und monatsweise zusammengefasst werden. Mit einem definierten Bezugshorizont kann das technische Personal feststellen, welche Maschinen und Anlagen produktiv sind. Der Vergleich der Produktivitätstrends unterschiedlicher Schichten ermöglicht eine detaillierte Analyse. In Abb. 7.16 ist ein halbes Jahr einer Anlage mit drei Injektionspumpen dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass im dritten Quartal des Jahres das Produktivitätsniveau der Anlage stabil war, hingegen auf Grund von anderen Tätigkeiten die Anlage im letzten Quartal zumeist nur vorgehalten wurde.

Für den Abrechnungsvorgang mit gestaffelten Pumpen pro Anlage oder Baustelle und zur Optimierung von Anlagenkonfigurationen ist die Anzahl der laufenden Maschinen pro Arbeitsprozess und Anlage im Modul integriert. Der dazugehörige Algorithmus ist in Abschnitt 7.2.1 erläutert. Beispielhafte Darstellungen sind im Anhang in Abb. C.3 und Abb. C.4 dargestellt.

Der Workflow im Modul Prozessmanagement schließt wie in Abb. 7.11 dargestellt an die des Moduls Daten an. Darin inbegriffen sind folgende Schritte:

1. Tätigkeiten, Verwendungen sowie Gruppierungen für Betriebszeiten in der Anlagenebene definieren (einmalig, im Zuge der Baustelleneinrichtung)
2. Prozessvorschlag pro Maschine kontrollieren und mit eigenen Beobachtungen abgleichen
3. Aggregation in der Anlagenebene und Kontrolle im Multichart Modus
4. Aufteilung, Trends der Maschinen und Anlagen, sowie Anzahl der gleichzeitig laufenden Pumpen analysieren
5. Freigabe der Prozesszeiten für den Abrechnungsprozess<sup>73</sup>

Die kontrollierten Zeiträume bilden die Abrechnungsgrundlage für Vorhalte- und Betriebszeiten, sowie die Aufstellung der gleichzeitig betriebenen Pumpen.

<sup>73</sup>Diese Funktion war zum Zeitpunkt der Beschreibung noch nicht implementiert.

## Material

Für Injektionstätigkeiten kommen auf Baustellen nach Abschnitt 3.6.6 unterschiedliche Materialien zum Einsatz. Aus den angelieferten Komponenten wird auf der Baustelle die injizierbare Mischung hergestellt. Dabei werden in Eignungsprüfungen die Mischungsverhältnisse der Komponenten auf die Randbedingungen der Baustelle angepasst. Die Verhältnisse der Mischungen werden entweder nach Gleichung (3.3) massenabhängig oder nach Gleichung (3.5) volumenabhängig definiert. Die Definition ist auf Seite 60 vertiefend erläutert.

Aus diesem Grund wird als Grundlage für die Verbrauchsrechnung von Einzelkomponenten und für den Abrechnungsprozess im System eine Materialdatenbank hinterlegt und darauf aufbauend werden Mischungen definiert. Die Eingabe der Materialien beinhaltet im beschriebenen Entwicklungsstand den Namen, einen Kommentar, die Dichte und Angaben zum Hersteller. Sofern die Materialien in Gebinden angeliefert werden, kann zum Zweck der Inventur die Masse oder das Volumen pro Gebinde hinzugefügt werden. Mit dieser Materialdatenbank können in einem zweiten Schritt die Mischungen eingegeben werden. Dabei unterscheidet die Eingabemaske nach chemischen und zementbasierten Mischungen, wie in Abb. 7.17 dargestellt.

Je nachdem, ob das Mischungsverhältnis nach Masse oder Volumen definiert ist, werden das Basismaterial und die Zutaten aus der Materialdatenbank ausgewählt und ihr Mischungsverhältnis zueinander definiert. Bei zementbasierten Mischungen gibt es eine zusätzliche Eingabemodalität für den W/B-Wert, der immer als Massenverhältnis zwischen Wasser und dem Basismaterial angegeben wird. Eine Eingabe nach Gleichung (3.3) erfolgt mit der Eingabe von Massen, dem Basismaterial Zement mit dem Massenanteil 100 und den Prozentangaben  $\alpha_{1...n}$  für die Zusatzstoffe. Bei der Eingabe nach Gleichung (3.5) erfolgt eine Eingabe von Volumen mit der Basiskomponente und den Mischungsverhältnissen  $\beta_{1...n}$  für weitere Komponenten. Bei konstanten Mischchargen kann entweder das Volumen oder die Menge pro Mischung angegeben werden. Nach vollständiger Eingabe errechnet das Programm die Gesamtdichte der Mischung.

Die Anzeige im Modul Material beinhaltet die zwei Funktionen Mischungen und Materialien. Im Reiter „Mischungen“ können Benutzer aufbauend auf den definierten Verhältnissen Zutaten der Materialien berechnen, die beispielsweise für Bestellungen von prognostizierten Injektionsmitteln herangezogen werden können. Werden durch zusätzliche Tätigkeiten Mischungen hergestellt, die nicht durch einen Injektionspunkt erfasst sind, so kann dieser Verbrauch mit Datum und Zeiteingabe vermerkt werden. Die zusätzliche Eingabe erfolgt in Verbrauch nach Gebinde, Litern oder Massen. Die auf der Baustelle hergestellten Mischungen, die in den Misch- oder Chargenprotokollen der Mischeinheiten vermerkt sind, können in dieses Modul übertragen werden. In der Eingabemaske werden mit Datums- und Zeiteingabe die Anzahl der verbrauchten Chargen eingegeben. Große Mischverluste werden zumeist am

(a) chemische

(b) zementbasierte

**Abb. 7.17:** Eingabe für Mischungen von Injektionsmitteln in eguana SCALES





Ende von Arbeitsschichten in einer weiteren Eingabemaske eingetragen. Die beschriebenen Funktionen werden durch die Icons, dargestellt in Tabelle 7.8 ausgewählt.

Im Reiter „Materialien“ werden die Zeitreihen für verwendete Stoffe angezeigt und die Eingaben für Inventur und Lieferungen bereitgestellt. Dadurch können die Materialbestände kontrolliert und prognostiziert werden. Im Materialmanagement muss zwischen drei Zeitreihen unterschieden werden. Als Grundvoraussetzung gilt,  $\sum Verbrauch < \sum Chargen < \sum Lieferungen$ .

- Ebene 1:  $\sum Verbrauch =$  registrierte Injektionsmengen + Eingaben nach Regie
- Ebene 2:  $\sum Chargen =$  hergestellte Mischungen laut Mischprotokollen oder Registereinheiten der Mischanlagen
- Ebene 3:  $\sum Lieferungen =$  antransportierte Materialien laut den Lieferscheinen

Aus den Zusammenstellungen wird der Mischverlust  $V_M$  nach Gleichung (7.1) berechnet. Zur Ermittlung des Schwunds  $S_M$ , der in Gleichung (7.2) definiert ist, muss in periodischen Abständen eine Inventur durchgeführt werden. Lieferungen und Inventuren können dabei je

Tab. 7.8: Icons im Modul Materialien – Reiter „Mischungen“

Icon	Beschreibung der Funktion
	Berechnen der Materialien für eine Mischung
	Eingeben von Verbrauch nach Regie
	Eingeben von verbrauchten Chargen
	Eingeben von Mischungsverlusten

Material eingegeben werden. Als Grundlage für die Lieferungen dienen die Lieferscheine der auf die Baustelle transportierten Materialien.

$$V_M(t) = \sum \text{Chargen}(t) - \sum \text{Verbrauch}(t) \quad (7.1)$$

$$S_M(t) = \sum \text{Lieferungen}(t) - \sum \text{Chargen}(t) - \text{Inventar}(t) \quad (7.2)$$

Die Gesamtverluste  $GV_M$  setzen sich aus den Mischverlusten  $V_M$  und dem Schwund  $S_M$  zusammen. In der Kalkulation werden die Mehrverbräuche auf den Verbrauch bezogen, weshalb sich für die Kennzahl das Verhältnis in Gleichung (7.3) ergibt. Die Kennzahl  $KPI_M(t)$  liegt in der Größenordnung von 2-10 %<sup>74</sup>

$$KPI_M(t) = \frac{GV_M(t)}{\sum \text{Verbrauch}(t)} \quad (7.3)$$

Die Anzeige der Zeitenreihe in eguana SCALES ist im Anhang in Abb. C.5 dargestellt. Im Modul Materialien sind folgende Schritte durchzuführen:

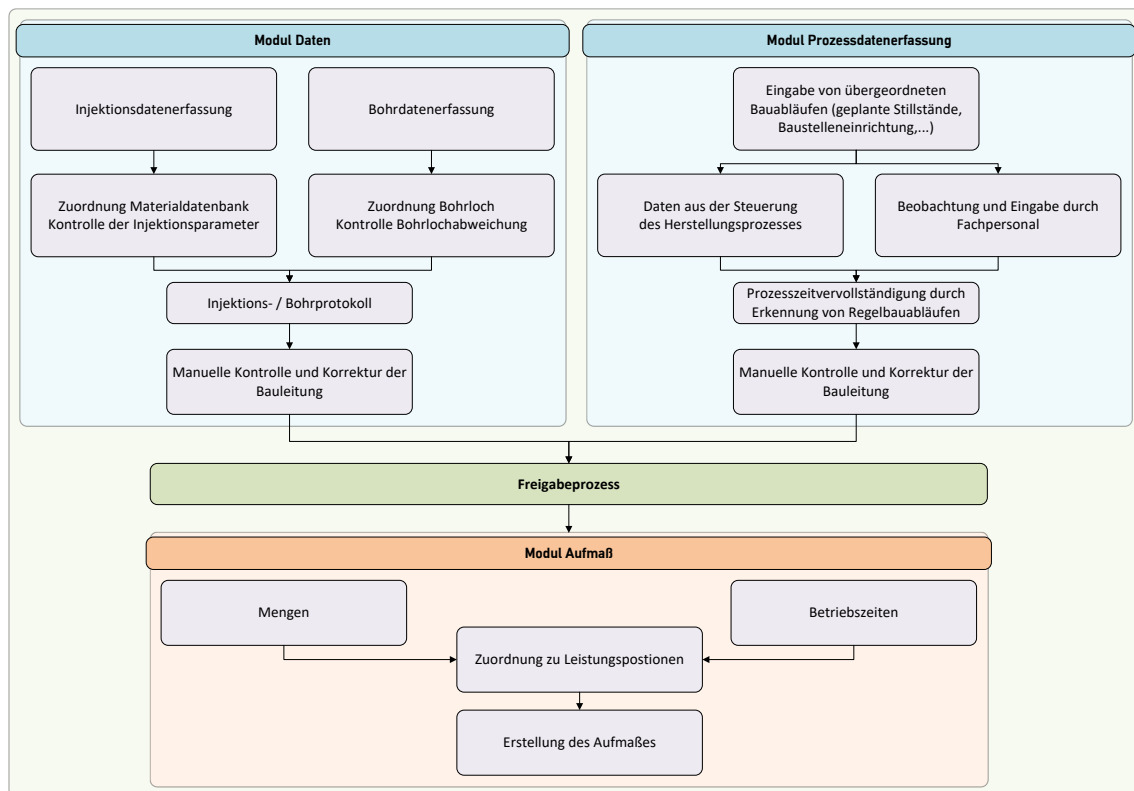
1. Eingabe aller verwendeten Materialien (einmalig)
2. Definition der zum Einsatz kommenden Injektionsmischungen entsprechend der Eignungsprüfung (einmalig)
3. Registrierung von Verbräuchen nach Regie
4. Übertrag der hergestellten Mischungen laut Protokoll (täglich)
5. Eintrag von Lieferungen und Inventuren (monatlich)
6. Einsicht des Inventars
7. Berechnung des Mischverlustes und Schwunds

<sup>74</sup>Diese Größenordnung ist von den eingesetzten Materialien wie auch der Verfahrenstechnik abhängig. Die Bandbreite wurde von den Injektionsexperten in den Interviews eingeschätzt.

## 8. Vergleich der Kennzahl des Gesamtverlustes mit der Kalkulation

**Aufmaß**

Die Module Daten und Prozessmanagement liefern die Grundlage für das Modul Aufmaß. Der in Abb. 7.18 dargestellte Workflow sieht einen Freigabeprozess an der Schnittstelle vor [125]. Der digitale Dokumentationsprozess enthält nach Abschnitt 7.2.1 aufeinanderfolgende digitale Freigabeoptionen für Ausführung und Bauaufsicht, damit die Daten im Modul Aufmaß berechnet werden können.



**Abb. 7.18:** Workflow der Module Daten, Prozessmanagement und Aufmaß im Zusammenhang

Je nach Vertragsart kann dieser Freigabeprozess unterschiedlich abgewickelt werden. In Pilotprojekten zeigte sich, dass öffentliche Auftraggeber weiterhin papierbasierte Dokumentation mit physischer Signatur wünschen und daher die Abgabe von Tagesprotokollen zu den Herstellungsdaten und Prozesszeiten erforderlich ist. Diese papierbasierte Dokumentation kann durch einen implementierten Freigabeprozess beider Vertragsparteien in den kommenden Jahren abgelöst werden.

Tab. 7.9: Beispiele für automatische Abrechnungspositionen in eguana SCALES

Abrechnung von	Positionsname	[ ]	Beschreibung
Zeiten je Pumpe	Einbringen von Injektionsgut in den Untergrund einschließlich systembedingter Unterbrechungen bis x min	min	Prozesszeiten der Herstellungstätigkeit, Herstellungsunterbrechungen, Start- und Endtätigkeiten kleiner x min einer Maschine werden inkludiert
Zeiten je Pumpe	Arbeitsstunden einer einzelnen (ersten) Pumpe	h	Zeit aus dem Modul Pumpengleichzeitigkeit für erste parallele Herstellungstätigkeit
Zeiten je Anlage	Betriebszeit einschließlich systembedingter Unterbrechungen bis x min	h	Betriebszeit für eine Anlage aus der aggregierten Prozesszeit in der Anlagenebene
Zeiten je Anlage	Stilliegezeit Gerät Injektionsarbeiten über x AT	d	Anzahl der Tage der Tätigkeit Stillstand mit einer Dauer von minimal zwei Tagen
Längen	Herstellen von Injektionsbohrungen in Bkl x mit Durchmesser D x mm bis D x mm und einer Länge L von x m für geotechnische Injektionen	m	Aufsummierung des Parameters Tiefe, wenn der Durchmesser- und Tiefenbereich für den Arbeitsprozess Bohren in die definierten Grenzen fallen.
Mengen in Massen	Liefern und Einbauen eines hydraulischen Bindemittels für geotechnische Injektionen aller Art	kg	Rückrechnung vom registrierten Volumen in Litern in die Einzelmaterialien nach Stoffraumrechnung
Mengen in Volumen	Liefern und Einbauen von chemischen Injektionsmitteln	l	Rückrechnung von registrierten Volumen in Litern in die Einzelmaterialien nach Mischungsverhältnis
Anzahl	Zulage Setzen von Packern bei Injektionen mit Neigung nach oben	Stk	Anzahl der Starttätigkeiten beim Arbeitsprozess Injektion, Ausschließung der Punkte mittels Regex für die Injektionsidentifikationsnummern nach unten



**Leistungsposition anlegen**

---

LV-Nummer

---

Name

---

Beschreibung

---

Kommentar für da11 Export.

---

Mischungen  
Mischungen

---

Materialien  
Materialien

---

Tätigkeit  
Tätigkeit

---

Liste der Typen, die nicht berücksichtigt werden sollen

---

Alle Beaufschlagungen berücksichtigen

Filter verwendete Punkte über Nomenklatur-Level

Maschine

Maschine  
Maschine

---

Verwende Anlagenzeiten

Abrechnung von Zeit

Abrechnung von Tagen

Abrechnung von Mengen

Abrechnung von Stueck

**Abb. 7.19:** Eingabemasken für neue Abrechnungspositionen in eguana SCALES

Die Konfiguration zur Berechnung von Leistungspositionen erfolgt in unterschiedlicher Art und Weise. Im beschriebenen Entwicklungsstand können automatische Abrechnungen nach Zeiten in Maschinen und Anlagenebene, Mengen in Massen oder Volumen, Metern sowie Stückzahlungen erfolgen. In Tabelle 7.9 werden für die Gruppen Beispiele genannt. Die Beschreibung der Zuordnung für die automatische Abrechnung zeigt, dass für die Berechnung Prozesszeiten und Parameter aus den Herstellungsdaten verwendet werden. Die zusätzlichen Filteroptionen nach Typen und Nomenklaturlevel ermöglichen eine genaue Unterscheidung.

The screenshot shows a web interface for configuring activities. At the top, there is a dropdown menu labeled 'Tätigkeit'. Below it is a window titled 'IJ: Injektion' with a close button. Inside this window, there is a table with three columns: 'Typ', 'maximale Dauer', and 'Inkludierte Dauer'. The 'maximale Dauer' column contains the value '0' and a small downward arrow. The 'Inkludierte Dauer' column contains the value '0'. Below the table, there are two text input fields: one labeled 'Regexfilter für Punktnamen' and another labeled 'zu zählendes Kommentar'.

**Abb. 7.20:** Aufmaß mit Prozesszeiten in eguana SCALES

Im System ist die Zuordnung zu einer Leistungsposition über eine Eingabemaske implementiert, die in Abb. 7.19 dargestellt ist. Neben der LV-Nummer werden der Name der Position und eine Beschreibung hinzugefügt. Sofern für die Schnittstelle in das ERP-System ein Kommentar notwendig ist, muss dieser unter Kommentar eingetragen werden. In der Auswahlliste können in der Materialdatenbank hinterlegte Materialien und Mischungen ausgewählt werden. Definierte Tätigkeiten grenzen entweder die Materialzählung ein oder berechnen Prozesszeiten. Im Modul kann unterschieden werden, ob einzelne Maschinen oder Anlagen einbezogen werden. Nach Auswahl einer Prozesszeit können nach Abb. 7.20 die Tätigkeiten weiter spezifiziert werden. Dazu dienen die Dauern, Filter zu einem Datensatz oder Zählung über einen Kommentar aus dem Modul Daten. Nach Auswahl der Abrechnungseinheit Zeit, Menge oder Stück, klappen in der Eingabe zusätzliche Abrechnungseinheiten auf.

Das System benötigt die einmalig Definition der Abrechnungspositionen sowie der Einstellungen für die Exportfunktionen. Das Aufmaßblatt wird in der Ansicht im Modul Aufmaß dargestellt und in den Dateiformaten CSV, PDF und D11<sup>75</sup> als Export zur Verfügung gestellt. Für die monatliche Erstellung des Aufmaßes wird der entsprechende Abrechnungszeitraum ausgewählt. Danach können die Abrechnungsmengen in der Ansicht eingesehen werden. In der Exportfunktion wählt man die Abrechnungspositionen und die Blattnummer aus und lädt die Datei im gewünschten Format. Im ERP-Bausystem wird der Export eingelesen und den Positionsnummern der Einheitspreis zugewiesen. Beispiel für einen DA11-Export ist im Anhang in Abb. C.6 dargestellt. Der PDF-Export ist mit einem Summenblatt und einem Aufmaßblatt pro Leistungsposition aufgebaut und listet tageweise die abrechenbaren Leistungen auf. Der automatisierte Abrechnungsprozess ist in Abschnitt 8.1.2 visualisiert und erläutert.

<sup>75</sup> Austauschformat nach REB-VB 23.003 mit 80 Zeichen pro Zeile (D11)

**Tab. 7.10:** Ebenen der Visualisierung in eguana SCALES

Ebene	Anwendungsbeispiele		
	Hebung	Sohle	Tunnel
1.	Lage Schacht	Lage Baugrube	Lage Tunnel
2.	Bohrung	Segment	Block
3.	Injektionsverlauf	Injektionsverlauf	Querschnitt
4.	–	–	Injektionsverlauf

Zusammengefasst besteht der monatliche Workflow im Modul Aufmaß aus folgenden Schritten:

1. Definition Zuordnung von Parametern und Prozesszeiten zu den Leistungspositionen (einmalig)
2. Definition der Export-Einstellungen (einmalig)
3. Auswahl des Abrechnungszeitraumes
4. Export im gewünschten Format mit Angabe der Blattnummer
5. Import im ERP-Bausystem

### Visualisierung

Im Modul Visualisierung werden die Herstellungsdaten mit den Plandaten verknüpft. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen wird das Visualisierungskonzept von den Entwicklern vor Beginn der Injektionstätigkeiten an die Anforderungen der Baustelle angepasst. Beispiele für angepasste Visualisierungen und deren Ebenen sind im Kapitel 8 dargestellt.

Im System wird das Visualisierungskonzept in Abstraktionsebenen verfolgt. Dazu navigiert der Benutzer ausgehend von einem Lageplan, der in einem GIS verankert ist, in die Detailebenen bis hin zu einzelnen Punkten eines Herstellungsvorgangs. Die Abstraktionsebenen fassen Informationen zusammen und helfen bei der Orientierung in großen Injektionskampagnen. Die Tabelle 7.10 gibt einen Überblick über die Visualisierungsebenen für unterschiedliche Injektionsverfahren.

In der Ausführung werden die Injektionskonzepte angepasst. Daher wird in eguana SCALES eine Plandatenupload im Modul Daten ermöglicht. Mit dem Icon Download kann eine Plandatenvorlage, die an das Visualisierungskonzept angepasst ist, im Datenformat Excel Spreadshhet XML (XLSX) geladen werden. Ein Beispiel dafür findet sich in Abb. 7.21. Diese ermöglicht, dass durch einen befugten Benutzer Plandaten hinzugefügt oder gelöscht werden



eguana GmbH  
 A-1070 Wien, Zieglergasse 3/2  
 Tel.: +43 (1) 996 20 42 (Fax DW-15)  
 office@eguana.at / www.eguana.at

**Plandatenvorlage**  
 für das Bauvorhaben

**Baugrundinjektionen xxxx**

Wenn nicht jeder Punkt einzeln eingegeben werden soll, können Kürzel in jedem Level verwendet werden:  
 Mittels "-" getrennte Werte werden als Bereich angesehen. Z.B.: 1-5 erstellt 1,2,3,4,5.  
 Nach einem Bereich kann nach "7" die Schrittweite angegeben werden. Z.B.: 1-6/2 erstellt 1,3,5.  
 Mit "\*" können Aufzählungen eingegeben werden. Z.B.: 1;a:2 erstellt 1,2.a.  
 Sollen "\*", "7" oder "7" in den Namen vorkommen müssen sie doppelt eingegeben werden. Z.B.: a-c erstellt a-c, a-c würde a,b,c erstellen.  
 Sollen Plandaten gelöscht werden, ersetzen sie DATA in Spalte A durch DELETE.

Tragen Sie die Querschnittsabbildige in der nächsten Zeile ein, Getrennt durch , z.B.: LV,RLV,I,V,RLV

Stollen	Plandaten	Tunnelmeter	Plandaten	Reihe	Plandaten	Bohrloch	Plandaten	Packertiefe	Plandaten	Anmerkung	Plan	Phase	Eigenschaften

**Abb. 7.21:** Plandatenvorlage in eguana SCALES









können. Die neuen Punkte erscheinen in der Visualisierung in einer Tabelle zur vorletzten Visualisierungsebene.

Diese Tabelle stellt ortsgebunden die Herstellungsdaten dar und verbindet Herstellungsdaten mit Plandaten. In der Tabelle, Querschnitt, Tiefenstufe oder Bohrung kann zwischen geplanten Punkten und solchen, zu den bereits Daten vorliegen, gewechselt werden. In der Ansicht zu den geplanten Herstellungsvorgängen je Querschnitt können die Punkte, die über den Upload oder die Konfiguration geplant sind, bearbeitet, zur Ausführung angewiesen oder als entfallen markiert werden. Mit dieser Vorgangsweise gelingt eine Dokumentation der geänderten Planung und eine Visualisierung der angewiesenen Ausführungsschritte für das gewerbliche Personal. Die wesentlichsten Icons der Datentabelle im Modul Visualisierung sind in Tabelle 7.11 dargestellt.

In den Visualisierungen werden für den Status eines Herstellungsvorgangs unterschiedliche Farbcodes verwendet. Für unterschiedliche Injektionsmittel werden in den Visualisierungen einfache Symbole wie Kreis-, Dreiecks-, oder Rechtecksformen angezeigt. Bei der Injektion in einer Passe werden die Status in folgender Reihenfolge durchlaufen, die farblich unterschiedlich dargestellt werden:

- Geplant
- Angewiesen / Entfallen
- Ausgeführt nach Vorgabe / Abgebrochen
- Freigegeben

Tab. 7.11: Icons im Modul Visualisierung

Icon	Beschreibung der Funktion
	Anzeigen der Datensätze entsprechend der gewählten Position, Funktionalitäten wie im Modul Daten
	Wechsel von der Anzeige der Datensätze zu den geplanten Arbeiten entsprechend der gewählten Position
	Bearbeiten und Löschen eines geplanten Herstellungsvorgangs
	Anweisen eines geplanten Herstellungsvorgangs
	Markierung eines geplanten Herstellungsvorgangs mit Status Entfallen
	Zurücknehmen einer Anweisung oder eines Entfalls
	Wechseln von der Datentabelle oder den geplanten Arbeiten zur verknüpften Ebene der Visualisierung
	Ausgeben von Listenvisualisierung und Report im PDF-Format zu gewählten Position

In einer übergeordneten Visualisierungsebene werden diese Farbcodes um den Status „In Ausführung“ ergänzt. Dadurch können die Bereiche wie ein Tunnelabschnitt im Lageplan zusammengefasst werden. Liegen in einem Abschnitt bereits Injektionspunkte mit unterschiedlichen Status vor, so wird der Bereich mit dem Status „In Ausführung“ angezeigt. Injektionsmengen werden entweder über Farbsättigungen oder Balken je Tiefenstufe verdeutlicht.

### eValuator

Der Evaluator dient dazu, die Datenbank einer Baustelle nach speziellen Suchkriterien zu filtern. Die Suchabfragen erfolgen dabei vom Arbeitsprozess unabhängig. Beispielsweise können bei der Abfragen gleiche Identifikationsnummern der Arbeitsprozesse Bohren und Injektion angezeigt werden. Neben der Datenbankabfrage ermöglicht die Evaluator-Funktion die Ausgabe von zeitbezogenen KPIs. Im beschriebenen Entwicklungsstand können alle Parameter bis auf den Arbeitsstundenvergleich aus Tabelle 7.4 in eguana SCALES berechnet werden. Die Eingabemaske, die in Abb. 7.22 dargestellt ist, ermöglicht eine Einschränkung der Parameter auf ausgewählte Zeitspannen, Maschinengruppen und Tätigkeiten.

Im Baustellencockpit können die Leistungskennzahlen für Zeiträume zusätzlich als Zeitreihe und Heatmap dargestellt werden.

KPI	
Zeit/Beaufschlagung AI:	0.391 h
Verpresszeit/Beaufschlagung:	0.391 h
Beaufschlagungen/Bohrmeter:	0.287 /m
Zusätzliche Zeit/Beaufschlagung:	1.080 h
Zeit/Beaufschlagung:	1.463 h
Verpresszeit/Bohrmeter:	0.112 h/m

**Abb. 7.22:** KPIs Abfrage in eguana SCALES

Der beschriebene Entwicklungsstand von eguana SCALES zeichnet sich durch eine vollständige Dokumentation der Herstellungsdaten und der damit verbundenen Bauprozesse aus. Die digitale Datenkette, beginnen bei der Datenbeschaffung in unterschiedlichen Datenebenen bis hin zum Abrechnungsprozess, ist durch die Implementierung der fünf Stufen der digitalen Baudokumentation geschlossen. Ein entscheidender Mehrwert ist, dass die bautechnischen und abrechnungsrelevanten Daten für alle Interessensvertretungen einheitlich erfasst, endgültig gespeichert und transparent angezeigt werden können. Manuelle Datenüberträge und diverse Berechnungsfehler werden im Vergleich zu herkömmlichen Systemen vermieden. Dabei konnte zum ersten Mal die automatische Aufmaßfeststellung für Injektionsarbeiten erfolgreich realisiert werden.

Durch die Speicherung in einer für alle Bauprojekte gleiche Datenbankstruktur ist das System in der Lage, zukünftige Schnittstellen zu ERP- und BIM-Systemen automatisch mit den geforderten Ausführungsdaten der Herstellung und des Materials zu versorgen. Die Innovation ist, dass dieses System nicht auf einen speziellen Steuerungs- oder Baugerätehersteller beschränkt ist, und es durch den standardisierten Aufbau nun möglich ist, die Prozesse mehrerer Gewerke darstellen und vergleichen zu können. Beispielsweise können bei einem Tiefbauprojekt unterschiedliche Bauverfahren in Echtzeit überprüft und die entstehenden Daten miteinander verglichen werden.

Wie bereits in der Visualisierung umgesetzt, ist die Entwicklung einer Rückkoppelung der geplanten Arbeitsvorgänge in Form von Arbeitsanweisungen mit der Steuerung zu forcieren. Das begleitende digitale Qualitätsmanagement ergibt sich aus den hohen Anforderungen der

Prüfung von Injektionsmitteln und stellt neben den Herstellungsdaten und Visualisierungen das dritte Standbein des digitalen Datenmanagements dar. Der Forschungsantrag eguana Quality wurde von der FFG noch nicht freigegeben, die Konzepte dazu sind in Abschnitt 7.2.2 angeführt und benötigen eine rasche Umsetzung.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



# Kapitel 8

## Feldstudien

Die Feldstudien befassen sich mit zwei unterschiedlichen Projekten im Tiefbau, bei denen die Injektionsarbeiten mittels des Baudatenmanagementsystems eguana SCALES dokumentiert wurden. Die Feldstudie zu Abdichtungsinjektionen beim konventionellen Tunnelvortrieb wurde über zwei Jahre durch den Autor begleitet. Dabei wurden unterschiedliche Funktionen, die im Abschnitt 7.3 angeführt sind, mitentwickelt und Problemstellungen des Unternehmens sowie der Entwicklung gelöst. Die Funktionen der projektspezifischen Visualisierungen und des automatisierten Aufmaßes im digitalen Datenmanagement konnten anhand der Vielzahl von Daten und der langen Laufzeit geprüft und optimiert werden. Die resultierende Zeitersparnis in diesem Projekt gilt als Anhaltspunkt, um direkte Vorteile zu bewerten. Aufbauend auf den Datensatz der über 120 000 Injektionsdatensätze wurde während der Ausführung durch den Autor ein Echtzeit-Bauzeitprognosemodell mit Hilfe des Monte-Carlo-Probeentnahmeverfahrens entwickelt, das in einem weiteren Schritt in digitale Datenmanagementsysteme implementiert werden kann. Das Prognoseverfahren eignet sich dabei auch für andere Bauverfahren.

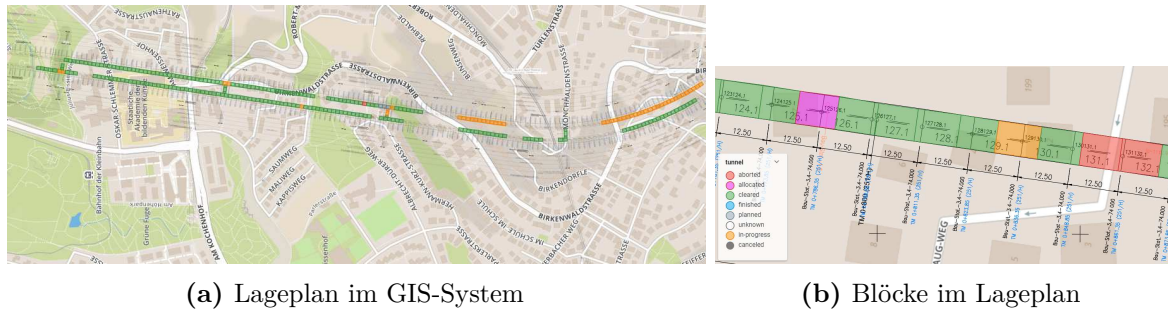
Im Bauprojekt zur Abdichtung einer Baugrubensohle mittels Weichgels konnte die Visualisierung interaktiv im Lageplan dargestellt werden. Dieses Projekt zeigt erstmalig die papierlose Kommunikation eines Bauunternehmens mit der Bauaufsicht auf Grundlage eines Datenmanagementsystems.

### 8.1 Abdichtungsinjektionen beim konventionellen Tunnelvortrieb

Im Zuge der Dissertation wurde das Datenmanagement bei Abdichtungsinjektionen beim Tunnelvortrieb eingesetzt, die als Niederdruckinjektionen ausgeführt wurden. Zum großen Teil wurden auf dieser Baustelle Injektionen im anhydritführenden<sup>76</sup> Gebirge ausgeführt. Das Injektionskonzept zielte darauf ab, die durch den Vortrieb entstandenen Auflockerungszonen zu verfüllen, um mögliche Fließwege des Grundwassers zu vermeiden. Als Verpressgut schrieb

---

<sup>76</sup>Es handelt sich dabei um sulfathaltigen unausgelaugten Gipskeuper.



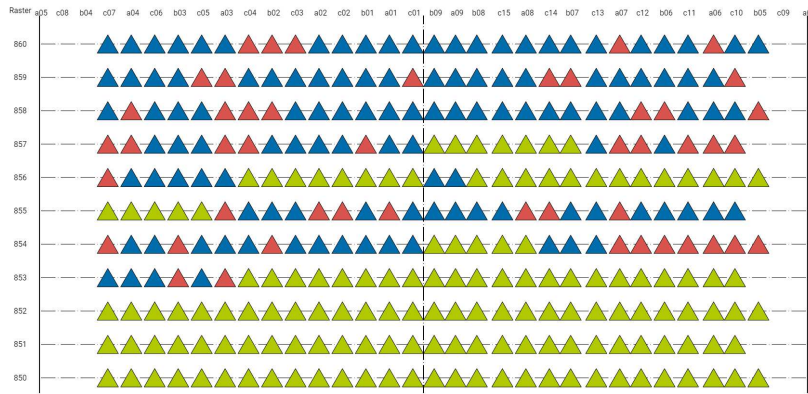
**Abb. 8.1:** Lage des Tunnels in Visualisierungsebene 1

die Planung Acrylatgel vor. Die um den Querschnitt radial angeordneten Bohrlöcher betragen eine Länge von 6-10 m und wurden mit maximal zwei Beaufschlagungen versehen [171]. Die Herstellungsphase eines Ausführungsabschnittes richtete sich nach einem Pilgerschrittverfahren, wobei die Injektionsmannschaft vier verschiedene Querschnittstypen, die wiederum in drei Reihen unterteilt waren, systematisch abarbeiteten. Diese Systematik bewirkte, dass pro Injektionsabschnitt bis zu zwölf Pilgerschritte notwendig waren. Die baubegleitende Visualisierung half den Überblick über Planung und Ausführung zu behalten. Der maximale Verpressdruck wurde auf 5 bar begrenzt [170]. Bei diesem Injektionskonzept unterschied man grob in zwei Ausführungstypen. Zuerst wurden die gesamten Bohrlöcher mit Acrylatgel aufgefüllt und in einem zweiten, nachfolgenden Schritt wurde das Bohrloch mit Polyurethan verschlossen. Die Typen wurden daher mit Acrylatinjektion (AI) und Bohrlochverschluss (BV) bezeichnet. Sofern bei Bohrungen Wasser angetroffen wurde, verpresste die Injektionsmannschaft ebenfalls Polyurethan, um den Wasserandrang zu stoppen.

### 8.1.1 Visualisierung

Nach Tabelle 7.10 kommen für Abdichtungsinjektionen im Tunnel vier Abstraktionsebenen zum Einsatz. In diesem Projekt wurde in der Konzeption der bestehende Lageplan mit einem GIS-System und Hintergrundkarten verknüpft. Dadurch konnten die Orientierung im Bauprojekt sowie die Navigation zur bearbeitenden Stelle erleichtert werden. Bei über 120.000 durchzuführenden Injektionspunkten waren die Übersichtlichkeit im Projekt und die Zuordnung der Herstellungsverläufe zu den geplanten Injektionspassagen ein wesentliches Kriterium für das System. Durch die Anordnung definierter Blöcke wurden jeweils zehn Tunnelmeter zusammengefasst. Mit Hilfe eines Mouseover-Effektes<sup>77</sup> zeigt die interaktive Applikation die entsprechende Kilometrierung an. Die unterschiedlichen Einfärbungen der Blöcke geben an, ob diese Abschnitte bereits für die Ausführung geplant sind, sich in Ausführung befinden oder bereits abgeschlossen sind. Somit wird der Benutzer intuitiv zu den analysierenden Stellen geleitet.

<sup>77</sup>Wird im Zusammenhang mit Webplattformen auch als Hover-Effekt oder Mausschwebetext bezeichnet. Dieser Effekt erzeugt einen zusätzlichen Anzeigebereich, sobald der Benutzer den Mauszeiger über interaktive Elemente bewegt.

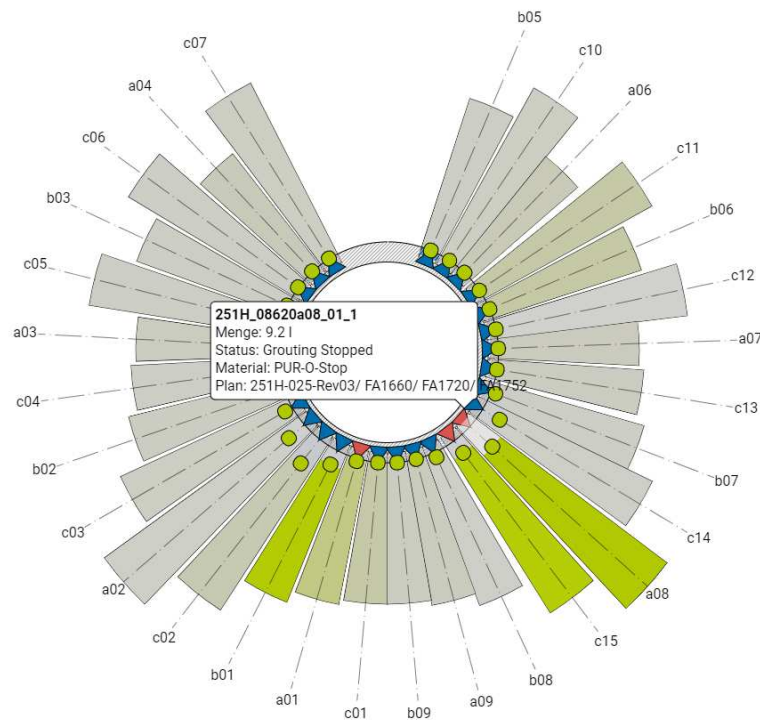


**Abb. 8.2:** Abwicklung von zehn Tunnelmetern in Visualisierungsebene 2

Durch die Auswahl eines Blocks wird die zweite Visualisierungsebene geöffnet. Diese stellt am Beispiel der Radialinjektionen die Abwicklung der Injektionsquerschnitte von zehn Tunnelmetern dar. In der Abb. 8.2 wird durch die farbliche Markierung ersichtlich, in welchem Stadium sich die einzelnen Bohrlöcher befinden. Die Kodierung ist wiederum eine Zusammenfassung der Status der einzelnen Passen in einem Bohrloch. Die blaue Kodierung verdeutlicht, dass zwar bereits alle Injektionspunkte in diesem Bohrloch abgearbeitet sind, jedoch noch die Freigabe und Kontrolle zu erfolgen haben. Die roten Injektionspunkte zeigen an, dass es zu einem manuellen Abbruch während des Injektionsvorgangs kam und die Herstellungsvorgänge noch nicht überprüft wurden. Die grüne Kodierung zeigt an, dass alle Injektionspassen ordnungsgemäß abgearbeitet sind. Die Form des Bohrlochs ist eine visuelle Kodierung für das verwendete Injektionsmaterial. Eine kreisrunde Form verdeutlichte auf dieser Baustelle die Verwendung von Acrylatgel, die Dreiecksform zeigte Polyurethan an. Sofern in einem Bohrloch mehrere Passen auszuführen waren, wurde in der Visualisierungsebene 2 das Material angezeigt, dass am Bohrlochhöchsten eingesetzt wurde.

Die Visualisierungsebene 3 entspricht einem Tunnelquerschnitt. Mit Hilfe des vorgesehenen Plandatenuploads und der Vorkonfigurationen der Entwickler, waren bei diesem Projekt die Soll-Bohrlängen hinterlegt. Die hatte zur Folge, dass Kennzahlen entwickelt werden konnten, die Verpressvolumina pro Soll-Bohrlänge berechnen. In der Visualisierung ist die Sättigung der grünen Farbe in Abb. 8.3 ein Maß für die Verpressmenge. Pro Querschnitt können damit die Bereiche hoher Verpressmengen identifiziert werden. Beispielsweise sind in Abb. 8.3 im Raster b01, c15 sowie a08 die höchsten Verpressmengen zu finden. Durch einen Mouseover-Effekt können die zusätzlichen Parameter angezeigt werden. An diesem Beispiel erkennt man die Verpressstrecke des Acrylatgels und des Bohrlochverschlusses im Bereich nahe der freien Oberfläche.

Die vierte Visualisierungsebene stellt die Verknüpfung zu den Herstellungsdaten dar, wodurch die Herstellungsverläufe eingesehen und Daten nach Abschnitt 7.3.3 bearbeitet werden können.



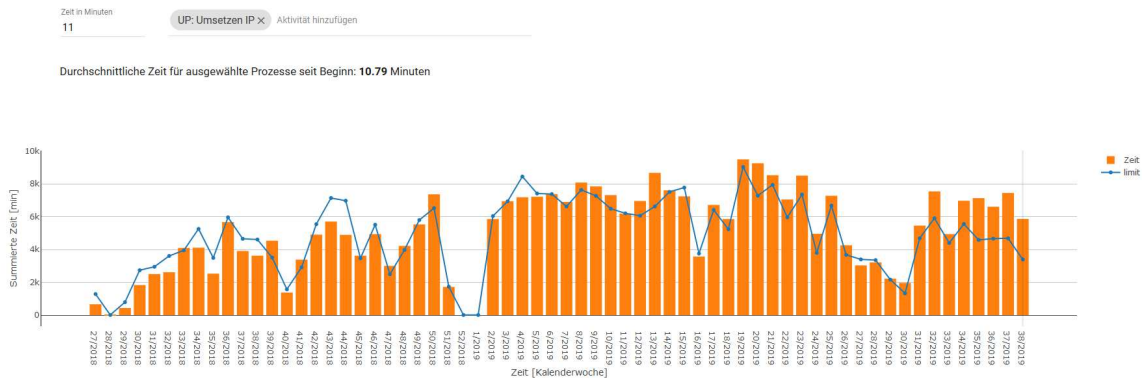
**Abb. 8.3:** Tunnelquerschnitt in Visualisierungsebene 3

Das Konzept zur Visualisierung des Bauprozessmanagements ist bereits in Abschnitt 7.3.3 beschrieben. Bei dieser Baustelle wurden drei Anlagen zu je zwei bis drei Pumpen für die Acrylatinjektionen sowie zwei Anlagen für die Polyurethaninjktionen eingesetzt. Mit Hilfe der vollumfänglichen Dokumentation der Prozesszeiten konnten die Umsetzzeiten sowie die Betriebszeiten je Anlage und Pumpe errechnet werden.

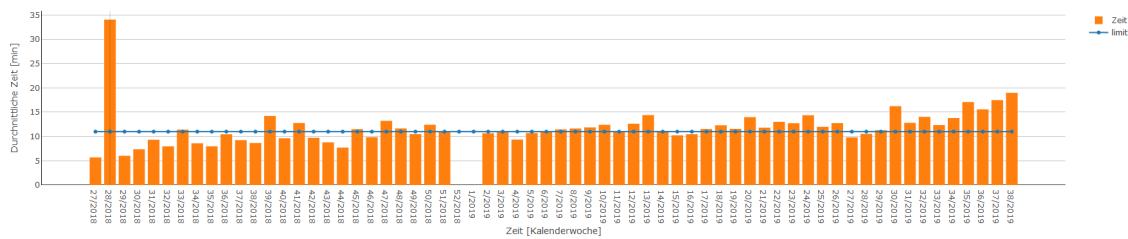
Im Zuge der Implementierung des Systems wurde ein Bonus-Malus-System zwischen Subunternehmer und Unternehmer vereinbart, dass die Ist-Umsetzzeiten aus der Auftragskalkulation mit den angesetzten Kalkulationszeiten verglichen. Dieser Ansatz der leistungsbezogenen Vergütung könnte in alternativen Vertragskonzepten integriert werden. Abb. 8.4 zeigt die Umsetzzeiten pro Woche für eine Anlage. In der Abb. 8.4a werden alle Prozesszeiten pro Woche summiert dargestellt. Das blau dargestellte Limit ist das Produkt aus der Anzahl der Vorgänge mit der im Angebot kalkulierten Zeit je Umsetzen. Die Darstellungsform kann alternativ auf durchschnittliche Zeiten pro Abschnitt, abgebildet in Abb. 8.4b geändert werden.

### 8.1.2 Automatisiertes Aufmaß

Die Echtzeit-Baudatenmanagementsysteme verbinden nach Abb. 7.1 auf Seite 179 die Ausführungsprozesse mit den ERP-Systemen. In diesem Pilotprojekt konnte erstmalige die



(a) Darstellungsform in summierten Zeiten



(b) Darstellungsform in durchschnittlichen Zeiten

**Abb. 8.4:** Automatisierung des Soll-Ist-Vergleiches von Umsetzzeiten am Beispiel von Abdichtungsinjektionen

teilautomatisierte Abrechnung von Leistungspositionen verwirklicht werden. Zum besseren Verständnis der Schnittstelle zwischen den beiden Systemen dient die Abb. 7.1 auf Seite 179. Bei diesem Projekt wurde für den Abrechnungsvorgang vom Unternehmen die Bausoftware RIB iTWO verwendet. In deutschen Projekten wird die DA11-Austauschdatei für Mengenerrechnungen herangezogen [130]. Aus diesem Grund wurde in eguana SCALES die Exportfunktion mit diesem Format entwickelt. Eine Musterdatei, die den Aufbau des Austauschformates wiedergibt, ist im Anhang auf Seite 302 dargestellt.

Der Abrechnungsprozess beginnt nach Abb. 8.5 mit der tageweisen Plausibilitätskontrolle der Daten und Prozesszeiten im Baudatenmanagement für das abzurechnende Monat. Dazu helfen die vorgestellten KPIs, die definierten Widgets im Baustellencockpit sowie die baubegleitenden Visualisierungen. Im Anschluss werden die nicht freigegebenen und somit in der Abrechnung nicht berücksichtigten Injektionspunkte abschließend kontrolliert. Sofern Herstellungsdaten nicht berücksichtigt wurden, können die Daten in einem Kontrollzyklus bereinigt und freigegeben werden. Die Erstellung der Abrechnungspositionen und die Zuordnung erfolgen in der Regel am Beginn eines Bauprojekts, der Workflow für diesen Task ist in Abschnitt 7.3.3 dargestellt. Im Zuge des Projektes wurden unterschiedliche Leistungspositionen samt deren Aufzahlungspositionen für die Injektionsarbeiten automatisch berechnet. Sofern neue Positionen während des Projektes angesprochen wurden, konnten diese nachträglich im Modul Abrechnung ergänzt werden. Nach Auswahl des Abrechnungszeitraums werden die Positionsmengen automatisch berechnet. Im Anschluss kann der Export im normgerechten Datenaustauschformat ausgegeben werden. Damit sind die Tätigkeiten der Mengenermittlung

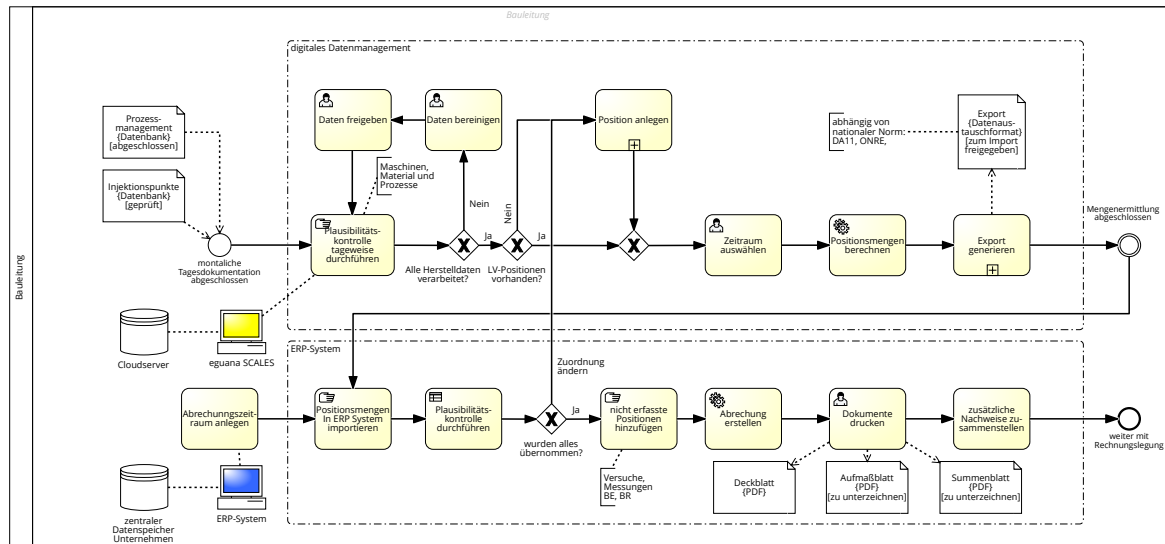


Abb. 8.5: Prozesse der digitalen Aufmaßerstellung und Abrechnung in BPMN 2.0

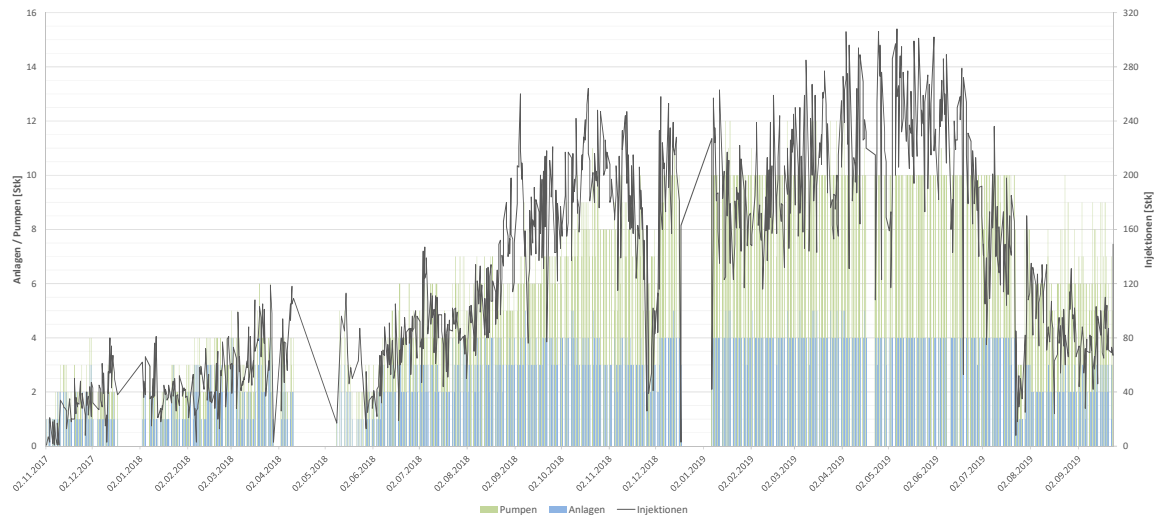
im Baudatenmanagement abgeschlossen und die Schnittstelle zum ERP-System geschlossen. Nach Anlegen des Abrechnungszeitraums durch den Bauleiter in iTWO werden die Positionsmengen in das System importiert und automatisch dem hinterlegten Leistungsverzeichnis zugeordnet. Sofern Daten nicht zugeordnet werden können, müssen gegebenenfalls Adaptierungen in der Positionsbezeichnung im Baudatenmanagement getroffen werden. Weitere Positionen wie zeitgebundene Baustellengemeinkosten oder zusätzliche Messungen, die nicht in eguna SCALES abgebildet sind, müssen weiterhin manuell hinzugefügt werden. Mit diesen Informationen wird die Abrechnung erstellt.

Durch die Vorgaben des Auftraggebers war ein Ausdruck der Abrechnungsdokumente sowie der gesamten Tagesprotokolle und Bautagesberichte der Abrechnung beizulegen. Der weitere Rechnungslegungsprozess erfolgte nach den Vorgaben des Auftraggebers in analoger Form. Vor der Implementierung war für die Aufmaßerstellung im tradierten Dokumentationsprozess ein Zeitaufwand des Bauleiters von zwei Tagen notwendig. Nach erfolgreicher Umsetzung der automatischen Aufmaßerstellung konnte der Zeitaufwand für die Aufmaßerstellung auf maximal 2 h reduziert werden. Geht man von einer täglichen Arbeitszeit eines Bauleiters von 10 h aus, so entspricht dies einer Reduktion des Zeitaufwands von Abrechnungsarbeiten von bis zu 90 %<sup>78</sup>.

### 8.1.3 Zeitersparnis

Eine wesentliche Motivation für Bauunternehmen in digitale Baudatenmanagementsysteme zu investieren und deren Entwicklung voranzutreiben ist es, den Dokumentations- und Analyseaufwand während der Ausführung für Bauleiter und Bautechniker zu reduzieren. Die Prozesse

<sup>78</sup>  $100\% - \frac{2\text{ h}}{2 \cdot 10\text{ h}}$



**Abb. 8.6:** Anlagen  $a$ , Pumpen  $p$  und Injektionen  $i$  pro Schicht im Vergleichszeitraum

der tradierten Dokumentation in Abschnitt 5.1.3 und eine Zeitaufschlüsselung der Zeitanteile in Abschnitt 5.3 zeigen die Tätigkeiten und Aufwände, die mit der täglichen und monatlichen Dokumentation und Analyse verbunden sind. Die tägliche Dokumentations- und Analysezeit gliedert sich demnach in die Zeiten für Datenbeschaffung  $t_D$ , die Auswertung  $t_A$  sowie die Abgabezeiten  $t_B$ . In der Vergleichsberechnung wurden die monatlichen Dokumentationsprozesse miteinbezogen. Auf der analysierten Baustelle wurden je nach Ausführungsphase eine bis fünf Anlagen je Schicht bedient. Die Abb. 8.6 zeigt die Ausgangslage der Berechnung.

Bei dieser Vergleichsrechnung wurde der Zeitraum der Haupttätigkeiten für die Abdichtungsinjektionen zwischen November 2017 und September 2019 in 23 Monaten ausgewertet. Mit Hilfe der Datenbank von eguana SCALES konnten die eingesetzten Schichten ermittelt werden. Grundsätzlich wurde im Durchlaufbetrieb gearbeitet. Im Vergleichszeitraum wurden 132.837 Injektionen in 1021 Schichten durchgeführt. Urlaubstage, vortriebsbedingte Stillstände und logistische Probleme reduzierten die Einsatzzeiten. Für den Vergleich wurden nach der Zeitberechnung nur jene Arbeitsschichten einbezogen, in denen wirklich Injektionen durchgeführt wurden. Die Injektionsstellen pro Schicht erreichten im Zeitraum von Mai bis Juni 2019 das Maximum von 308 Stück. Der unregelmäßige Einsatz der Maschinen und die unregelmäßig abgearbeiteten Injektionsstellen bedurfte einer Berechnung mit der Variation der Anlagen  $a$ , Pumpen  $p$  sowie Injektionsstellen  $i$  pro Schicht.

Zu diesem Zweck wurde, aufbauend auf der Modellberechnung für den Dokumentationsprozess, der digitale Dokumentationsaufwand mittels eguana SCALES auf der Pilotbaustelle für Abdichtungsinjektionen mit der herkömmlichen Dokumentationszeit verglichen. Bei mehreren Baustellenaufenthalten wurden die Zeitanteile für die Datenbeschaffung  $t_{Dd}$ , die Auswertung  $t_{Dd}$  und die Abgabe  $t_{Bd}$  ermittelt<sup>79</sup> und deren Prozesszeiten, die in Abhängigkeit zur Anlagen-, Pumpen-, und Injektionszahl stehen, aufgenommen. Die Parameter für die Berechnung

<sup>79</sup>Der Index d steht für digital

sind im Anhang Abb. E.1 auf Seite 305 dargestellt. Diese Baustelle eignete sich für einen aussagekräftige Berechnung, da sich der Vergleichszeitraum über 23 Monate erstreckte.

Die Aufstellung für die Dokumentation und Analyse mittels eguana SCALES unterscheidet sich vom tradierten Dokumentationsprozess in der Reduktion von Berechnungsanteilen und in der Verkürzung von Zeitanteilen. Der digitale Datenbeschaffungsprozess  $t_{Dd}$  ist, verglichen mit dem tradierten Prozess, durch den Zeitanteil des Authentifizierungsprozesses  $t_{Dhd}$  beim Zugriff auf die Website und die Konnektivität zu den Geräten bestimmt. Zeiten für Fußwege, Datenhandling mit portablen Speichermedien und Prozessen des Datentransfers fallen beim automatisierten Datenbeschaffungsprozess weg.

$$t_{Dd} = t_{Dhd}s \quad (8.1)$$

Der Auswertungsprozess nach dem Workflow der Funktionen des digitalen Datenmanagementsystems, dargestellt in Abschnitt 7.3.3, bewirkt, dass die manuell durchgeführten Verbesserungen der Zusammenfassungen  $t_{PÜ}$  gänzlich wegfallen und dass alle Übersichten und Protokolle aus einer zentralen Datenbank generiert werden. Die Herstellungsprozesse können durch die Tastenkombinationen und die vordefinierten Visualisierungen effizienter kontrolliert und kommentiert werden. Das einzelne Öffnen von Datenblättern ist nicht mehr erforderlich, da in den Webplattformen ohne erhöhte Zugriffszeiten zwischen den Einträgen navigiert werden kann. Durch den vordefinierten Prozessvorschlag können die Prozessdokumentationen der Geräte und Anlagen beschleunigt werden. Der digitale Auswertungsprozess  $t_{Ad}$  wird nach Gleichung (8.2) beschrieben.

$$t_{Ad}(i, p) = (t_{Dgd}(i) + t_{Pzd}(p))s \quad (8.2)$$

Der tradierte Abgabezyklus ist weiterhin Standard auf Injektionsbaustellen. Grundsätzlich kann bei digitalen Datenmanagementsystemen durch die unterschiedliche Rechteverwaltung die Freigabe und Ansicht über die Webplattform erfolgen, ohne Dokumente im PDF-Format zu erstellen, auszudrucken oder analog zu archivieren. Die digitale Abgabezeit  $t_{Bd}$  würde sich demnach nur auf einen digitalen Freigabeprozess beschränken. Auf dieser Baustelle wurde jedoch die Abgabe in definierten Injektionsprotokollen und Tagesübersichten gefordert. Durch die automatisierte Archivierung dieser Protokolle konnten die Zeiten für Ablage und Versendung eliminiert werden. Die Generierung der Protokolle wird in der Plattform wesentlich erleichtert. Der etablierte Abgabeprozess wird durch die Webplattform nach Gleichung (8.3) berechnet.

$$t_{Bd}(i, a, p) = t_{PDFd}(i, a, p)s \quad (8.3)$$

Da der Einsatz der Pumpen und Anlagen sowie die Anzahl der abgearbeiteten Injektionspunkte schichtweise stark variierten, wurde die tägliche Dokumentationszeit nach den Formeln



Bezugsgrößen							
Anzahl Diagramme pro Schicht		308	n/s	Anzahl der Injektionsdiagramme			
zu kommentieren	5 bis 15	10,0%	von n	Anzahl der zu kommentierenden Injektionsstellen			
zu eruieren	3 bis 10	7,0%	von n	Anzahl der zu eruierenden Injektionsverläufe			
Wegstrecke Anlage-Baubüro		1000	m	Fußweg vom Baubüro zu den Anlagen			
Anlagen		5	n	Anzahl eingesetzten Anlagen			
Pumpen		11	n	Anzahl der eingesetzten Pumpen			

Zeit pro Auswertezyklus								
		tradiert Prozess			digitaler Prozess			Einsparung
		[min]	[h]	[FTEs]	[min]	[h]	[FTEs]	[%]
<b>Datenbeschaffung</b>	$t_D$	64	1,07	0,13	1	0,01	0,00	99%
$t_{Fw}$	Fußweg	34	0,57	0,07	0	0,00	0,00	100%
$t_{Db}$	Bedienung Speichermedium	1	0,02	0,00	0	0,00	0,00	100%
$t_{Dt}$	Datentransfer	29	0,49	0,06	0	0,00	0,00	100%
$t_{Dh}$	Authentifizierung	0	0,00	0,00	1	0,01	0,00	-
<b>Auswertung</b>	$t_A$	325	5,41	0,68	142	2,36	0,30	56%
$t_{Dg}$	Diagramme	181	3,02	0,38	87	1,45	0,18	52%
$t_{PÜ}$	Protokolle und Übersichten	33	0,56	0,07	0	0,00	0,00	100%
$t_{PZ}$	Prozesszeiten	110	1,83	0,23	55	0,92	0,11	50%
<b>Abgabe</b>	$t_B$	58	0,97	0,12	19	0,32	0,04	68%
$t_{PDF}$	Druck	32	0,54	0,07	19	0,32	0,04	42%
$t_{ÜA}$	Ablage	26	0,43	0,05	0	0,00	0,00	100%
<b>Summe pro Schicht</b>		447	7,458	0,93	161	2,69	0,34	64%

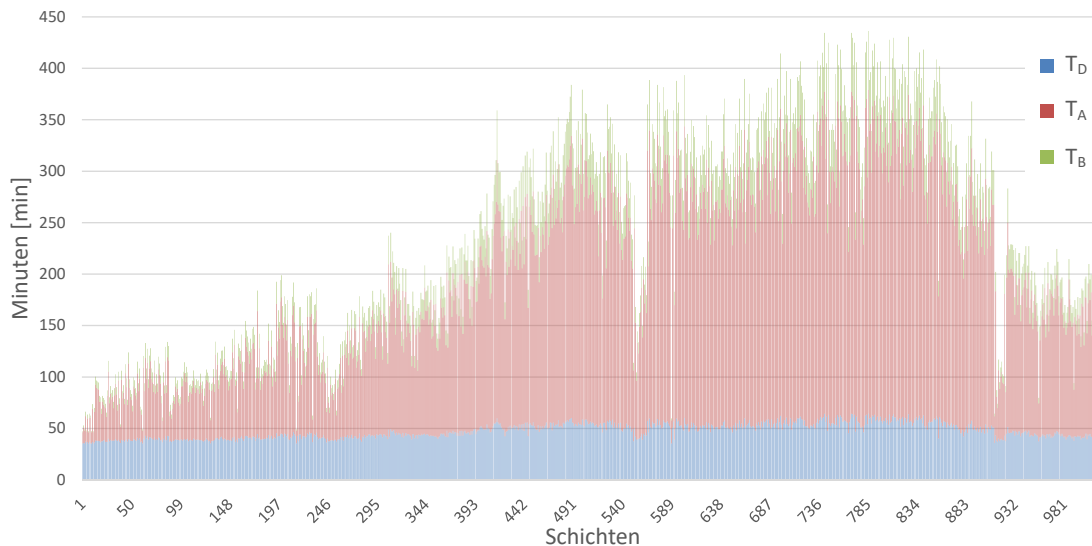
Abb. 8.7: Exemplarische Berechnung bei  $i = 308$ ,  $a = 5$  und  $p = 11$  für eine Schicht

Gleichung (5.1) bis Gleichung (5.3) für den tradierten Prozess und Gleichung (8.1) bis Gleichung (8.3) für den Prozess mit eguana SCALES einzeln für jede Schicht berechnet. Exemplarisch wird die Berechnung in Abb. 8.7 für eine Schicht mit der maximalen Anzahl an Injektionspunkten dargestellt.

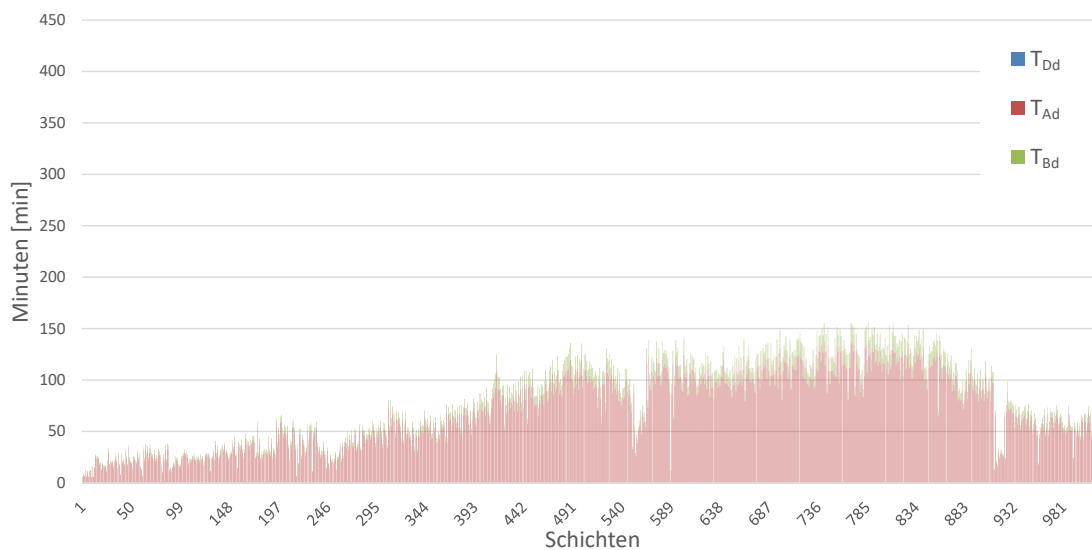
Der Gesamtvergleich für die Baustelle für die 1021 Schichten im Vergleichszeitraum ist in Abb. 8.8 dargestellt. Die Bereiche der Zeitanteile zueinander sowie die Zeitersparnis in Prozent ist in Tabelle 8.1 angegeben. Dabei ist ersichtlich, dass die Zeiten für die Datenbeschaffung auf Grund der Automatisierung nahezu eliminiert werden konnten, sich die Zeiten der Auswertung um mehr als die Hälfte reduzierten, und der Abgabeprozess ein zwei Drittel beschleunigt wurde.

Abrechnungsvorgänge  $t_{BQ}$  wurden für den Gesamtvergleich in der Aufstellung pro Monat ergänzt. Die Berechnungen sind im Anhang unter Abb. E.2 dargestellt. Die Differenz aus den Zeitaufwänden ergab im Vergleichszeitraum 48 bis 316 h/Mo. Für die beschriebenen Prozesse bedeutet dies eine Einsparung in FTE von 0,23 bis 1,35<sup>80</sup>. Über den Vergleichszeitraum der Haupttätigkeiten bei diesem Projekt bedeutet dies ein Einsparungspotential von 2810 h,

<sup>80</sup>Die Berechnung des Vollzeitäquivalents pro Monat für das nicht gewerbliche Personal beinhaltet 25 AT Urlaub und 10 Feiertage pro Jahr. Bei fünf Arbeitstagen pro Woche und 52 Wochen pro Jahr ergeben sich 225 Arbeitstage pro Jahr. Dies entspricht 19 AT/Mo oder 152 h/Mo.



(a) tradiert



(b) eguna SCALES

Abb. 8.8: Vergleich der täglichen Dokumentationszeiten bei der Feldstudie

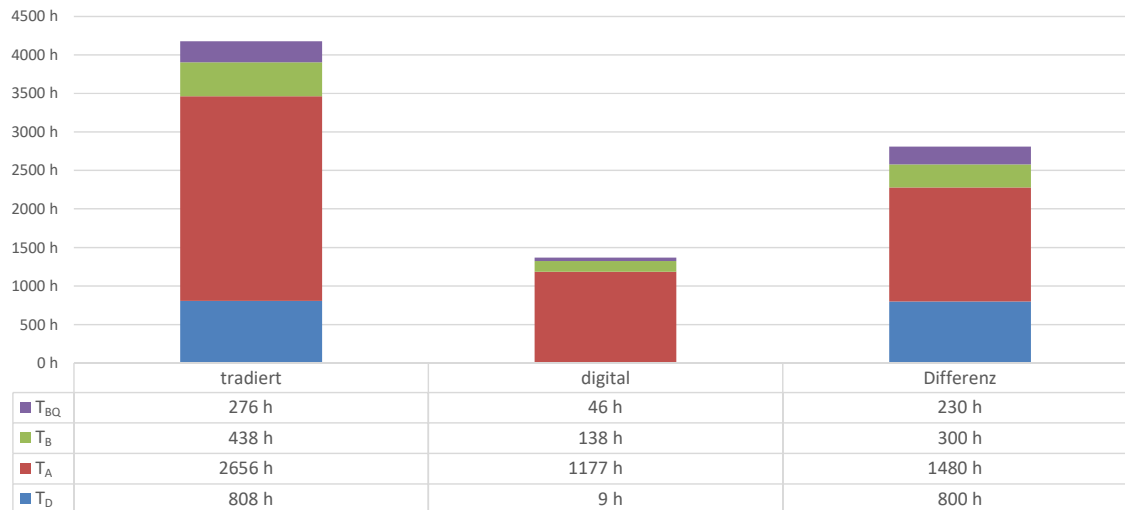


Abb. 8.9: Zeitersparnis im Dokumentations- und Analyseprozess beim Pilotprojekt

Tab. 8.1: Verhältnisse der Dokumentationstätigkeiten zueinander und Zeitersparnis beim Pilotprojekt

Tätigkeit	tradiert	digital	Zeitersparnis
Datenbeschaffung $t_D$	14-75 %	0-8 %	99 %
Auswertung $t_A$	23-73 %	87-97 %	52-57 %
Abgabe $t_B$	2-13 %	3-13 %	67-83 %
tägliche Dokumentationszeit	100 %	100 %	63-87 %

wobei 526 h auf den Injektionsbauleiter und 2284 h auf den Bautechniker entfallen<sup>81</sup>. Bei Bruttogehaltskosten von 10 000 €/Mo<sup>82</sup> für den Bauleiter und 8000 €/Mo für den Bautechniker [136, S. 179] ergibt sich ein Einsparungspotential von 132 950 €<sup>83</sup> im gesamten Vergleichszeitraum. Legt man diese Summe auf die 23 Einsatzmonate um, so hatte die Verwendung des digitalen Datenmanagementsystems in diesem Projekt ein direktes Einsparungspotential von 5779 €/Mo.

Das Argument, dass durch Reduktion von Zeiten für Bautechniker und Bauleiter keine Kostenersparnis entstünde, da diese ohnehin auf der Baustelle vorhanden sind, kann dadurch entkräftet werden, dass sich die Dokumentations- und Organisationsprozesse vermehrt standortunabhängig entwickeln und dadurch mehrere Projekte gleichzeitig abgewickelt werden können. Bei Wegfall der manuellen Dokumentationszeiten kann im gleichen Ausmaß die Qualität der Arbeitsvorbereitung gesteigert werden. In dieser Diskussion ist die Zeitersparnis jedoch nur ein Vorteil, der direkt auf der Baustelle quantifizierbar ist. Prozesse, die beispielsweise

<sup>81</sup>Für den Bautechniker entfallen dabei 100 % von  $t_D$  und  $t_B$  und 80 % von  $t_A$ . Die Restzeiten von  $t_A$  sowie  $t_{BQ}$  werden dem Bauleiter zugeordnet.

<sup>82</sup>In den Kosten ist eine 25 h/Mo Überstundenpauschale, Mobiltelefon und Auto inkludiert.

<sup>83</sup> $132\,950\text{ €} = \frac{8000\text{ €/Mo} \cdot 2284\text{ h} + 10\,000\text{ €/Mo} \cdot 526\text{ h}}{152\text{ h/Mo} + 25\text{ h/Mo}}$

nach Abschluss der Baustellentätigkeiten erfolgen und auf Archivdaten zurückgreifen müssen, sind nicht quantifizierbar, weil diese unregelmäßig auftreten. Das Potential der standardisierten Prozesserfassung und der zentralen Speicherung von Herstellungsdaten liegt in der Kalkulierbarkeit von Risiken bei neuen Projekten durch die Rückführung der aufgenommen Kennwerte.

#### 8.1.4 Bauzeitprognose

Im Zuge der Auswertungen der Baudaten mittels des digitalen Baudatenmanagements in diesem Pilotprojekt, entstand die Idee der Entwicklung einer Bauzeitprognose in Echtzeit. Dieses Kapitel beschreibt die Herangehensweise und theoretische Überlegungen, die für die Berechnung im gegenständlichen Projekt herangezogen wurden.

Bei den systematischen Injektionen des Projektes ging man von einer Bauzeit von über zwei Jahren aus. Nachdem alle Herstellungsdaten des Injektionsprozesses von Beginn an in eguana SCALES gespeichert wurden, konnte mit den Rohdaten während der Ausführung eine Simulation erstellt werden, die in weiteren Entwicklungsschritten in Echtzeit-Baudatenmanagementsysteme implementiert werden können. Anhand des Pilotprojektes für die systematischen Abdichtungsinjektionen wurde ersichtlich, dass die Ausführungszeiten je Beaufschlagung und die Verfügbarkeit der Pumpen je Anlagen stark variieren. Außerdem bewirkten Konzeptwechsel während der Ausführung weitere Leistungsänderungen, die in der Simulation erfasst werden. Das Beispiel zeigt, dass zu einer vollständigen Bewertung Daten, die nicht im System integriert sind, notwendig sind. Die Bauzeitprognose wurde mittels der Programmiersprache Python 3.7. in der Entwicklungsumgebung Spyder<sup>84</sup> aufgesetzt, der Programmiercode kann für die weitere Verwendung beim Autor erfragt werden.

Die Simulation baut auf der Grundüberlegung auf, dass sich die Anzahl der verbleibenden Schichten aus dem Verhältnis der notwendigen Injektionszeit  $T$  zur Pumpenverfügbarkeit  $V$  ergibt.

$$S = \frac{T}{V} \quad (8.4)$$

Werden während der Injektionstätigkeiten gleichzeitig Anlagen mit verschiedenen Injektionsmitteln oder Injektionstypen betrieben, muss bei der Berechnung nach Injektionstypen unterschieden werden. Bei dieser Feldstudie wurden die zwei Typen AI und BV in der Planung deklariert. Die notwendige Injektionszeit im Nenner in Gleichung (8.5) ergibt sich für jeden Injektionstyp aus dem Produkt der verbleibenden Beaufschlagungen  $b(k)$  und der Zeit  $t(k)$  pro Beaufschlagung. Die Prognose der Beaufschlagungen pro Typ sowie der notwendigen Injektionszeit pro Beaufschlagung ist von diversen Rahmenbedingungen abhängig, weshalb

<sup>84</sup>Weiter Information findet sich unter:<https://www.spyder-ide.org/>.

eine deterministische Berechnung des Mittelwerts nicht zielführend wäre. Schwankungen würden unzureichend in die Prognose aufgenommen werden.

$$S(k) = \frac{b(k)t(k)}{a(k)} \quad (8.5)$$

Die Restbeaufschlagungen  $b(k)$  sind von den geplanten Packerstellungen im Soll, den ausführungsbedingten Mehrversuchen, sowie den abweichenden Beaufschlagungen auf Grund der baubegleitenden Anpassungen abhängig. Für die Berechnung werden in der dynamischen Prognose die Daten direkt aus der Datenbank abgegriffen und die fertigen Bereiche gekennzeichnet, die bereits für darauffolgende Bauprozesse, wie dem Innenschaleneinbau, freigegeben wurden. Als Berechnungsgrundlage werden die freigegebenen Herstellungsdaten mit den definierten Typen herangezogen. Die finalisierten Bereiche<sup>85</sup> können über die gespeicherten Lageparameter gefiltert werden. In diesem Beispiel wurde nach den Attributen Tunnelröhre und Tunnelmeter abgegrenzt. Die Anzahl der Beaufschlagungen im ausgewählten Bereich  $b_{fz}$ , die aus der Datenbank entnommen wurden, spiegeln die Beaufschlagungen im Ist wider und enthalten demnach geplante Nachinjektionen sowie Beaufschlagungen die durch ausfahrungsrelevante Vorgänge entstanden sind. Aus der Planung kann in gleicher Weise die Anzahl der Beaufschlagungen  $p_{fz}$  für die unterschiedlichen Typen im Vergleichsabschnitt entnommen werden. Daraus ergeben sich die Vergleichsfaktoren  $f$  nach Gleichung (8.6) für unterschiedlichen Typen  $k$ . In diesem Beispiel lag der Wert zwischen 1,01 und 1,30 je nach Typ. Dies bedeutet, dass im Vergleichsabschnitt 1 bis 30 % Mehrbeaufschlagungen notwendig waren, um diesen für weitere Bautätigkeiten freizugeben. Für rein bauzeitliche Analysen nicht relevant ist dabei, ob die Mehrbeaufschlagungen aus der Sphäre des Planers oder der ausführenden Firma stammen. Diese Zuteilung kann über weitere Leistungskennzahlen hergestellt werden.

$$f(k) = \frac{b_{fz}(k)}{p_{fz}(k)} \quad (8.6)$$

Der Lageparameter  $c(k)$  gibt in der Prognose an, inwieweit der berechnete Faktor  $f(k)$  für alle geplanten Beaufschlagungen gültig ist. Dieser Parameter ergibt sich aus dem Verhältnis der geplanten Mengen im Vergleichsabschnitt zur Gesamtmenge der vorgesehenen Packerstellungen und gibt somit an, wie viel Prozent der Planung bereits finalisiert wurde. Mit diesen Parametern wird eine Verteilung für noch auszuführende Packerstellungen prognostiziert, die den Anteil der Vergleichsstrecke sowie geplante und ausgeführte Punkte berücksichtigt. Die Dichtefunktion ist in Abb. 8.10 dargestellt, der Lageparameter  $c(k)$  ist als Verhältnis des absoluten Wertes  $c'$  zur Öffnungsweite des Dreiecks zu interpretieren. Dieser ergibt sich aus Gleichung (8.7). Die Menge  $p_{\text{all}}$  ist demnach die Gesamtmenge aller Packerstellungen die in der Ausführungsplanung für den jeweiligen Typ vorgesehen ist, die Menge  $b_{\text{all}}$  entspricht der Gesamtmenge der bereits ausgeführten Beaufschlagungen. Als Grenzwert der Dreiecksfunktion ergibt sich der Minimalwert der noch auszuführenden Packerstellungen aus der Überlegung,

<sup>85</sup>Dafür wird die Abkürzung fz, für fertige Zonen verwendet.

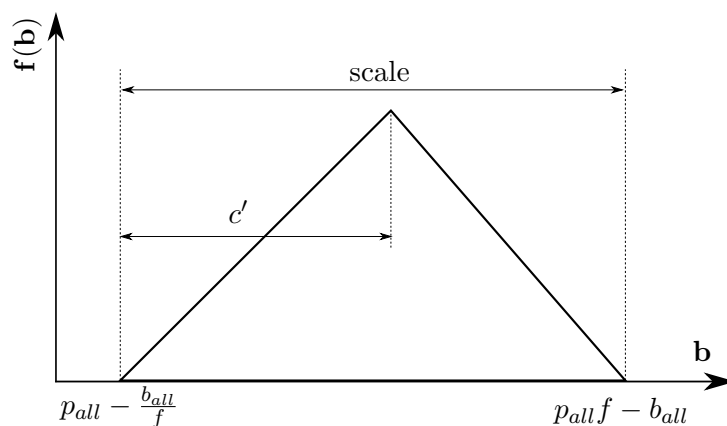


Abb. 8.10: Dreiecksdichtefunktion für die Restbeaufschlagungen

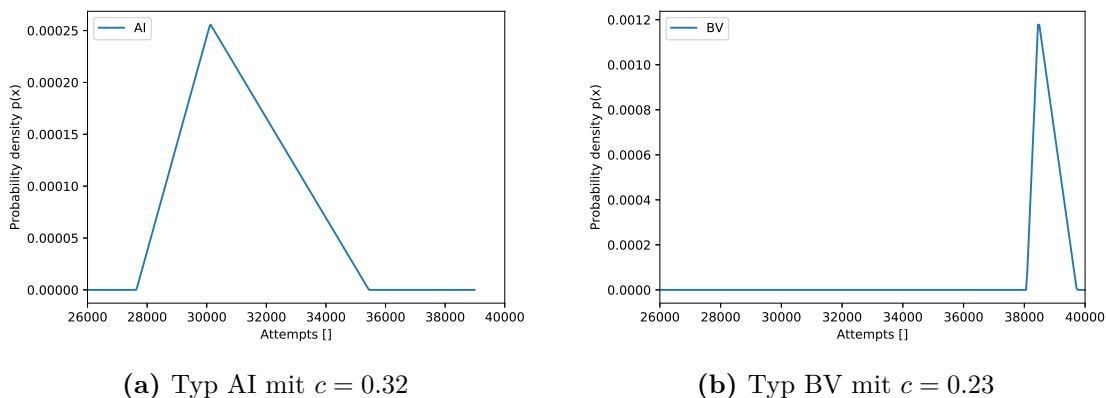


Abb. 8.11: Dreiecksverteilung von Restbeaufschlagungen für unterschiedliche Typen

dass sich die Mehrmengen nur auf die bereits durchgeführten Mengen  $p_{all}$  beziehen. Als Maximalwert gilt die Annahme, dass sich die Mehrmengen auf den gesamten Planungsbereich beziehen. Daraus ergibt sich, dass die Funktion am Beginn der Bautätigkeiten ( $f(k) \rightarrow 1$ ,  $b_{all} \rightarrow 0$ ) auf den Wert  $p_{all}$  und nach Fertigstellung ( $c(k) \rightarrow 1$ ,  $b_{fz} = b_{all}$ ,  $p_{fz} = p_{all}$ ) auf den Wert null begrenzt ist. Die Öffnungsweite „scale“ ergibt sich aus den aktuellen Baudaten und ist dynamisch.

$$c(k) = \frac{p_{fz}(k)}{p_{all}(k)} \quad (8.7)$$

Für jeden Zeitpunkt konnte damit die prognostizierten Restbeaufschlagungen ermittelt werden. Beispielhaft sind in Abb. 8.11 zwei Restmengenverteilungen abgebildet.

Nach der Prognostizierung der Restbeaufschlagungen auf Grundlage der Planungs- und Ausführungsdaten, müssen in einem weiteren Schritt die Verteilungskurven für die Minuten pro Beaufschlagung gefunden werden. Dazu werden die Dauern pro Typ aus den Datenpa-

**Tab. 8.2:** Verteilungen für Vorgangsdauern [66]

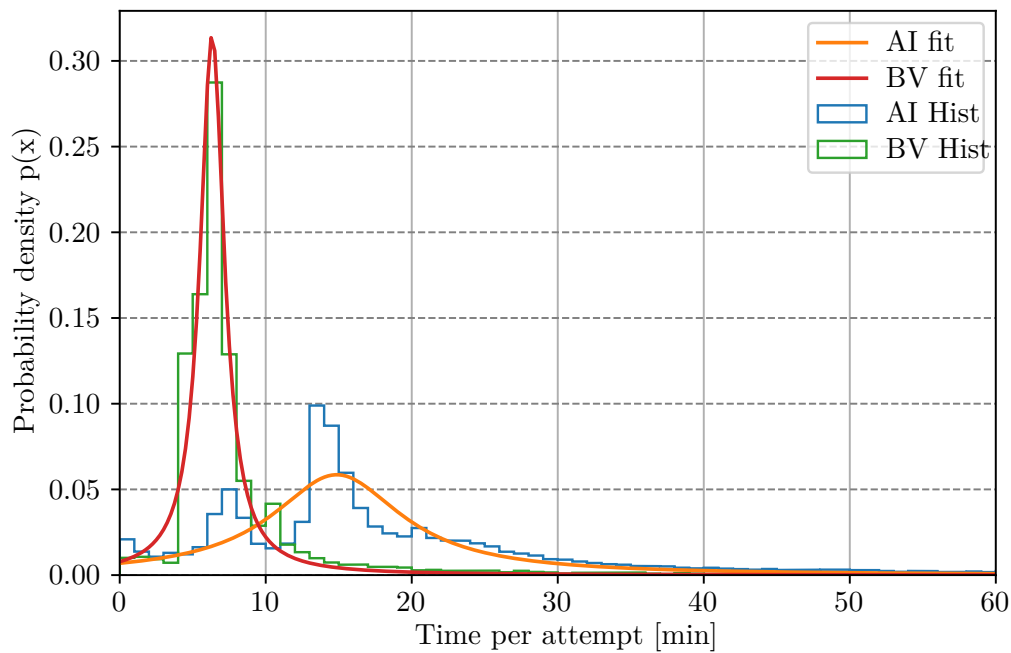
Verteilung	Autor
Beta	[56], [133]
Dreieck	[56]
Erlang	[76]
Exponential	[76]
Gamma	[133]
Log-Normal	[56]
Normal	[76], [133]
PERT	[54]
Rechteck	[56], [76]
Weibull	[133]

keten entnommen und anschließend einer Ausgleichsrechnung<sup>86</sup> zugeführt. Dabei werden in Python 3.7. mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode die Parameter einer stetigen Dichtefunktion angepasst. Die Funktion des implementierten Algorithmus' kann in [4, S. 259] nachgelesen werden. Für Vorgangsdauern kommen in der Bauwirtschaft die Verteilungen nach Tabelle 8.2 zum Einsatz.

Die Eignung wurde auf der Basis theoretischer Überlegungen oder erhobener Daten getestet. Die Güte der Anpassung wird durch unterschiedliche Tests quantifiziert. Dabei stehen der  $\chi^2$ -, der Kolmogorov-Smirnov- sowie der Anderson-Darling-Test zur Verfügung. Wird der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auch für kleine Stichproben ( $n < 50$ ) und stetige Funktionen angewendet [66], so kommt der  $\chi^2$ -Test vor allem bei großen Stichproben und diskreten Verteilungen zum Einsatz [134]. Bei dem vorgestellten Modell wird die Verteilung aus Tabelle 8.2 an den Datensatz angepasst und im Anschluss jene Funktion ausgewählt, die die besten Testergebnisse erzeugt.

Bei den Injektionsdauern, kann trotz gleicher geologischer Bedingungen, aber unterschiedlichen Parametern, wie wechselnden Abbruchbedingungen oder gerätebedingte Störungen, keine optimale Verteilung gefunden werden. Liegen in der Datenbank mehr als 1000 Injektionsdaten vor, so generiert der Rechenalgorithmus aus dem Histogramm eine Verteilungsdichtefunktion, die in einem Intervall von jeweils einer Minute eine abschnittsweise Funktion definiert. Somit können baustellenspezifische Vorgänge in der Simulation miteinbezogen werden. Das Programm ermöglicht definierte Zeiträume auszuwählen, die für die Berechnung berücksichtigt werden können. Abb. 8.12 zeigt eine Anpassung an bestehende Datenpunkte während des Projektes. Dabei lagen zur Mitte der Bauzeit bereits über 60 000 Datenpunkte vor. In diesem Fall wurde die beste Anpassung mit einer Cauchy-Verteilung erreicht, insbesondere beim Typ

<sup>86</sup>besser bekannt als Curve fitting

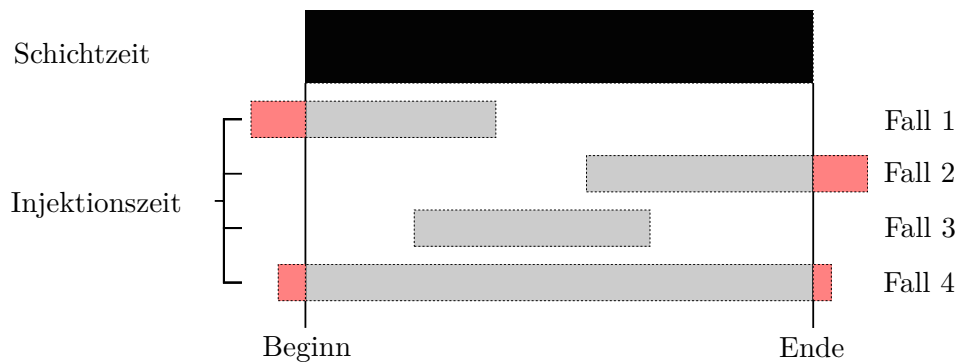


**Abb. 8.12:** Dichtefunktion für Injektionsdauern mit Stichproben  $n$  ( $n_{AI} = 49.136$ ,  $n_{BV} = 19.965$ )

AI ist zu erkennen, dass es teilweise zu lokalen Maxima kommt, die in der Simulation nicht mehr berücksichtigt werden würden. Das normierte Histogramm mit der Klassenbreite von einer Minute wurde zur weiteren Berechnung herangezogen. Bei diesem Projekt bildeten die einzelnen Typen ganz andere Charakteristiken aus. Wurden beim Type BV durchschnittliche Zeiten von ca. 10 min erreicht, so liegt der Mittelwert bei AI bei 23 min mit einer Standardabweichung von rund 26 min im Vergleich zum Herstellungsprozess des Bohrlochverschlusses mit rund 14 min. In diesem Fall ist eine getrennte Betrachtung für die weitere Berechnung notwendig.

In einem weiteren Schritt werden die Bautagesberichte für die Bildung der Verteilung der Pumpenzeiten  $a(k)$  in Gleichung (8.5) pro Schicht und Typ in das Programm eingelesen. In diesem Projekt lagen die Bautagesberichte monatsweise als Excel-Datei vor, wobei jeder Schicht ein einzelnes Arbeitsblatt entsprach. Für die weitere Betrachtung wurden der Beginn, das Ende sowie die Anzahl der vermerkten gewerblichen Arbeiter pro Schicht gezählt und über alle Dateien und integrierten Blätter iteriert. In der Auswertung der Bautagesberichte mussten eine Vielzahl von Ausnahmen integriert werden, da Form und Anzahl der Blätter variierten und Schichten doppelt vorhanden waren. Es zeigte sich, dass für systematische Auswertungen des Bautagesberichts, Tabellenkalkulationsprogramme nicht geeignet sind. Für die Implementierung auf zukünftigen Baustellen wäre ein vordefiniertes Eingabeformat erforderlich, um manuelle Nacharbeiten in der Analyse ausschließen zu können [149].





**Abb. 8.13:** Zuordnung von Injektionszeit zu Schichtzeit

Der Algorithmus ordnete danach die Rohdaten aus der Datenbank den Schichtzeiten zu. Bei der Datenbank ist pro Injektionspunkt eine Pumpenbezeichnung hinterlegt. Bei diesem Bauprojekt handelte es sich um 12 verschiedene Injektionspumpen, eingeteilt in fünf Anlagen. Aus Gründen des Zweischichtenbetriebs wurden Herstellungsprozesse über die Schichtgrenzen hinweg durchgeführt. Dies führte zu vier verschiedenen Fallunterscheidungen bei der Zuordnung der Herstellungszeiten auf eine Schicht. Die vier verschiedenen Fälle sind in Abb. 8.13 abgebildet. Mit dieser Fallunterscheidung gelang die exakte Zuordnung der Injektionszeiten aus der Datenbank zu den definierten Schichtgrenzen aus den Bautagesberichten. Jeder abgearbeiteten Schicht konnten dadurch die unterschiedlichen Pumpenzeiten zugeordnet werden. Als Ergebnis dieser Berechnung wird ein Zusammenhang zwischen Injektionszeit, Anzahl an arbeitenden gewerblichen Mitarbeitern und Pumpen gebildet.

Für die Bauzeitprognose werden die Pumpenzeiten zusammengefasst, die für die einzelnen Typen pro Schicht anfallen. Als wesentlicher Einflussfaktor gilt nun die Auswahl des Bereichs, in dem alle Anlagen so im Einsatz waren, wie diese für zukünftige Arbeiten auch zur Verfügung stehen werden. Bei dieser Auswahl kann sollten die Bereiche der Einarbeitung und Versuchsdurchführung ausgespart werden. In den Anfangsphasen von Projekten kommt es zu Änderungen in der Konzeption, zu kontinuierlichem Aufbau von Geräten und Personal und zu Änderung von Maschinenteknik. Abb. 8.14 zeigt den durch die Bauleitung ausgewählten Bereich einer Bauzeitanalyse im Projekt, in dem das Injektionskonzept konstant gehalten wurde und Geräte- und Materialadaptionen nicht mehr vorgenommen wurden. Die Schwankungen in der Anzahl der gewerblichen Arbeiter und die damit verbundene Injektionszeit wird durch die Simulation abgebildet. Beispielsweise wurden die Zeiten aus Abb. 8.14 im ersten Drittel der Betrachtung von 10-12 Arbeitern erledigt und in weiterer Folge auf bis zu 20 Mann aufgestockt.

Mit diesem aufbereiteten Datensatz bildet der Algorithmus die aktuellen Verteilungskurven, die für die Monte-Carlo-Läufe verwendet werden. Abb. 8.15 zeigt die Dichtefunktionen zu den Werten aus Abb. 8.14. In diesem Fall hat sich die Gamma-Verteilung als beste Näherung herausgestellt. Sofern es die Gerätekonfiguration ermöglicht, dass von allen Injektionsanlagen unterschiedliche Typen abgefahren werden können, ist für die gesamtbaueitliche Betrachtung

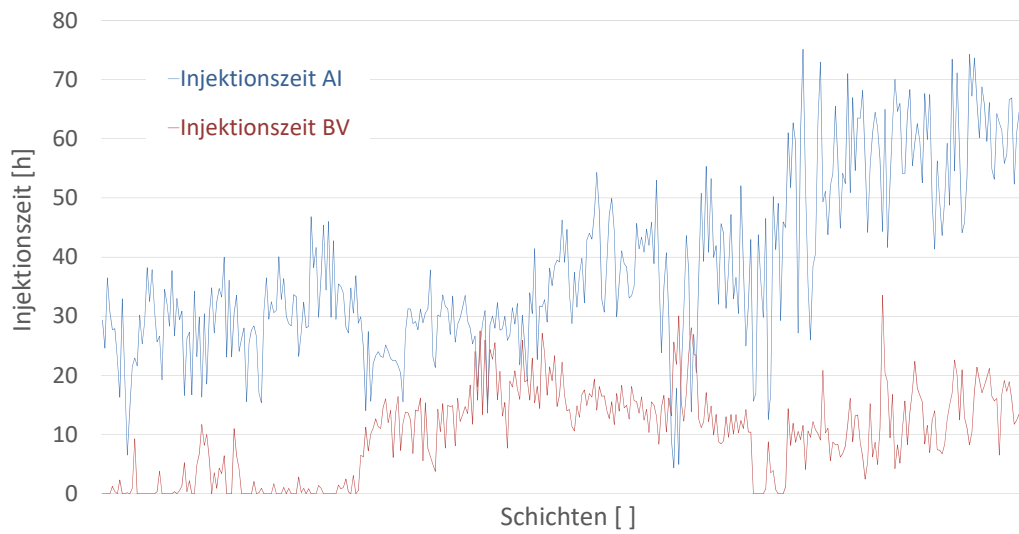


Abb. 8.14: Reihenanalyse der Schichtzeit

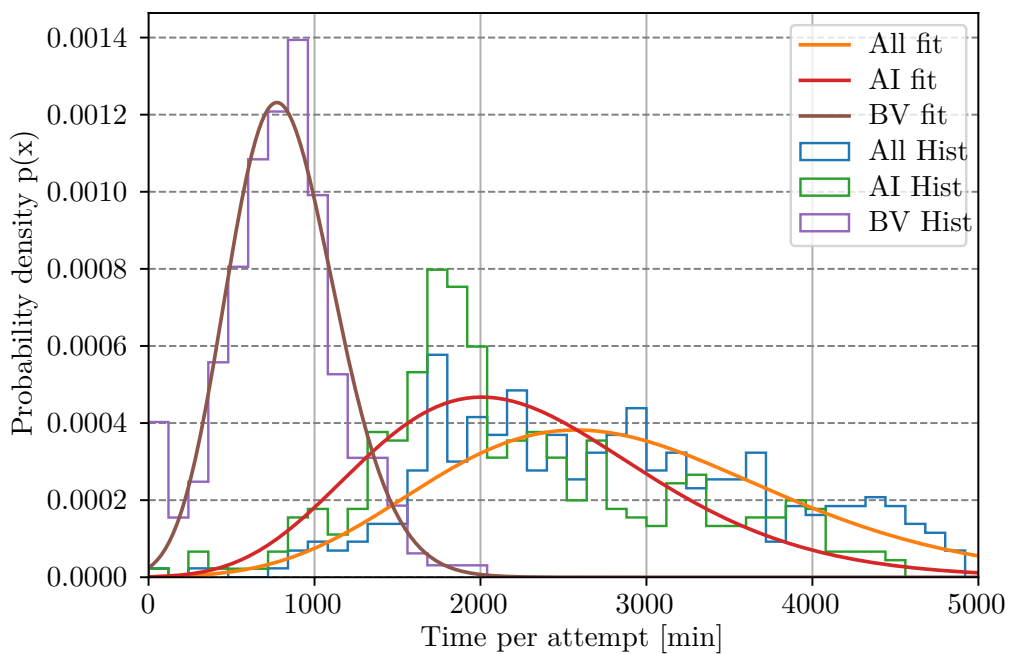


Abb. 8.15: Dichtefunktion für Injektionszeit pro Schicht mit Stichproben  $n$  ( $n_{\text{All}} = 376$ ,  $n_{\text{AI}} = 376$ ,  $n_{\text{BV}} = 269$ )

eine gemeinsame Verteilung ausreichend<sup>87</sup>. In diesem Pilotprojekt wurden die Typen von unterschiedlichen Anlagen ausgeführt, weshalb eine getrennte Betrachtung herangezogen werden musste. Mit den Dichtefunktionen für die Restbeaufschlagungen und Injektionszeiten je Typ und den Netto-Injektionszeiten pro Schicht wird nach Gleichung (8.5) die restliche Bauzeit, in Schichten ausgedrückt, berechnet. Ein Simulationsschritt besteht aus vier nacheinanderfolgenden Rechenschritten, die in Abb. 8.16 dargestellt sind. Ein Simulationslauf setzt sich so zusammen, dass für jeden Typ eine mögliche Anzahl an notwendigen Restbeaufschlagungen aus der Dreiecksverteilung entnommen wird. Für jede Einzelbeaufschlagung der Gesamtanzahl  $b$  entnimmt der Algorithmus daraufhin eine Zeit  $t$  aus der angepassten Dichtefunktion für die Injektionsdauer. Die Summe aus diesen Vorgängen entspricht einer möglichen notwendigen Gesamtinjektionszeit  $T$ . Das Monte-Carlo-Probeerhebungsverfahren entnimmt in einem dritten Rechenschritt einen zufällig erhobenen Wert aus der Dichtefunktion für die Injektionszeit pro Schicht, was einem möglichen Wert  $a$  für die Anlagenverfügbarkeit entspricht. Am Abschluss einer Simulation wird die Gesamtinjektionszeit durch die Anlagenverfügbarkeit dividiert. Als Ergebnis ergibt sich eine mögliche Anzahl an notwendigen Schichten  $S$  für die Abarbeitung der restlichen Packerstellungen.

Für die Bauzeitanalyse empfehlen sich mindestens 50 000 Iterationsschritte [66, S. 212]. Der Bezug auf Schichten ist in diesem Fall im Hinblick auf die baubetrieblichen Vorgänge sinnvoll, da Prozesse, wie Maschinenkalibrierungen, Probeentnahmen oder Versuche für die Qualitätssicherung bei Schichtübergaben, erledigt werden. Sofern die Schichtzeiten stark variieren, kann die Einheit Stunden gewählt werden. Nach der Auswertung der Bautagesberichte in diesem Projekt ergab sich beim Stand von 640 abgearbeiteten Schichten und der begrenzten Maximalzeit pro Schicht von zwölf Stunden ein Mittelwert von 11,95 Stunden. Dadurch ist der Bezug auf verbleibende Schichten zweckmäßig. Die Probeentnahme im zweiten und dritten Rechenschritt ist durch die Extrema im Algorithmus begrenzt. Beispielsweise ist in der Pumpensteuerung beim Injektionsvorgang eine maximale Injektionszeit integriert, oder ein Abbruch durch den Pumpenfahrer in der Injektionsfestlegung vorgesehen. Die Dichtefunktion der gewählten Verteilung nähert sich bei großen Zeiten der Dichte null an. Die dynamische Bauzeitprognose berücksichtigt bei der Auswahl der Werte aus der Dichtefunktion die betrieblich maximal mögliche Injektionsdauer.

Beim gegenständlichen Projekt wurde die Injektionsdauer pro Beaufschlagung mit den Randbedingungen  $t_{\min} \geq 0$  min und  $t_{\max} \leq 0$  min festgelegt. Für die maximale Anlagenverfügbarkeit ergab sich für die Stichprobenauswahl die Randbedingung  $a_{\min} \geq 0$  und  $a_{\max} = nS_{\max}$  min/Schicht. Dabei entspricht  $n$  der Anzahl der maximal verfügbaren Anlagen des Types auf der Baustelle und  $S_{\max}$  der maximalen Arbeitszeit in min/Schicht. Das Probeerhebungsverfahren in Python entspricht einem nicht-deterministischen Zufallsgenerator der quasizufällige Ergebnisse liefert. Es handelt sich dabei um „Pseudozufallszahlen“. Das Monte-Carlo-Probeerhebungsverfahren entnimmt aus den dazugehörigen Wahrscheinlichkeitsfunktionen der gebildeten Dichtefunktionen zufällige Werte für die Wahrscheinlichkeit

<sup>87</sup>als „All“ bezeichnet

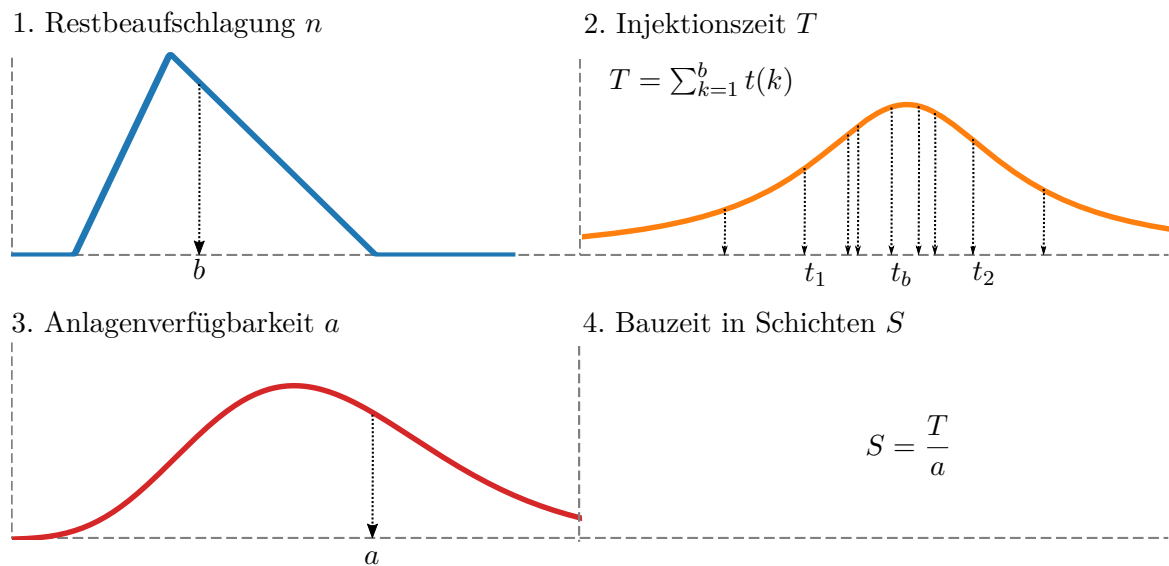


Abb. 8.16: Vier Vorgänge eines Iterationsschrittes

$P(x) = 0 \rightarrow 1$  und errechnet die zugehörigen Werte der Abszisse. In der Bauzeitanalyse entsprechen diese Werte den Restbeaufschlagungen  $b$ , den Injektionsdauern  $t$  sowie den Zeiten pro Schicht  $a$ .

Nachdem 50 000 Mal die Iterationsschritte durchlaufen wurden, ergibt sich ein Datensatz mit den möglichen Restschichten  $S$ . Das sich daraus ergebende Histogramm wird in Abb. 8.17 mit einer Klassenbreite von 12 Schichten<sup>88</sup> normiert dargestellt und bildet alle möglichen Szenarien der Simulation ab. Für weitere Betrachtungen müssen Bandbreiten angegeben werden, innerhalb denen sich ein gewisser Prozentsatz eines Ergebnisses befindet. Die Streuung der Ergebnisse gibt einen Rückschluss darauf, wie stabil das Produktionssystem ist. Anhand der Ergebnisse aus Abb. 8.17 zeigt sich, dass die Differenz der Quantile für AI  $Q_{90} = 594$  und  $Q_{10} = 206$  Schichten weit auseinander liegen. In dieser Spanne liegen demnach 80% aller möglichen Werte für die Bauzeit. Für eine Einschätzung, wie lange Baustellenpersonal auf der Baustelle eingesetzt werden soll, ist es möglich wiederum den Median heranzuziehen und um diesen in einem gewissen Wahrscheinlichkeitsbereich eine Abschätzung vorzunehmen. Der Median entspricht dem 50%-Quantile der Simulationswerte und ergibt sich bei diesem Beispiel für AI zu 326 d.

Mit Hilfe der kumulierten relativen Häufigkeit werden die Ergebnisse der Simulation visuell interpretierbar. Diese Darstellung bietet sich für eine Implementierung im digitalen Datenmanagementsystem an und ermöglicht dem Bauleiter eine dynamische Bauzeitanalyse. In Abb. 8.18 wird die Darstellung exemplarisch mit einem Risikobereich von 50-80% dargestellt. Mit konstanter Schichtleistung, einem hohen abgeschlossenen Grad an fertiggestellten und freigegebenen Bauabschnitten sowie einem geringen Faktor  $f(k)$  für Mehrbeaufschlagungen im Vergleich zur Planung unterliegen die Simulationen für die Bauzeit einer geringeren Streuung.

<sup>88</sup>Diese Klassenbreite ergibt in diesem Projekt eine Woche.

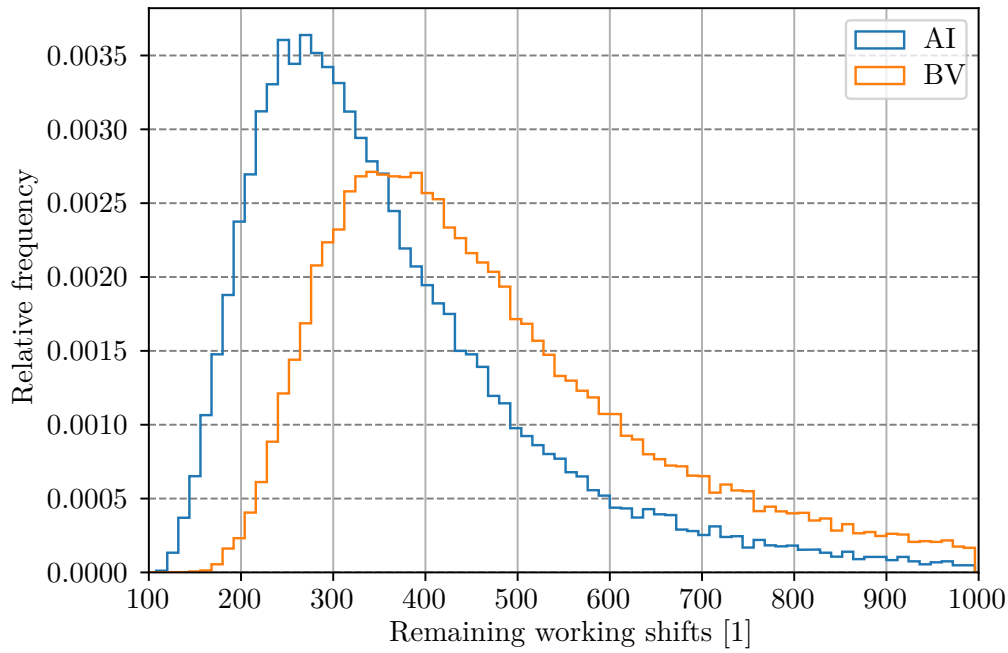


Abb. 8.17: Histogramm einer Bauzeitsimulation mit 50.000 Iterationsschritten

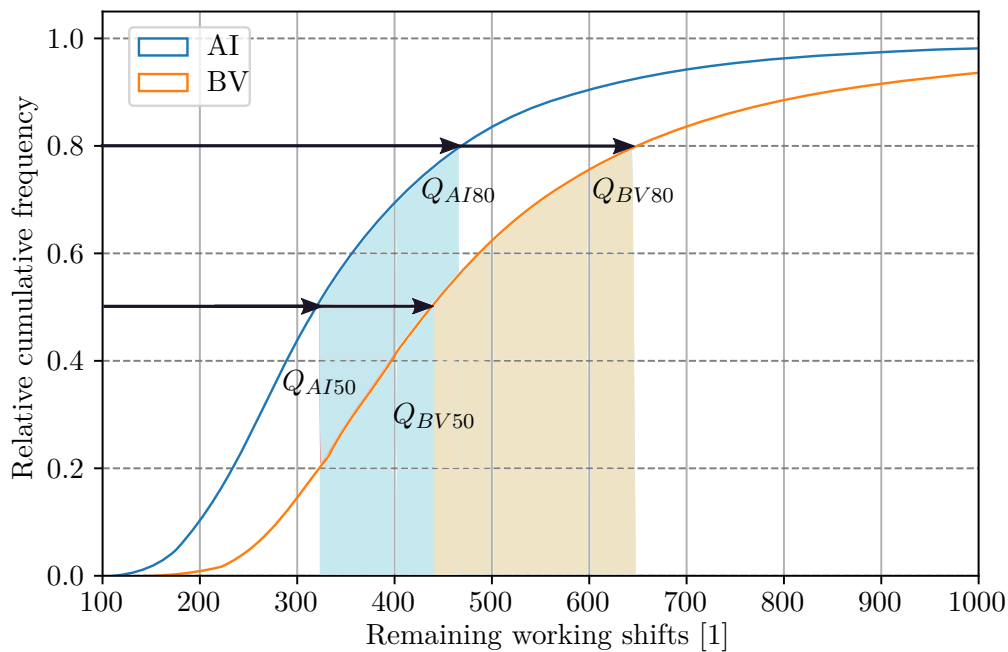


Abb. 8.18: Relative kumulierte Häufigkeitsverteilung einer Bauzeitsimulation mit 50.000 Iterationsschritten

Das Modell beschreibt eine Möglichkeit der dynamisch fortlaufenden Berechnung der Bauzeit. Die exemplarischen Abbildungen in diesem Unterkapitel spiegeln einen definierten Zeitpunkt der Betrachtung wider. Mit fortlaufender Integration der Baudaten verändern sich die Werte der Simulation und bilden damit Stillstände oder Leistungsänderungen in der Prognose ab. Für eine Integration in ein digitales Echtzeitsystem sind zusammengefasst folgende Schritte notwendig:

- Prognosepläne für die gesamten Injektionstätigkeiten integrieren.
- Zugriff auf Rohdaten der Injektionsdatenbank ermöglichen.
- Parameter aus der Beaufschlagungs-Identifikation mittels Regex<sup>89</sup>-Funktion extrahieren.
- Automatische Schnittstelle zum Bautagesberichtssystem herstellen.
- Bautagesberichte nach Arbeitsdauer, Personal- und Maschinenstand auslesen.
- Bereiche der fertiggestellten und freigegeben Vergleichsstrecken eingeben.
- Zu untersuchende Injektionstypen filtern.
- Für die freigegebenen Abschnitte den Vergleichsfaktor zwischen Beaufschlagungen im Soll und Ist bilden.
- Dreiecksverteilung für die Restbeaufschlagungen generieren.
- Probeausführung und Herstellungsphasen mit veralteten Ausführungskonzepten von der Regelausführung abgrenzen.
- Verteilungsfunktionen für die Zeit pro Beaufschlagung finden.
- Injektionszeiten je Pumpe zu den Schichtzeiten zuordnen.
- Bereich mit zukünftig geplantem Personalstand filtern.
- Anlagen mit gleichen Injektionstypen zusammenfassen.
- Beste Verteilungsfunktion für die Zeiten je Schicht finden.
- Baubetriebliche Grenzen für die Generierung der Stichproben festlegen.
- Simulation mit mindestens 50 000 Iterationsschritten nach Abb. 8.16 durchführen.
- Wahrscheinlichkeitsbereich definieren ( $> Q_{50}$ )
- Veränderung der Bauzeiten in periodischen Abständen vergleichen.

Bei stark unterschiedlichen Verpresslängen je Typ ist eine weitere Verfeinerung des Modells innerhalb eines Injektionstyps nach Bohrlängen sinnvoll. Das wäre nur möglich, indem die Ist-Längen der Bohrdaten integriert werden. Die Anwendung einer Bauzeitsimulation anhand

---

<sup>89</sup>regular expression[44]

der verfügbaren digitalen Daten zeigt, dass der Injektionsprozess bei diesem Projekt großen Unsicherheiten unterworfen war und eine deterministische Berechnung der Bauzeit in diesem Fall keine Aussagekraft gehabt hätte.

## 8.2 Weichgelsohle

Das entwickelte System kam bei einer Weichgelinjektion zum Einsatz, die bis zu 25 Meter tief zur Abdichtung von neun Baugrubensohlen hergestellt wurde. Dabei waren zwei Injektionscontainer mit sechs bis acht Pumpen im Mehrschichtbetrieb im Einsatz. In der Herstellungsphase sind ca. 200 Packerstellungen pro Tag abzuarbeiten und insgesamt 37.500 Injektionspunkte vorgesehen. Alle Injektionsvorgänge mussten detailliert dokumentiert werden, weshalb ein digitales Datenmanagement notwendig wurde. Das Injektionskonzept sah vor, dass drei Injektionslanzen mit einer Spülbohrung abgeteuft wurden. Die Fußventile wurden im vertikalen Abstand von 0,35-0,5 m angeordnet. Zu Beginn stellte das Unternehmen eine Deckelinjektion mit Zementsuspension her. Nach ein paar Tagen erfolgte die Injektion der ersten und zweiten Stufe des Weichgels unterhalb des Deckels. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahren findet sich unter [152].

### 8.2.1 Tägliche Dokumentation

Bei Interviews mit dem Bauleiter wurde erhoben, dass durch das neue System eine Praktikantin die halbtags für den täglich tradierten Dokumentationsprozess angestellt wurde, durch die Einführung des digitalen Systems anderen Tätigkeiten auf der Baustelle nachgehen konnte.

### 8.2.2 Kommunikation Bauaufsicht - Bauleitung

Besonderes Augenmerk lag neben der Digitalisierung und Automatisierung des täglichen Dokumentationsprozesses auf der Visualisierung des Baufelds, damit Problemstellen mit der Bauaufsicht anhand einer gemeinsam festgestellten Datenbasis diskutiert werden konnten [168].

Die Abb. 8.19 zeigt eine der Weichgelsohlen des Projektes im Grundriss, die Ansicht am rechten oberen Bildrand gibt die zweite Visualisierungsebene wider und stellt einen Injektionspunkt mit der Deckelinjektion und den zwei Horizonten der Weichgelsohle dar. Im Grundriss sind die unterschiedlichen Bauzustände sichtbar. Die geplanten Punkte werden am Beginn des Projektes mittels der Planfreigabe in die Visualisierung eingespielt und als „planned“ in grau dargestellt. In diesem Projekt gab es für die Status die Möglichkeiten

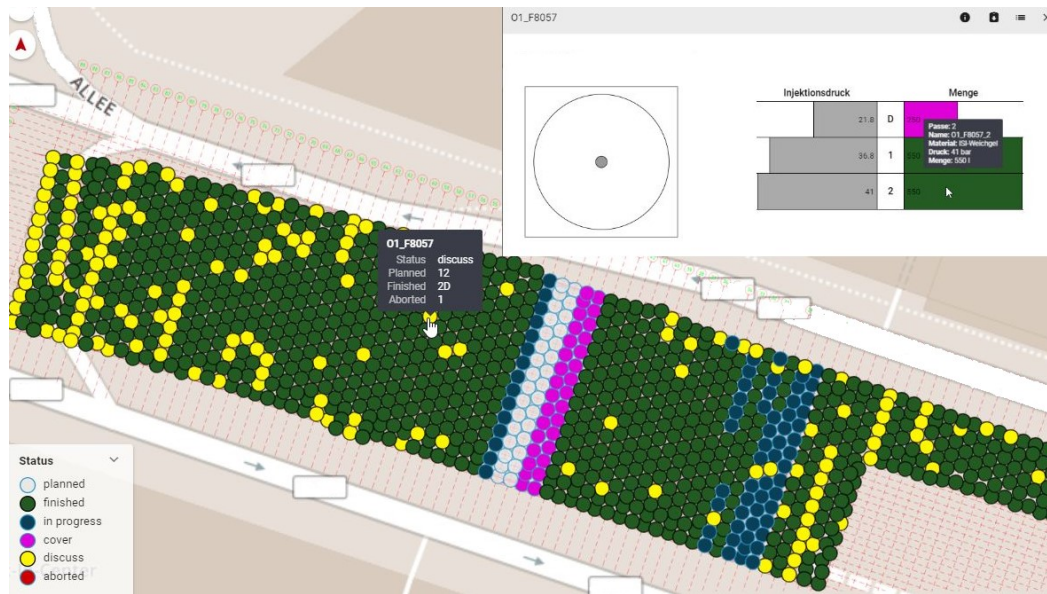


Abb. 8.19: Visualisierung als gemeinsame Kommunikationsgrundlage

„Abbruch“, „Injektionskriterium erreicht“ und „Diskussion“. Nach der Fertigstellung eines Injektionspunktes wurden die Daten automatisiert in den Datentable übertragen. Die Bauleitung überprüfte im Anschluss über den implementierten Freigabeprozess die Daten. Sofern diese freigegeben wurden, übernahm die Übersicht die Daten in die interaktive Visualisierung. Als erster Arbeitsschritt stellte das Unternehmen den Deckel mit Zementsuspension her, der in der Darstellung in lila als „cover“ bezeichnet ist. Nach dem ersten Injektionspunkt der Weichgelinjektion wurde der Injektionspunkt in Blau dargestellt und mit „in progress“ bezeichnet. Sofern alle drei Injektionsschritte nach den Injektionskriterien abgearbeitet werden konnten wurde der Injektionspunkt in Grün als „finished“ dargestellt. Konnte innerhalb der drei Injektionsschritte das Injektionskriterium nicht erreicht werden und änderte sich einer der Status auf „Abbruch“ oder „Diskussion“, so färbte sich die Visualisierung in Rot für „aborted“ oder Gelb für „discuss“. Die Mausschwebetexte in der ersten Visualisierungsebene zeigen zusammenfassende Kennwerte an, in der zweiten Ebene werden Material, Passe, Menge und Druck dargestellt. Durch eine Rückkopplung mit dem Datentable ermöglicht die Applikation das Wechseln von der zweiten Visualisierungsebene auf die Injektionsverläufe. Dieser implementierte Vorgang half der Bauaufsicht und dem Bauleiter in den Baubesprechungen über weitere Schritte in der Ausführung zu entscheiden.

Bauleitung und Bauaufsicht verfügten über unterschiedliche Zugriffsrechte, die einen papierlosen Dokumentationsvorgang etablierten. Sobald die Bauleitung Injektionspunkte freigab, waren diese in der Webplattform für die Bauaufsicht in der Datentabelle und der Echtzeit-Visualisierung ersichtlich. Im Gespräch mit der Bauaufsicht im Zuge der Expertenbefragung wurde bestätigt, dass die Zuordnungsprozesse und die Qualitätssicherung durch den gemeinsamen digitalisierten Prozess erheblich verbessert werden konnte.



Dieses Beispiel zeigte, dass bereits nach kurzer Einführung die neu entwickelten Systeme auf der Baustelle angenommen werden und dadurch die direkte Kommunikation durch diese optimiert wird. Dieses Projekt wurde ohne den Druck von Protokollen abgearbeitet. Die Bauaufsicht bezeichnete die baubegleitende Visualisierung als ideale Kommunikationsform für die Überwachung.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kapitel 9

## Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die zu Beginn dieser Dissertation gestellten Forschungsfragen beantwortet und Anstöße für zukünftige Forschungen zu digitalen Datenmanagementprozessen gegeben. Die Möglichkeiten der Weiterentwicklung für bestehende Systeme werden im Abschnitt Entwicklungsbedarf erörtert.

Die Forschungsmethodik dieser Dissertation ist durch eine stufenweise Beantwortung der Forschungsfragen gekennzeichnet. Ausgehend von einer Literaturstudie im Kapitel 2 zur Digitalisierung in der Bauwirtschaft wurde eine Umfrage durchgeführt, die Haltungen der Entscheidungsträger, den erwarteten Nutzen sowie Eigenschaften von digitalen Systemen in einem globalen Kontext erhob. Potentiale für die Automatisierung von Baustellenprozessen und die damit verbundene Produktivitätssteigerung schließen diese erste Erhebung ab.

In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Technik für Injektionsprinzipien, Bohrtechnik und Injektionstechnik beschrieben, da die Inhalte dieser Forschungsarbeit auf Injektionsarbeiten fokussieren. Bei der Beschreibung der Komponenten der Injektionstechnik wird bereits auf digital zu erhebende Daten Bezug genommen. Die Qualitätssicherung und damit verbundene Abrechnungsvorgänge für Materialien sowie die zum Einsatz kommenden Abbruchkriterien für Injektionsarbeiten bilden die Grundlage für die Prozessmodelle in der weiteren Dissertation.

Digitales Datenmanagement ist durch die direkte Übergabe von Informationen und einen standardisierten Dokumentationsprozess geprägt. Der Erstellung eines digitalen Prozessmodells geht eine Erhebung der Datenmonitoringsysteme in der Injektionstechnik in Kapitel 4 voraus. Die geschichtliche Entwicklung sowie die Produktanalyse bestehender Systeme zeigt Verbesserungsmöglichkeiten auf, die durch den Vergleich mit Datenmanagementsystemen anderer Bauverfahren untermauert werden.

Die ausgearbeitete Methodik umfasst im Kapitel 5, aufbauend auf den erforschten Grundlagen, den Status quo von Dokumentations- und Ausführungsprozessen. Mit Hilfe von Prozessdiagrammen im BPMN 2.0 und adaptierten Aufgabentypen für den Baubetrieb werden

Prozesse beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Dokumentationsprozesse deckt Anforderungen für die Entwicklung der digitalen Systeme auf, die Prozessdiagramme der Ausführungsprozesse dienen einerseits als standardisierte Arbeitsanweisung für gewerbliches Personal, und andererseits zur Detailanalyse von Produktivitätszeiten im später entwickelten digitalen Bauprozessmanagement.

Kapitel 6 gliedert sich in vier Teile. In den Grundlagen zu den Anforderungsprofilen werden Anforderungstypen und -quellen sowie die Ermittlung dieser vorgestellt. Für die Entwicklung des digitalen Prozessmodells in der Injektionstechnik wurden als standardisierte Anforderungsquellen Regelwerke herangezogen. Die projektspezifischen Anforderungen ergaben sich durch die Analyse von 22 durchgeführten Fachexperteninterviews und die dreijährige Forschungsbegleitung von Injektionsbaustellen im In- und Ausland. Die Gesamtanforderungen in Form von Tabellen zeigen funktionale und nicht-funktionale Anforderungen, die von neuen Datenmanagementsystemen in der Injektionstechnik berücksichtigt werden müssen.

Das daraus entstehende digitale Prozessmodell baut auf den fünf Stufen der digitalen Baudokumentation, einem digitalen Qualitätsmanagement für Materialien sowie baubegleitenden Visualisierungen auf. Neben den Herstellungsdaten spielt die Entwicklung des Bauprozessmanagements, im Zusammenhang mit projektspezifischen Ausführungsprozessen, eine entscheidende Rolle. Die durch das Forschungsprojekt „Automatisches Qualitätsmanagement für die Bau- und Umwelttechnik“ entstandene Webplattform eguana SCALES beinhaltet den Workflow der vorgestellten digitalen Baudokumentation und dynamische Visualisierungen. Das digitale Qualitätsmanagement wurde hingegen theoretisch erforscht, aber noch nicht zur Umsetzung gebracht.

Feldstudien, die in Kapitel 8 beschrieben sind, zeigen die signifikanten Änderungen der Baustellenprozesse anhand zweier Projekte auf. Bei einer Vielzahl von systematischen Abdichtungsinjektionen im Tunnelvortrieb im Vergleichszeitraum von 23 Monaten konnte die Zeitersparnis im Zuge einer Vergleichsrechnung quantifiziert werden. Die Zeitanteile täglicher Datenbeschaffung, Auswertungen und Abgaberoutinen, sowie der monatlichen Aufmaßerstellung konnten deutlich reduziert werden. Bei der Herstellung einer Weichgelsohle, dokumentiert mit eguana SCALES, konnte mit Hilfe der baustellenbegleitenden Visualisierungen auf eine papierlose Dokumentation und Kommunikation umgestellt werden.

Die vorgestellte Forschungsmethodik ist nicht nur auf die Injektionstechnik beschränkt und sollte bei der Entwicklung von Baudatenmanagementsystemen anderer Gewerke herangezogen werden.

## 9.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Die Ergebnisse lassen sich durch die Antworten der zu Beginn gestellten Forschungsfragen zusammenfassen.

### **Welche Anforderungen werden an digitale Datenmanagementsysteme in der Injektionstechnik gestellt?**

In der durchgeführten Umfrage zu digitalen Datenmanagementsystemen ist eine positive Tendenz zu neuen Systemen nachweisbar. In der Umfrage ergab sich, dass die Entscheidungsträger digitalem Datenmanagement mit einer Zustimmung von 87 % gegenüberstehen. Diese positive Haltung steht jedoch im Widerspruch zum fehlenden Vertrauen, das die Befragten digitalen Outputs im Vergleich zu analogen Dokumentationen wie Handprotokollen entgegen bringen. Demnach schenken nur 9 % der Umfrageteilnehmer digitalen Outputs mehr Vertrauen als händischen Dokumentationen. Der erwartete Nutzen dieser Systeme auf der Baustelle ist bei Bauunternehmen vorrangig der Zeitgewinn, Bauherren erwarten sich vor allem eine Ressourcenersparnis. Als wichtigste übergeordnete Attribute wurden mit einer Übereinstimmung von 81 % die Qualität und Verständlichkeit der Systemdokumentation, und mit 92 % die Schnittstellen mit anderen Systemen bewertet. Diese Aussagen decken sich mit den Erwartungen der Experten während der Interviews.

Die Anforderungen an das digitale Datenmanagement teilen sich in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen. Bei den funktionalen Anforderungen wurde innerhalb dieser Dissertation in Eingabe, Funktionalitäten und Ausgabe geclustert. Die Funktionalitäten des Datenmanagementsystems, die über Monitoringpflichten während der Ausführung weit hinausgehen, reichen von der Arbeitsplanung über den Datenübertrag und die Datenkontrolle bis zur Etablierung eines baustellenübergreifenden Prozesses in der Dokumentation und Analyse. Dabei hat sich ergeben, dass projektbezogene Ausführungsprozesse mit standardisierten Dokumentationsprozessen in einem digitalen System in Einklang gebracht werden können. Die Notwendigkeit des digitalen Qualitätsmanagements für Materialien wird durch die Anforderung der Norm ersichtlich und kann durch die Verknüpfung der Konformitätsprüfung auf der Baustelle und digitale Prüfanweisungen erreicht werden. Automatische Auswertungen reichen von punktuellen Abfragen der Herstellungsdaten bis hin zu Produktivitäts- und übergeordneten Projektvergleichen. Dynamische Visualisierungen sollen zukünftig den gesamten Datenmanagementprozess bis hin zum Aufmaß und zur Abrechnung der Bauleistungen unterstützen. Die Anforderungen der Ausgabe gehen mit den verfügbaren Schnittstellen der übergeordneten Systeme im ERP und BIM einher. Die Generierung von herkömmlichen Berichten muss von den Datenmanagementsystemen solange ermöglicht werden, bis die Standardisierung der digitalen Dokumentationsprozesse erfolgt ist. Die benutzerabhängige Zertifizierung der Berichte durch die Systeme ist zu gewährleisten.

Die Rahmenbedingungen, innerhalb derer die Datenmanagementsysteme erstellt werden, sind durch die nicht-funktionalen Anforderungen beschrieben. Sie teilen sich in Qualitätsattribute, Bedingungen aus dem Gesamtkontext, Vorgaben für die Durchführung sowie Anforderungen an Prüfung, Einführung, Betreuung und Betrieb des Systems. Die Qualitätsattribute umfassen die sichere Datenspeicherung und den unabhängigen Zugang zu den Daten. Als wichtige Anforderung ist die Dokumentation der eingesetzten Algorithmen für externe Prüfungen hervorzuheben. Interessensvertretungen fordern, dass alternative Vergütemodelle aufbauend auf Kennzahlen nach der Etablierung der Baudatenmanagementsysteme erforscht und vertraglich festgelegt werden können.

### **Wie ist ein digitales Datenmanagementsystem für Injektionsarbeiten zu modellieren und zu entwickeln?**

Digitale Datenmanagementsysteme nehmen bei Organisations- und Dokumentationsprozessen auf der Baustelle eine zunehmend entscheidende Rolle ein. Sie schließen die Datenkette zwischen den Ausführungsprozessen und Building-Information-Modeling sowie Enterprise-Resource-Planning Systemen. Die digitale Prozesskette in der Ausführungsphase von Bauprojekten teilt sich in vier Ebenen und wurden in Anlehnung an die Automatisierungspyramide der industriellen Fertigung vom Autor entwickelt. Systeme in der Injektionstechnik, die das idealisierte Prozessmodell berücksichtigen, gliedern sich in diese Kette ein. Sie sind gekennzeichnet durch die automatische digitale Erfassung von Herstellungs- und Materialdaten und deren Verarbeitung in einem standardisierten Workflow bis hin zur Aufmaßerstellung und den Export in übergeordnete Systeme.

Für die Teilautomatisierung des Dokumentationsprozesses muss in einem ersten Schritt dafür gesorgt werden, dass die Baustellendaten in digitaler, verarbeitbarer Form aufgenommen und gespeichert werden. Benutzerschnittstellen mittels Eingabemasken sollten möglichst vermieden werden. In einem zweiten Schritt müssen die Daten kontrolliert und von befugtem Personal nachweislich freigegeben werden. Mit den Daten der Baugeräte kann für jeden Arbeitsprozess ein digitaler Prozessvorschlag erstellt und mittels Benutzereingaben verfeinert werden. Dabei ist die Funktion der Aggregation von Einzelmaschinen auf Anlagenebene zu berücksichtigen. Die Vorgangsweise, basierend auf der Vergabe von Prioritäten und Zusammenfassungen von Einzeltätigkeiten in Betriebszeiten, bietet einen neuen Ansatz, der vielfältige Analyse der Herstellungsdaten und neue Abrechnungsmodalitäten zulässt. Die Analyse der Daten erfolgt nach technischen und wirtschaftlichen Aspekten, wichtig ist die Definition von KPIs zur Bewertung der Arbeitsprozesse. Die in dieser Dissertation vorgestellten KPIs teilen sich in die Gruppen Leistung, Material, Plan sowie Prozess- und Arbeitszeit ein. Der Algorithmus zur richtigen Kalkulation und Berechnung der gleichzeitig laufenden Maschinen ist in der Analyse berücksichtigt und wird als Ergebnis dieser Arbeit vorgestellt.

**Welche Vorteile im Vergleich zum tradierten Prozess lassen sich durch den Einsatz digitaler Datenmanagementsysteme in der Injektionstechnik ableiten?**

Diese Forschungsfrage wurde anhand der Analyse von Feldtests mit der Webplattform eguana SCALES beantwortet. Der beschriebene Entwicklungsstand von eguana SCALES zeichnet sich durch eine vollständige Dokumentation der Herstellungsdaten und der damit verbundenen Bauprozesse aus. Die digitale Datenkette, beginnend bei der Datenbeschaffung in unterschiedlichen Datenebenen bis hin zum Abrechnungsprozess, ist durch die Implementierung der fünf Stufen der digitalen Baudokumentation geschlossen. Ein entscheidender Mehrwert ist, dass die bautechnischen und abrechnungsrelevanten Daten für alle Interessensvertretungen einheitlich erfasst, endgültig gespeichert und transparent angezeigt werden können. Manuelle Datenüberträge und diverse Berechnungsfehler werden im Vergleich zu herkömmlichen Systemen vermieden. Dabei konnte zum ersten Mal die automatische Aufmaßfeststellung für Injektionsarbeiten erfolgreich realisiert werden. Durch die Speicherung in einer für alle Bauprojekte gleichen Datenbankstruktur ist das System in der Lage, zukünftige Schnittstellen zu ERP- und BIM-Systemen automatisch mit den geforderten Ausführungsdaten der Herstellung und des Materials zu versorgen. Die Innovation ist, dass dieses System nicht auf einen speziellen Steuerungs- oder Baugerätehersteller beschränkt ist, und es durch den standardisierten Aufbau nun möglich ist, die Prozesse mehrerer Gewerke darstellen und vergleichen zu können. Beispielsweise können bei einem Tiefbauprojekt unterschiedliche Bauverfahren in Echtzeit überprüft und die entstehenden Daten miteinander verglichen werden.

Die Feldstudien befassten sich mit zwei unterschiedlichen Projekten im Tiefbau, bei denen die Injektionsarbeiten mittels des Baudatenmanagementsystems eguana SCALES dokumentiert wurden. Die Feldstudie zu Abdichtungsinjektionen beim konventionellen Tunnelvortrieb wurde über zwei Jahre durch den Autor begleitet. Dabei wurden unterschiedliche Funktionen, die im Abschnitt 7.3 beschrieben sind, mitentwickelt und Problemstellungen des Unternehmens sowie des Entwicklungsteams gelöst. Projektspezifische Visualisierungen und das automatisierte Aufmaß des digitalen Datenmanagements konnten anhand der Vielzahl an Daten und der langen Laufzeit geprüft und optimiert werden. Insbesondere stellen die Funktion des automatischen Prozessvorschlags auf Grundlage von standardisierten Sequenzierungen und die automatische Aufmaßerstellung ohne manuelle Zwischenschritte eine Neuheit im Bauprozessmanagement von Injektionsarbeiten dar.

Die resultierende Zeitersparnis des nicht-gewerblichen Personals in dieser Feldstudie, die in einem Vergleichszeitraum von 23 Monaten betreut wurde, ergibt rund 122 h/Mo, das entspricht 5800 €/Mo. Dabei wurde die tägliche Zeitersparnis der Datenbeschaffung, Auswertung und Abgabe, sowie die monatlichen Dokumentationen zum Abrechnungsprozess miteinbezogen. Die täglichen Dokumentationsprozesse konnten beim Pilotprojekt um 68 %, der Prozess monatlicher Aufmaßerstellung um 83 % reduziert werden. In dieser Diskussion ist die Zeitersparnis jedoch nur ein Vorteil, der direkt auf der Baustelle quantifizierbar ist. Prozesse, die beispielsweise nach Abschluss der Baustellentätigkeiten erfolgen und auf Ar-

chivdaten zurückgreifen müssen, sind nicht quantifizierbar, weil diese unregelmäßig auftreten. Das Potential der standardisierten Prozesserfassung und der zentralen Speicherung von Herstellungsdaten liegt in der Kalkulierbarkeit von Risiken bei neuen Projekten durch die Rückführung der aufgenommenen Kennwerte.

Im Bauprojekt zur Abdichtung einer Baugrubensohle mittels Weichgel konnte die Visualisierung interaktiv im Lageplan dargestellt werden. Dieses Projekt zeigt erstmalig die papierlose Kommunikation eines Bauunternehmens mit der Bauaufsicht auf Grundlage eines digitalen Datenmanagementsystems.

Aufbauend auf den Datensatz der über 120 000 Injektionsdatensätze wurde durch den Autor ein Echtzeit-Bauzeitprognosemodell mit Hilfe des Monte-Carlo-Probeentnahmeverfahrens entwickelt, das in einem weiteren Schritt in digitale Datenmanagementsysteme implementiert werden kann. Das Prognoseverfahren eignet sich dabei auch für andere Bauverfahren und zeigt einen weiteren Anwendungsfall für automatische Analysen.

## 9.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

In Zukunft wird die Baubetriebsforschung durch den Einsatz neuer Technologie geprägt sein. Dafür werden Ablauforganisationen etabliert und Vertragsanpassungen vorzunehmen sein. Im speziellen Fall der Injektionstechnik müssten daher die Möglichkeiten der alternativen Vergütung aufbauend auf dem vorgestellten Konzept der KPIs vollumfänglich untersucht werden. In den Feldtests wurde bereits der automatisierte Soll-Ist-Vergleich von Umsetzzeiten untersucht. Vorstellbar wäre, dass zu Ausführungsbeginn eine Personal- und Geräteeinsatzplanung sowie Leistungskennzahlen partnerschaftlich festgelegt werden und darauf aufbauend ein Bonus-Malus-System in der Ausführung aufgebaut wird.

Insbesondere könnte der entwickelte sequenzierte Prozessvorschlag auf andere Bauprozesse übertragen werden. Prädestiniert wäre der konventionelle Tunnelvortrieb. Die Dokumentationen in sogenannten Zyklusdiagrammen werden gegenständlich mit Handprotokollen aufgenommen und danach in digitale Systeme übertragen. Aus der logischen Folge der Bauprozesse in Verbindung mit den Gerätedaten der Tunnelbaumaschinen wäre es möglich, einen digitalen Prozessvorschlag zu generieren, der einem Zyklusdiagramm ähnelt. Für die Umsetzung wären jedoch die Freigabe der Schnittstellen unterschiedlicher Gerätehersteller sowie umfassende Feldtests notwendig.

Wie bereits in der Visualisierung umgesetzt, ist die Entwicklung einer Rückkoppelung der geplanten Arbeitsvorgänge in Form von Arbeitsanweisungen mit der Steuerung zu forcieren. Dabei sollte es möglich sein, auf Grundlage eines standardisierten Datenaustauschformates für Baugerätedaten die geplanten Injektions- und Bohrtätigkeiten direkt über die Webplattform



des Datenmanagements anzuweisen und in die Gerätesteuerung zu übertragen. Dadurch wäre der Datenkreislauf zwischen Arbeitsplanung und Dokumentation endgültig geschlossen. Die Schnittstelle zu den Planungsmodellen in BIM muss von den Baudatenmanagementsysteme berücksichtigt werden, damit Nomenklaturen, Abmessungen und Güteparameter aus den Modellen entnommen werden können und nach Abschluss der Tätigkeiten, erweitert um Parameter der Ausführung, wieder in As-Built-Modelle überführt werden können.

Das begleitende digitale Qualitätsmanagement ergibt sich aus den hohen Anforderung der Prüfung von Injektionsmitteln und stellt neben den Herstellungsdaten und Visualisierungen das dritte Standbein des digitalen Prozessmanagements dar. Für die vollständige Umsetzung ist die Etablierung einer herstellerübergreifenden Materialdatenbank und direkter Verbindungsmöglichkeiten zu Baustellenprüfgeräten in der Injektionstechnik notwendig. Darauf aufbauend könnten nach Vorgabe von dynamisch errechneten Prüfzyklen die Prüfungen mittels implementierten Prüfanweisungen für Konformitätsprüfungen erklärend begleitet und abgearbeitet werden.

Für die vollumfängliche Integration des vorgestellten Bauzeitmodells sowie der Kennwerte ist eine Verknüpfung mit den digitalen Bautagesberichten anzustreben, da Angaben zum Personalstand derzeit nicht in den digitalen Datenmanagementsystemen enthalten sind, jedoch die Leistungsparameter wesentlich beeinflussen.

Diese Dissertation bildet in Form der entwickelten Methodik und der Forschungsergebnisse ein Novum in der Diskussion digitaler Prozesse für die Ausführungsphase. Zukünftige Entwicklungen anderer digitaler Echtzeit-Datenmanagementsysteme sollten auf diesen Erkenntnissen aufbauen. Es ist davon auszugehen, dass die fortschreitende Digitalisierung auf Baustellen und die Bildung neuer Schnittstellen zu anderen Systemen diesen Prozess zusätzlich beschleunigen wird.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Literatur

- [1] A. Adriaanse, H. Voordijk und G. Dewulf. „The use of interorganisational ICT in United States construction projects“. In: *Automation in Construction* 19.1 (2010), S. 73–83. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.09.004.
- [2] A. A. Akanmu. „Towards cyber-physical systems integration in construction“. Diss. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, The Graduate School, College of Engineering, 2012.
- [3] D. Bachinger. „Digitale Prozessunterstützung im Asphaltstraßenbau“. Diplomarb. Wien: Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Interdisziplinäre Bauprozessmanagement | E234-1, 2018.
- [4] K. Backhaus, B. Erichson, W. Plinke und R. Weiber. *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung (German Edition)*. Springer, 2010. ISBN: 9783642164903.
- [5] Baumann. *Betriebsanleitung Steuerung HWS*. Häny AG – Mixing und Injection Technology, 2018.
- [6] S. Bergsmann. *End-to-End-Geschäftsprozessmanagement: Organisationselement – Integrationsinstrument – Managementansatz*. Springer, 2011. ISBN: 978-3-7091-0839-0.
- [7] W. Biedermann, K. Kirner, M. Kissel, S. Langer, C. Münzberg und M. Wickel. *Forschungsmethodik in den Ingenieurwissenschaften*. Skriptum. Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technische Universität München, 2013.
- [8] M. Biscopio und R. Kampen, Hrsg. *Zusammensetzung von Normalbeton – Mischungsberechnung*. InformationsZentrum Beton GmbH, 2017.
- [9] T. Bock, T. Linner und W. Ikeda. „Exoskeleton and Humanoid Robotic Technology in Construction and Built Environment“. In: *The Future of Humanoid Robots. Research and Applications*. Hrsg. von R. Zaier. InTech, 20. Jan. 2012. ISBN: 978-953-307-951-6. DOI: 10.5772/1407.
- [10] C. Boley und D. Adam. *Handbuch Geotechnik: Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen (German Edition)*. 1. Auflage. Praxis. Wiesbaden, [Germany] : Vieweg+Teubner Verlag, 2012. ISBN: 9783834803726.
- [11] M. Braumann, G. Goger und L. Winkler. „Daten-Monitoring im Rohrvortrieb“. In: *Schwerpunkt Tunnelbau* 4 (2018), S. 150–154. ISSN: 2077-4737.

- [12] M. Braumann. „Daten-Monitoring im Rohrvortrieb“. Diplomarb. Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Interdisziplinäre Bauprozessmanagement | E234-1, 2018.
- [13] D. Bruce und G. Gallavresi. „The MPSP System. A new method of grouting difficult rock formations“. In: *ASCE Conference 1* (1988), S. 19.
- [14] D. A. Bruce. „Computer monitoring in the grouting industry“. In: *Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from GeoCongress 2012*. 2012, S. 549–564.
- [15] A. Brucker, H. Bernard, F. Grunert, F. Dornauf und F. Hofmann. *Durchflussmess-technik*. DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 2008, S. 168. ISBN: 9783835630741.
- [16] BRZ Deutschland GmbH. *IT-Trends in der Baubranche 2016*. 2016.
- [17] P. Bühler, P. Schlaich und D. Sinner. *Datenmanagement*. Springer Berlin Heidelberg, 1. März 2019. ISBN: 978-3-662-55507-1.
- [18] Bundesinnung Bau, Fachverband der Bauindustrie, österreichischer Gewerkschaftsbund, Hrsg. *Kollektivvertrag für Angestellte der Baugewerbe und der Bauindustrie gültig ab 1.5.2018*. 1. Mai 2018. URL: <https://www.kollektivvertrag.at/kv/>.
- [19] T. G. Carter, M. G. Jefferies, V. Rombough, L. Hassler und R. Granata. „A Retrospective Evaluation of the Progress of Computer Monitored Grouting“. In: *Grouting 2017*. 2017, S. 389–403.
- [20] K. Charmaz. *Constructing Grounded Theory: A Practical Guide through Qualitative Analysis (Introducing Qualitative Methods series)*. SAGE Publications Ltd, 2006. ISBN: 9780761973522.
- [21] P. Choquet und R. M. Taylor. „Combining Automatic Monitoring of Grouting Performance Parameters and Geotechnical Instrumentation for Risk Reduction in Complex Grouting Projects“. In: *Grouting 2017*. 2017, S. 323–335.
- [22] Y.-C. Chou, H. H.-C. Chuang und B. B. Shao. „The impacts of information technology on total factor productivity: A look at externalities and innovations“. In: *International Journal of Production Economics* 158.Supplement C (2014), S. 290–299. ISSN: 0925-5273. DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.08.003.
- [23] M. Chriti. „Aufnahme des zeitlichen Arbeitsaufwandes und Ermittlung von Stundenaufwandswerten des technischen Führungspersonals bei Bauvorhaben im Bereich Tiefbau/Infrastrukturbau“. Diplomarb. Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Interdisziplinäre Bauprozessmanagement | E234-3, 2015.
- [24] Conject. *BIM-Umfrage 2015. Auswertung*. Forschungsber. 2015. URL: <https://www.conject.com/de/de/whitepaper-ergebnisse-der-conject-bim-umfrage>.

- [25] DESOI GmbH, Hrsg. *Flow Control II. Aufzeichnung und Dokumentation von Injektions- und Dosierprozessen*. URL: [https://www.desoi.de/fileadmin/user\\_upload/desoi.de/de/PDF/Prospekte/Deutsch\\_Englisch/DESOI\\_Flow\\_Control\\_II.pdf](https://www.desoi.de/fileadmin/user_upload/desoi.de/de/PDF/Prospekte/Deutsch_Englisch/DESOI_Flow_Control_II.pdf) (besucht am 31. 10. 2018).
- [26] *DIN EN 62264-1: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen – Teil 1: Modelle und Terminologie*. Europäische Norm. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Nov. 2013.
- [27] *DIN EN ISO 14001: Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung*. Europäische Norm. DIN-Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ), Nov. 2015.
- [28] *DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*. Europäische Norm. DIN-Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ), Nov. 2015.
- [29] *DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen*. Europäische Norm. DIN-Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ), Nov. 2015.
- [30] *DIN EN ISO 9241-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. Europäische Norm. Europäisches Komitee für Normung (cen), 2006.
- [31] *DIN EN ISO 9241-210: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. Europäische Norm. Europäisches Komitee für Normung (cen), Okt. 2010.
- [32] T. L. Dreese, D. B. Wilson, D. M. Heenan und J. Cockburn. „State of the art in computer monitoring and analysis of grouting“. In: *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*. 2003, S. 1440–1453.
- [33] ECO Grouting Specialists Inc., Hrsg. *Real Time Monitoring. Key Features of CAGES 12.0*. URL: <http://www.ecogrout.com/real-time-monitoring/> (besucht am 26. 11. 2018).
- [34] Endress+Hauser GmbH. *Druckmesstechnik. Leistungsfähige Messgeräte für Prozessdruck, Differenzdruck, Füllstand und Durchfluss*. Techn. Ber. Endress+Hauser Management AG, 2018. URL: [www.endress.com](http://www.endress.com) (besucht am 13. 03. 2019).
- [35] Endress+Hauser GmbH. *Durchfluss-Messtechnik für Flüssigkeiten, Gase und Dampf*. Techn. Ber. Endress+Hauser Management AG, 2018. URL: [www.endress.com](http://www.endress.com) (besucht am 12. 03. 2019).
- [36] European Commission. *EU R&D Scoreboard. The 2014 EU Industrial R&D Investment Scoreboard*. 2014. DOI: 10.2791/13983. URL: <http://iri.jrc.ec.europa.eu/scoreboard14.html>.
- [37] European Construction Industry Federation (FIEC). *Annual Report 2016*. 2016. URL: <http://www.fiec.eu/en/cust/documentrequest.aspx?DocID=46093>.

- [38] G. Fan, D. Zhong, B. Ren, B. Cui, X. Li und P. Yue. „Real-time grouting monitoring and visualization analysis system for dam foundation curtain grouting“. In: *Transactions of Tianjin University* 22.6 (2016), S. 493–501.
- [39] P. Fischer und P. Hofer. *Lexikon der Informatik*. Springer Heidelberg Dordrecht London NewYork, 2011. ISBN: 978-3-642-15125-5. DOI: 10.1007/978-3-642-15126-2.
- [40] M. Fitzgerald, N. Kruschwitz, D. Bonnet und M. Welch. „Embracing Digital Technology. A New Strategic Imperative“. English. In: *MIT Sloan Management Review* 55.2 (2014).
- [41] U. Flick, E. von Kardorff, H. Keupp, L. von Rosenstiel und S. Wolff. *Handbuch Qualitative Sozialforschung*. 2. Aufl. Weinheim: Beltz, Psychologie-Verl.-Union, 1995. ISBN: 9783621272292.
- [42] B. Flyvbjerg, M. K. S. holm und S. L. Buhl. „How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects?“ In: *Transport Reviews* 23.1 (Jan. 2003), S. 71–88. DOI: 10.1080/01441640309904.
- [43] J. Freund und B. Rücker. *Praxishandbuch BPMN*. Hanser Fachbuchverlag, 7. Nov. 2016. 301 S. ISBN: 978-3-446-45054-7.
- [44] J. Friedl. *Mastering Regular Expressions*. O’Reilly UK Ltd., 11. Sep. 2006. 542 S. ISBN: 9780596528126.
- [45] R. Fulford und C. Standing. „Construction industry productivity and the potential for collaborative practice“. In: *International Journal of Project Management Band 32 – Heft 2* (2014), S. 315–326.
- [46] P. Gabriel und J. Hechenbichler. „Hat BIM bereits die Injektionstechnik erreicht? Beiträge zum 34. Christian Veder Kolloquium“. In: *Aktuelle Entwicklungen in Bohrtechnik und Injektionsverfahren – Anwendung in der Geotechnik*. R. Marte, H.F. Schweiger, F. Tschuchnigg, 2019, S. 213–227. ISBN: 978-3-900484-81-1.
- [47] P. Gabriel. „Abbruchkriterien bei Felsinjektionen. Eine vergleichende Analyse“. Diplomarb. Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Geotechnik | E220, 2016.
- [48] *GAEB-VB 23.004: Allgemeine Mengenerrechnungen*. Verfahrensbeschreibung. Version 1. Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen – GAEB, 1999. DOI: 10.2366/19771565.
- [49] Gamperl & Hatlapa GmbH, Hrsg. *Gamperl & Hatlapa Unternehmenshomepage*. URL: <https://www.guh-messtec.de/> (besucht am 30.10.2018).
- [50] Geo Misure Srl. *IPER-PVP-SYSTEM-TS*. URL: <https://geomisure.com/wp/en/iniezioni/iper-pvp-vision-ts-15/> (besucht am 03.11.2018).
- [51] P. Gerbert, S. Castagnino, C. Rothballer, A. Renz und R. Filitz. *Digital in Engineering and Construction. The Transformative Power of Building Information Modeling*. Forschungsber. Boston Consulting Group, März 2016. (Besucht am 29.12.2017).

- [52] GeTec Ingenieurgesellschaft für Informations- und Planungstechnologie mbH, Hrsg. *gtc-GroutControl® Steuerung und Datenmanagement für komplexe Injektionsarbeiten*. URL: [https://www.getec-ac.de/de/gtcGroutControl\\_\\_31/](https://www.getec-ac.de/de/gtcGroutControl__31/) (besucht am 22.10.2018).
- [53] R. Gill, J. Barbour und M. Dean. „Shadowing in/as work: ten recommendations for shadowing fieldwork practice“. In: *Qualitative Research in Organizations and Management: An International Journal* 9.1 (2014), S. 69–89.
- [54] G. Girmscheid und T. A. Busch. *Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft*. Bauwerk Verlag GmbH, 2008. ISBN: 9783899321845.
- [55] G. Goger, M. Piskernik und H. Urban. *Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen. Empfehlungen für zukünftige Forschung und Innovationen*. Forschungsber. 1. Dez. 2017.
- [56] D. I. Golenko. *Statistische Methoden der Netzplantechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, 1. Aug. 1972. 292 S. ISBN: 3519020130. URL: [https://www.ebook.de/de/product/22642295/d\\_i\\_golenko\\_statistische\\_methoden\\_der\\_netzplantechnik.html](https://www.ebook.de/de/product/22642295/d_i_golenko_statistische_methoden_der_netzplantechnik.html).
- [57] M. Grande. *100 Minuten für Anforderungsmanagement*. 2., aktualisierte Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 6. Aug. 2014. ISBN: 9783658064358.
- [58] F. B. Gularte, D. A. Ringen und L. S. Shao. „Advances in monitoring and control systems for high mobility grouting“. In: *Grouting and Deep Mixing 2012*. 2012, S. 1238–1247.
- [59] M. Hansetz. *Injektionsdaten-Management mit NINJA 2. Softwarehandbuch*. STS Scheltzke GmbH & Co. KG, 2016.
- [60] Häny Grouting Systems. *Gesamtübersicht Misch- und Injektionstechnik. Technologie und Produktübersicht*. 2018, S. 23.
- [61] B. R. Haslehner. „Digitales Qualitätsmanagement für die Durchführung von Güteprüfungen bei Injektionsmitteln“. Diplomarb. Wien: Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement | E234, 2017.
- [62] J. Hechenbichler, H. Eichiner und F. Landstorfer. „Speicher Durlassboden – Anwendung eines Manschettenrohrsystems mit außenliegenden Vliespackern bei der Ertüchtigung von Dichtungsschleiern. Sicher abdichten und ertüchtigen“. In: *Forschung + Praxis*. Bd. 52: *Forum Injektionstechnik 2018*. Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), 2018, S. 68–74. ISBN: 978-3-9819842-1-7.
- [63] S. Helmig und R. Hollmann. *Webbasierte Datenintegration. Ansätze zur Messung und Sicherung der Informationsqualität in heterogenen Datenbeständen unter Verwendung eines vollständig webbasierten Werkzeuges*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner: Wiesbaden, 2009. ISBN: 3834807230.
- [64] R. Herrmann, J. Rabe, G. Bolle und S. Marx. „Konzepte für Datenqualität und Datenablage bei Entwurf und Umsetzung von Monitoringsystemen“. In: *Bauingenieur* Band 92 (2017), S. 537–545.

- [65] S. Hesse und G. Schnell. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. Springer-Verlag GmbH, 1. Okt. 2018. ISBN: 978-3-658-21172-1.
- [66] C. Hofstadler und M. Kummer. *Chancen- und Risikomanagement in der Bauwirtschaft. Für Auftraggeber und Auftragnehmer in Projektmanagement, Baubetrieb und Bauwirtschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 27. Feb. 2017, S. 75–107. ISBN: 978-3-662-54319-1. DOI: 10.1007/978-3-662-54319-1\_3. URL: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54319-1\\_3](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54319-1_3).
- [67] K. Hofte-Frankhauser und H. F. Wälty. *Marktforschung; Grundlagen mit zahlreichen Beispielen, Repetitionsfragen mit Antworten und Glossar*. 3. Aufl. Compendio Bildungsmedien AG Zürich, 2011. ISBN: 9783715594705 3715594705.
- [68] J. Honeder. „Prozessdarstellung und Aufwandswertermittlung von Ausführungs- und Dokumentationsvorgängen beim Düsenstrahlverfahren“. Diplomarb. Wien: Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Interdisziplinäre Bauprozessmanagement | E234-1, 2018.
- [69] M. R. Hosseini, N. Chileshe, J. Zuo und B. Baroudi. „Approaches of Implementing ICT Technologies within the Construction Industry“. In: *Australasian Journal of Construction Economics and Building* 1.2 (2012). DOI: 10.5130/ajceb-cs.v1i2.3161.
- [70] A. C. Houlshby. *Construction and design of cement grouting: a guide to grouting in rock foundations*. Bd. 67. John Wiley & Sons, 1990.
- [71] Hütte Bohrtechnik GmbH, Hrsg. *Hydraulisches Bohrgerät HBR 605-4*. URL: <https://huette.casagrandegroup.com/de/geraete-fuer-universelle-bohrungen/hbr-605-4/> (besucht am 03.06.2019).
- [72] M. Huymajer und A. Mazak. „Interdisziplinäre Forschungsmatrix zur Digitalisierung in der Bauwirtschaft“. In: *Prozess vermeidet Prozess*. 1. Kolloquium Zukunftsfragen des Baubetriebs. Bd. 1. TU-MV Media Verlag GmbH, 2018, S. 194–204. ISBN: 9783903024670.
- [73] M. Huymajer und L. Winkler. „Die Digitalisierung als eine Maßnahme zur Lösung der Probleme in der Bauwirtschaft“. In: *Prozess vermeidet Prozess*. 1. Kolloquium Zukunftsfragen des Baubetriebs. Bd. 1. TU-MV Media Verlag GmbH, 2018, S. 194–204. ISBN: 9783903024670.
- [74] *IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik*. Europäische Norm. DIN-Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ), Nov. 2013.
- [75] *Information technology – Object Management Group Business Process Model and Notation. Chapter 10: Process*. English. International Standard. ISO copyright office, Feb. 2013.
- [76] G. Iwan. *Beitrag zur Anwendung der Simulation und Reihenfolgeoptimierung bei der Analyse von Bauproduktionsprozessen*. Fortschritt Bericht-Berichte VDI, Reihe 4. Bd. 113. VDI Verlag, 1992. ISBN: 9783181413043.



- [77] D. Jacob, C. Müller und M. Oehmichen. *Kalkulieren im Ingenieurbau*. Springer-Verlag GmbH, 26. Feb. 2018. ISBN: 978-3-658-18108-6. URL: [https://www.ebook.de/de/product/29566421/kalkulieren\\_im\\_ingenieurbau.html](https://www.ebook.de/de/product/29566421/kalkulieren_im_ingenieurbau.html).
- [78] Jean Lutz SA. *Jean Lutz Unternehmenshomepage*. URL: <http://www.jeanlutzsa.fr/DNN/de/Home.aspx> (besucht am 27.10.2018).
- [79] S. Jiang, J. Zhang und H. Zhang. „Ontology-based Semantic Retrieval for Risk Management of Construction Project“. In: *Journal of Networks* 8 (Mai 2013). DOI: 10.4304/jnw.8.5.1212-1220.
- [80] H. Kagermann, W. Wahlster und J. Helbig, Hrsg. *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Plattform Industrie 4.0. 2013, S. 116.
- [81] A. Kainrath. „Permeation grouting in granular soils - testing methods for cement based grouts and grouted soils“. Diss. Wien: Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Institut für Geotechnik E220, 2017.
- [82] A. Kainrath, R. Pfeffer und S. Hoiser. „Umweltrelevante und physikalische Eigenschaften von chemischen Injektionsmitteln sowie geeignete Verfahren zu deren Qualitätssicherungen. Sicher abdichten und ertüchtigen“. In: *Forschung + Praxis*. Bd. 52: *Forum Injektionstechnik 2018*. Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), 2018, S. 68–74. ISBN: 978-3-9819842-1-7.
- [83] G. Karasek, T. Frad, P. Schmidinger und C. M. Berlakovits. *Kommentar zur ÖNORM B 2110*. 3. Aufl. Wien: MANZ'sche Verlags- und Universitätsbuchhandlung, 2016. ISBN: 9783214135751.
- [84] C. Kettle. „Compensation Grouting-Evolution, Field of Application, and Current State of the Art in UK Practice“. In: *Grouting and Deep Mixing 2012*. 2012, S. 134–199.
- [85] D. S. Kieffer, T. Dreese, J. Weil und J. Kleberger. „Tools for optimizing rock mass grouting“. In: *Geomechanics and Tunnelling* 12.2 (Apr. 2019), S. 121–128. DOI: 10.1002/geot.201800068.
- [86] S. Kivrak, G. Arslan und O. Cagatay. „Information Technology Usage Impacts on Construction Projects' Success“. In: *Proceedings of 10th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Vilnius: Vilnius Gediminas Techn. Univ., 2010, S. 431–435.
- [87] KLEMM Bohrtechnik GmbH, Hrsg. *MBS 5 Bohrdatenerfassungssystem*. [www.klemm.de](http://www.klemm-bohrtechnik.de/fileadmin/templates/img/content/produkte/Datenerfassung/MBS_5.pdf). URL: [https://www.klemm-bohrtechnik.de/fileadmin/templates/img/content/produkte/Datenerfassung/MBS\\_5.pdf](https://www.klemm-bohrtechnik.de/fileadmin/templates/img/content/produkte/Datenerfassung/MBS_5.pdf) (besucht am 03.11.2018).
- [88] P. Krammer. „Zukunftsfragen des Bauens aus Sicht der Bauindustrie“. In: *Prozess vermeidet Prozess*. 1. Kolloquium Zukunftsfragen des Baubetriebs. Bd. 1. TU-MV Media Verlag GmbH, 2018, S. 68–91. ISBN: 9783903024670.
- [89] C. Kutzner. *Injektionen im Baugrund*. Stuttgart: Enke, 1991. ISBN: 3432989016.

- [90] E. Lazarova. „Injektionen im Tunnelbau“. Diplomarb. Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Interdisziplinäre Bauprozessmanagement | E234-1, 2016.
- [91] *Lean Construction*. Richtlinie. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, Okt. 2017. Beuth Verlag GmbH.
- [92] *Leistungsbeschreibung IV: Verkehr und Infrastruktur*. Standartisierte Leistungsbeschreibung Version 4. Wien: Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV), 2015.
- [93] *Leistungsbeschreibung IV: Verkehr und Infrastruktur*. Standartisierte Leistungsbeschreibung Version 5. Wien: Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV), 2018.
- [94] P. Lengauer. „Datenmonitoring beim Düsenstrahlverfahren“. Diplomarb. Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Interdisziplinäre Bauprozessmanagement | E234-1, 2017.
- [95] Liebherr GmbH, Hrsg. *Prozessdatenreporting PDR2*. URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/spezialtiefbau/digitale-loesungen/pdr/pdr2-process-data-reporting.html> (besucht am 04. 11. 2018).
- [96] LIM SAS, Hrsg. *Bor Format Documentation. File Specification*. 2018, S. 20. URL: <https://bor-form.at/bor-spec.html> (besucht am 04. 11. 2018).
- [97] Lim SAS, Hrsg. *PocketLIM 5G - Grouting*. URL: <http://lim.eu/index.php/en/component/content/?view=article&id=252> (besucht am 03. 11. 2018).
- [98] G. Lombardi. „Grouting of Rock Masses - Invited Key Note Lecture.“ In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Grouting And Grout Treatment*. Minusio, 2002.
- [99] P. Maroschek. *Digitalisierung in der Bohr- und Injektionstechnik. Bohr- und Injektionsdatenaufzeichnung*. Vereinigung Österreichischer Bohr-, Brunnenbau- und Spezialtiefbau- Unternehmen (VÖBU), 27. Feb. 2019.
- [100] G. Mauerhofer und G. Pruckner. „Integrierte Managementsysteme und deren Dokumentationsanforderungen in der Bauausführung“. In: *Belastbare Dokumentation in der Bauausführung*. 14. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium. Bd. 1. Verlag der Technischen Universität Graz, 2016, S. 9–31. ISBN: 978–3–85125–442-6.
- [101] G. Maybaum. *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau*. 2., überarb. und aktualisierte Auflage. Druckausg. Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011. ISBN: 9783834882691.
- [102] McKinsey & Company. *Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity*. Executive Summary. Feb. 2017.
- [103] Mecon GmbH. *Magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte*. 2019. URL: <https://www.mecon.de/de/magnetisch-induktive-durchflussmessgeraete/> (besucht am 12. 03. 2019).

- [104] M. Molnar, R. Andersson und A. Ekholm. „Benefits of ICT in the Construction Industry. Characterization of the Present Situation in House-building Processes“. eng. In: *Proceedings of the W78 Conference, Maribor 2007*. 2007, S. 423–428. URL: <http://lup.lub.lu.se/record/935306> (besucht am 02.01.2018).
- [105] Morath GmbH, Hrsg. *Bohrtechnik für Umwelt und Energie – Verfahrenstechnik*. URL: <https://www.morath.eu/de/bohrgeraete.html#verfahrentechniken> (besucht am 27.05.2019).
- [106] Mühlhäuser - Obermann GmbH, Hrsg. *Obermann systems – PC-LOG SG Feldgerät*. URL: <http://muehlhaeuser-obermann.com/de/produkte/mess-registrier-und-regelsysteme/registrier-und-regelsysteme/pc-log-sg> (besucht am 24.10.2018).
- [107] C. Nagl. „Entwicklung eines Analysetools eVALUATOR für Injektionsarbeiten“. Diplomarb. Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Interdisziplinäre Bauprozessmanagement | E234-1, 2018.
- [108] W. Nagl, G. Titelbach und K. Valkova. *Digitalisierung der Arbeit: Substituierbarkeit von Berufen im Zuge der Automatisierung durch Industrie 4.0*. Forschungsber. Institut für Höhere Studien (IHS), Wien, 2017. 45 S.
- [109] A. Naudts, J. D. Long, E. A. Krispin und W. Naudts. „Multiple Pass Permeation Grouting to Encapsulate and Contain Radioactive Waste in a Predictable Fashion“. In: *Grouting and Deep Mixing 2012*. 2012, S. 1353–1362.
- [110] W. Oberndorfer und H. G. Jodl. *Handwörterbuch der Bauwirtschaft*. 3. Aufl. ON-V ; 208. Wien: Austrian Standards plus Publ., 2009. ISBN: 9783854022190.
- [111] ON Österreichisches Normungsinstitut. *BVerG 2018: Bundesgesetz über die Vergabe von Aufträgen*. Gesetzestext. 2018.
- [112] *ÖNORM A 2063: Austausch von Leistungsbeschreibungs-, Elementkatalogs-, Ausschreibungs-, Angebots-, Auftrags- und Abrechnungsdaten in elektronischer Form*. Nationale Norm. ON Österreichisches Normungsinstitut, Juli 2015.
- [113] *ÖNORM B 1801-1: Bauprojekt- und Objektmanagement – Teil 1: Objekterrichtung*. Nationale Norm. ON Österreichisches Normungsinstitut, Dez. 2015.
- [114] *ÖNORM B 2110: Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen – Werkvertragsnorm. Werkvertragsnorm*. Nationale Norm. ON Österreichisches Normungsinstitut, 2013.
- [115] *ÖNORM B 2279: Spezialiiefbauarbeiten Aufschluss-, Brunnen- und Grundbauarbeiten. Werkvertragsnorm*. Nationale Norm. 2006.
- [116] *ÖNORM B 4454: Erd- und Grundbau – Injektionen in Fest- und Lockergestein – Prüfungen. Werkvertragsnorm*. Nationale Norm. 2001.
- [117] *ÖNORM EN 12715: Ausführen von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialiiefbau) – Injektionen*. Europäische Norm. ON Österreichisches Normungsinstitut, Feb. 2001.

- [118] *ÖNORM EN ISO 16739:2013 Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauwirtschaft und im Anlagenmanagement*. Europäische Norm. Europäisches Komitee für Normung (cen), Mai 2017.
- [119] *ONR 12010: Standardisierte Leistungsbeschreibungen*. Technische Regel. ON Österreichisches Normungsinstitut, 2008.
- [120] M. Ouschan, S. Sabew, P. Maroschek und L. Winkler. „Digitales Dokumentations- und Datenmanagement bei Injektionsmaßnahmen. Sicher abdichten und ertüchtigen“. In: *Forschung + Praxis*. Bd. 52: *Forum Injektionstechnik 2018*. Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), 2018, S. 32–38. ISBN: 978-3-9819842-1-7.
- [121] P. E. Owen. *Engineering and Design - Grouting Technology*. 1110-2-3506. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers, 2017.
- [122] R. R. Panko. „What we know about Spreadsheet Errors“. In: *Scaling Up End User Development* (2008).
- [123] R. R. Panko und S. Aurigemma. „Revising the Panko–Halverson taxonomy of spreadsheet errors“. In: *Decision Support Systems* (2010), S. 235–244.
- [124] H. A. Partsch. *Requirements-Engineering systematisch. Modellbildung für softwaregestützte Systeme*. eXamen.press. Includes bibliographical references and index. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN: 978-3-642-05357-3.
- [125] M. Piskernik und L. Winkler. „Digitales Datenmanagement und automatisierter Abrechnungsprozess am Beispiel Injektionsarbeiten“. In: *28. BBB-Assistententreffen*. Universität Kaiserslautern 2018, 2017, S. 227–237. ISBN: 978-3-95974-055-5.
- [126] K. Pohl und C. Rupp. *Requirements Engineering Fundamentals: A Study Guide for the Certified Professional for Requirements Engineering Exam. Foundation Level - IREB compliant*. Rocky Nook, 2011. ISBN: 9781933952819.
- [127] K. R. Popper. *Logik der Forschung*. 9. Aufl. Die Einheit der Gesellschaftswissenschaften ; 4. Tübingen: Mohr, 1989. ISBN: 3163454852.
- [128] *Qualitätssicherung für Bodenvermörtelung*. Merkblatt. Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV), 2012.
- [129] *Quality control during grouting*. Soletanche Bachy. URL: [http://www.bachy-soletanche.com/SBF/sitev4\\_uk.nsf/technique/grouting](http://www.bachy-soletanche.com/SBF/sitev4_uk.nsf/technique/grouting) (besucht am 26. 11. 2018).
- [130] *REB-VB 23.003: REB-Verfahrensbeschreibung – Allgemeine Mengenberechnungen*. Verfahrensbeschreibung. BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2012.
- [131] G. Reiser. *Bohrhandbuch*. 3. Aufl. Wien: VÖBU - Vereinigung Österreichischer Bohr-, Brunnenbau- und Spezialtiefbauunternehmungen, 2012. ISBN: 9783200028906.
- [132] *Report of the Commission on Rock Grouting*. Techn. Ber. International Society of Rock Mechanics ISRM, 1994, S. 45. URL: <http://www.isrm.net/gca/?id=1020> (besucht am 08.10.2018).

- [133] S. Rohr. *Optimierung der Bauproduktion durch Simulation von Prozessen*. Shaker Verlag, 11. Jan. 2006. 212 S. ISBN: 9783832247904.
- [134] S. C. Scheid. „Die verallgemeinerte Lognormalverteilung“. Universität Dortmund, Fachbereich Statistik, 2001.
- [135] R. J. Scherer und S.-E. Schapke. *Informationssysteme im Bauwesen 1. Modelle, Methoden und Prozesse*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. ISBN: 978-3-642-40882-3.
- [136] K. Schiefer. „Digitalisierungspotentiale von tradierten Dokumentationsprozessen im Tunnelbau“. Diplomarb. Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Interdisziplinäre Bauprozessmanagement | E234-1, 2018.
- [137] M. Schmid und W. Trojer. *Spezialtiefbau Bohrdatenerfassungssystem BDE – Benutzerhandbuch*. ZÜBLIN Spezialtiefbau Ges.m.b.H., 2016.
- [138] M. Schmid und W. Trojer. *Spezialtiefbau Injektionsdatenerfassungssystem IDE – Benutzerhandbuch*. ZÜBLIN Spezialtiefbau Ges.m.b.H., 2016.
- [139] K.-S. Schober und P. Hoff. *Digitalisierung der Bauwirtschaft. Der europäische Weg zu "Construction 4.0"*. Forschungsber. Roland Berger, Juni 2016.
- [140] S. Semprich und G. Stadler. „Injektionen. Teil2: Geotechnische Verfahren“. In: U. Smolczyk. *Grundbautaschenbuch*. Ernst & Sohn, 2001. ISBN: 3433014469.
- [141] Signavio GmbH, Hrsg. *Signavio Process Manager – Nutzerhandbuch*. 13.0.0. 2019. URL: <https://docs.signavio.com/userguide/editor/de/SignavioUserManual.pdf> (besucht am 11.06.2019).
- [142] G. Simsch. „Bauprozessmanagement im Bauunternehmen“. In: *BauPortal* (2014).
- [143] G. Simsch und C. Berger. „Ergonomisierung des Prozessmanagements in einem Bauunternehmen“. In: C. Motzko. *Praxis des Bauprozessmanagements*. Ernst & Sohn, 2013.
- [144] SOILMEC Spa, Hrsg. *Technical data sheet DMS*. 2016. URL: <http://www.soilmec.com/en/products/controls/drilling-mate-system> (besucht am 03.11.2018).
- [145] G. Stadler. „Schwerpunkt normgerechter Injektionsplanung. Beiträge zum 34. Christian Veder Kolloquium“. In: *Aktuelle Entwicklungen in Bohrtechnik und Injektionsverfahren – Anwendung in der Geotechnik*. R. Marte, H.F. Schweiger, F. Tschuchnigg, 2019, S. 1–10. ISBN: 978-3-900484-81-1.
- [146] G. Stadler. „Transient Pressure Analysis of “RODUR“ Epoxy Grouting in Concrete and Rock at Kölnbrein Dam, Austria. Gert Stadler“. Diss. Dissertation Institut für Lagerstättenphysik und -technik: Montanuniversität Leoben, 1992.
- [147] G. Stadler, H. O. Eichiner, G. Furtmüller, W. Hornich, A. Kainrath, S. Leitner, R. Palla, I. Reichl, M. Scheickl und A. Vigl. *Kommentar zur EN 12715 Injektionen*. Kommentar. Salzburg: Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG), 2016.

- [148] G. Stadler und I. Reichl. „Was treibt das Injektionsgut an – und wohin?“ In: *Tagungsband zum Spezialseminar Injektionen*. 66. Geomechanik Kolloquium. 2017.
- [149] M. Stiftinger. „Der digitale Bautagesbericht“. Diplomarb. Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Interdisziplinäre Bauprozessmanagement | E234-1, 2019.
- [150] STS Scheltzke GmbH & Co. KG, Hrsg. *Regel-Mess-System RMS-2-B*. URL: <https://www.scheltzke.de/produkte/daten-aufzeichnungen-geraete/> (besucht am 27.10.2018).
- [151] K. Stuhlmacher, T. Liebich, C. Adolf und S. Goitowski. *GAEB – Europäischer Vergleich*. Forschungsber. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2012.
- [152] M. Supanz. „Weichgelinjektion zur Abdichtung von Baugrubensohlen“. Diplomarb. Technische Universität Wien | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Grundbau und Bodenmechanik | E220, 2013.
- [153] R. M. Taylor und P. Choquet. „Automatic monitoring of grouting performance parameters“. In: *Grouting and Deep Mixing 2012*. 2012, S. 1494–1505.
- [154] Trevi S.p.A, Hrsg. *Unternehmenshomepage. Cement and chemical Grouting*. URL: <http://www.trevispa.com/en/Technologies/cement-and-chemical-grouting> (besucht am 31.10.2018).
- [155] M. Unterauer. *Workshops im Requirements Engineering. Methoden, Checklisten und Best Practices für die Ermittlung von Anforderungen*. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt-Verl., 2015. ISBN: 9783864902314.
- [156] W. Veenhuis. *Das Freie REB Buch*. MWM Software & Beratung GmbH, 2019.
- [157] Visual Paradigm Community Circle, Hrsg. *Using BPMN Task and Sub-Process*. 2. Mai 2018. URL: <https://circle.visual-paradigm.com/docs/bpmn-and-process-mapping/business-process-diagram/using-bpmn-task-and-sub-process/>.
- [158] R. Y. Wang und D. M. Strong. „Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers“. In: *Journal of Management Information Systems* 12-4 (1996), S. 5–33. ISSN: 0742-1222.
- [159] H. Wannenmacher, R. Pfeffer, B. Christöphl und A. Walter. „Baulos SBT3.1: Bohr- und Injektionsarbeiten für den Schacht Sommerau 2“. In: *Tagungsband zum Spezialseminar Injektionen*. 66. Geomechanik Kolloquium. 2017.
- [160] M. Werkl. „Analyse von Vertrags- und Vergütungsmodellen im Spezialtiefbau unter besonderer Berücksichtigung der zeit- und leistungsbezogenen Vergütung (StilfOs) am Beispiel von Injektionen“. Diplomarb. Technische Universität Graz | Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, 2004.
- [161] D. B. Wilson. *IntelliGrout®. Grouting for Dams*. Gannett Fleming, 2018. URL: <http://www.gannettfleming.com/~media/Files/Brochures/GannettFleming-IntelliGrout-GroutingForDams.ashx>.

- [162] D. B. Wilson. „Practice, Perspectives, & trends in US Rock Grouting“. In: *Grouting and Deep Mixing 2012*. 2012, S. 25–73.
- [163] L. Windelband. „Zukunft der Facharbeit im Zeitalter „Industrie 4.0““. In: *Journal of Technical Education (JOTED)* (2 2014). Hrsg. von B. Zinn und R. Tenberg, S. 138–160. ISSN: 2198-0306.
- [164] L. Windelband und G. Spöttl. „Diffusion von Technologien in die Facharbeit und deren Konsequenzen für die Qualifizierung am Beispiel des Internet der Dinge“. In: *Berufs- und wirtschaftspädagogische Analysen – aktuelle Forschungen zur beruflichen Bildung*. Hrsg. von U. Faßhauer. 2012, S. 205–219.
- [165] C. Winkler und L. Winkler. „Digitale Prozessunterstützung im Kontext der Prozesslandkarte eines Bauunternehmens“. In: *Prozess vermeidet Prozess*. 1. Kolloquium Zukunftsfragen des Baubetriebs. Bd. 1. TU-MV Media Verlag GmbH, 2018, S. 142–155.
- [166] L. Winkler, P. Maroschek und P. M. „Cooperative knowledge management systems for grouting works at tunnel sites“. In: *4th Arabian Tunnelling Conference and 20 Gulf Engineering Forum 2017*. 2017, S. 1–12.
- [167] L. Winkler. *Gastvortragende beim Seminar Bauprozessabwicklung I an der TU Wien*. 16. Okt. 2018. URL: <https://eguana.at/blog/> (besucht am 31. 10. 2018).
- [168] L. Winkler, P. Maroschek und F. Weber. „Digitalization of Data Management and Quality Assurance in ground and tunneling works“. In: *Tunnels and underground cities : engineering and innovation meet archaeology, architecture and art. Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress*. Boca Raton, CRC Press, 2019, S. 10. ISBN: 978-0-429-42444-1.
- [169] K. Witt, Josef. und K. J. Witt. *Grundbau-Taschenbuch: Teil 2 Geotechnische Verfahren*. 7. Aufl. Grundbau-Taschenbuch. 2010. ISBN: 1-282-71237-3; 9786612712371; 3-433-60055-4; 3-433-60056-2.
- [170] W. Wittke, M. Wittke, C. Erichsen und D. Schmitt. „Injektionen zur Begrenzung von Wasserzutritten in anhydritführendes Gebirge. Tunnel nach Feuerbach und Bad Cannstatt des Projekts Stuttgart 21“. In: *tunnel* (2017).
- [171] W. Wittke, M. Wittke, G. Osthoff und C. Lienhart. „Stuttgart 21 – Mehr als 15 km Tunnel im Anhydrit: Besondere Maßnahmen zur Beherrschung der Quellproblematik und Erfahrungen aus der Umsetzung“. In: *Internationales Forum für Tunnel und Infrastruktur*. Stuva-Tagung 2017. 2017.
- [172] J. P. Womack und D. T. Jones. *Lean Thinking: Ballast abwerfen, Unternehmensgewinne steigern*. [Erw. u. aktualisierte Neuausg.] Management. Frankfurt/Main [u.a.]: Campus Verlag GmbH, 2004. ISBN: 3593375613.
- [173] World Economic Forum. *Shaping the Future of Construction. A Breakthrough in Mindset and Technology*. Forschungsber. Mai 2016.

- [174] D. Zhong, F. Yan, M. Li, C. Huang, K. Fan und J. Tang. „A real-time analysis and feedback system for quality control of dam foundation grouting engineering“. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48.5 (2015), S. 1947–1968.
- [175] W. Zhou, J. Whyte und R. Sacks. „Construction safety and digital design: A review“. In: *Automation in Construction* 22.Supplement C (2012). Planning Future Cities- Selected papers from the 2010 eCAADe Conference, S. 102–111. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.07.005.



# Verzeichnisse

## Abbildungsverzeichnis

3.1	Bohr- und Injektionsverfahren im Zusammenhang [117] . . . . .	36
3.2	Iterativer Planungs- und Ausführungsablauf mit fünf Entscheidungsprozessen adaptiert nach [147] . . . . .	39
3.3	Übersicht der Injektionsverfahren zusammengeführt aus [117] und [147] . . . . .	40
3.4	Bohrverfahren in der Injektionstechnik [105] . . . . .	43
3.5	Manschettenrohrinjektion mit Doppelpacker [154] . . . . .	45
3.6	Injektionen im unverrohrten Bohrloch [154] . . . . .	48
3.7	Doppelkopf-Bohranlagen [131] . . . . .	51
3.8	Universalbohrgerät [71] . . . . .	52
3.9	Injektionspumpensysteme . . . . .	53
3.10	Messprinzipien bei Durchflussmessung in der Injektionstechnik [35] . . . . .	56
3.11	Prinzipien und Ausführungsformen von Drucksensoren in der Injektionstechnik	56
3.12	Fließverhalten von Injektionsmitteln [81] . . . . .	59
3.13	Haltekriterium einer Injektionssteuerung [138] . . . . .	62
3.14	GIN-Diagramm und Abbruchpfade [47] . . . . .	64
4.1	Anwendung der Wissenstreppe nach North auf den Baubetrieb [66] . . . . .	68
4.2	Digitales Datenmanagement in drei Entwicklungsstufen . . . . .	76
4.3	Steuer- und Datenerfassungseinheit exges . . . . .	81
4.4	Übersicht der Datenverwaltung in der Steuerungseinheit [5] . . . . .	81
4.5	Datenübertragung und Bearbeitung am Beispiel LIM [97] . . . . .	84
4.6	Visualisierung einer Hebungsinjektionen im Grout Control [52] . . . . .	86
4.7	Schnittstellen der Software von Soletanche Bachy [84] . . . . .	89
4.8	Dokumentationszeit pro Tag in Abhängigkeit der Elementabmessung und der Ausführungszeit [68] . . . . .	94
5.1	Wertschöpfungsprozesse in einem Bauunternehmen . . . . .	103
5.2	Ausführungsprozess bei Felsinjektionen . . . . .	108

5.3	Ausführungsprozess mit Gruppierungen für digitales Prozessmanagement bei Felsinjektionen . . . . .	109
5.4	tradierter täglicher Dokumentationsprozess . . . . .	111
5.5	tradierter täglicher Dokumentationsprozess mit Gruppen . . . . .	112
5.6	Typische Visualisierungen der Herstellungsparameter in der Ausführungsplanung	118
5.7	Dokumentationsaufwand bei Pumpen $p = 10$ , Anlagen $a = 2$ , Fußweg $l = 400$ m	121
5.8	Anteil für den Dokumentationsaufwand, abhängig von der Anzahl der Injektionspunkte, bei Pumpen $p = 10$ , Anlagen $a = 2$ , Fußweg $l = 400$ m . . . . .	122
6.1	Anforderungen des PDCA [29] . . . . .	131
6.2	Vertragsarten bei Injektionsarbeiten [140] . . . . .	138
6.3	Dokumentationsanforderung der ÖNORM B 4454: Erd- und Grundbau – Injektionen in Fest- und Lockergestein – Prüfungen [116] . . . . .	142
6.4	Iterationsschritte in der Entwicklung [167] . . . . .	147
6.5	Menschenzentrierte Gestaltungsaktivität [31] . . . . .	148
6.6	Fachexperteninterviews nach Kategorien . . . . .	150
7.1	Digitale Datenkette in der Ausführungsphase . . . . .	179
7.2	Die fünf Stufen der digitalen Baudokumentation . . . . .	182
7.3	Optionen der digitalen Verfügbarkeit von Baustellendaten . . . . .	184
7.4	Aufführungsprozesse und Zusammenfassung in Balkendiagramm . . . . .	185
7.5	Beispiel zur Berechnung der Pumpengleichzeitigkeit <sup>90</sup> . . . . .	187
7.6	Abrechnungsmodalitäten von Pumpenzeiten im Vergleich . . . . .	188
7.7	Boxplot für Pumpenbetriebe bei einer Tunnelanierung mit einer Anlage und 8 Pumpen . . . . .	189
7.8	Digitales Qualitätsmanagement von Injektionsmitteln im Überblick . . . . .	195
7.9	Messeinheit NODE . . . . .	200
7.10	Baustellennavigation und Widgets in eguana SCALES . . . . .	202
7.11	Datenverarbeitung und Module in eguana SCALES . . . . .	205
7.12	Ansicht Modul Daten mit Detailansicht eines Injektionsverlaufs . . . . .	206
7.13	Detailansicht eines Bohrverlaufs . . . . .	206
7.14	Sequenzierung für eine Maschine pro Schicht . . . . .	208
7.15	Zusammenfassung der Maschinentätigkeiten in Anlagenebene . . . . .	210
7.16	Aktivitätentrend mit Bezugshorizont 80 % . . . . .	211
7.17	Eingabe für Mischungen von Injektionsmitteln in eguana SCALES . . . . .	213
7.18	Workflow der Module Daten, Prozessmanagement und Aufmaß im Zusammenhang	215
7.19	Eingabemasken für neue Abrechnungspositionen in eguana SCALES . . . . .	217
7.20	Aufmaß mit Prozesszeiten in eguana SCALES . . . . .	218
7.21	Plandatenvorlage in eguana SCALES . . . . .	220
7.22	KPIs Abfrage in eguana SCALES . . . . .	222
8.1	Lage des Tunnels in Visualisierungsebene 1 . . . . .	226
8.2	Abwicklung von zehn Tunnelmetern in Visualisierungsebene 2 . . . . .	227

8.3	Tunnelquerschnitt in Visualisierungsebene 3 . . . . .	228
8.4	Automatisierung des Soll-Ist-Vergleiches von Umsetzzeiten am Beispiel von Abdichtungsinjektionen . . . . .	229
8.5	Prozesse der digitalen Aufmaßerstellung und Abrechnung in BPMN 2.0 . . .	230
8.6	Anlagen a, Pumpen p und Injektionen i pro Schicht im Vergleichszeitraum . .	231
8.7	Exemplarische Berechnung bei $i = 308$ , $a = 5$ und $p = 11$ für eine Schicht . .	233
8.8	Vergleich der täglichen Dokumentationszeiten bei der Feldstudie . . . . .	234
8.9	Zeitersparnis im Dokumentations- und Analyseprozess beim Pilotprojekt . . .	235
8.10	Dreiecksdichtefunktion für die Restbeaufschlagungen . . . . .	238
8.11	Dreiecksverteilung von Restbeaufschlagungen für unterschiedliche Typen . .	238
8.12	Dichtefunktion für Injektionsdauern mit Stichproben n ( $n_{AI} = 49.136$ , $n_{BV} =$ $19.965$ ) . . . . .	240
8.13	Zuordnung von Injektionszeit zu Schichtzeit . . . . .	241
8.14	Reihenanalyse der Schichtzeit . . . . .	242
8.15	Dichtefunktion für Injektionszeit pro Schicht mit Stichproben n ( $n_{All} = 376$ , $n_{AI} = 376$ , $n_{BV} = 269$ ) . . . . .	242
8.16	Vier Vorgänge eines Iterationsschrittes . . . . .	244
8.17	Histogramm einer Bauzeitsimulation mit 50.000 Iterationsschritten . . . . .	245
8.18	Relative kumulierte Häufigkeitsverteilung einer Bauzeitsimulation mit 50.000 Iterationsschritten . . . . .	245
8.19	Visualisierung als gemeinsame Kommunikationsgrundlage . . . . .	248
B.1	Handzettel eines Ausliterversuchs . . . . .	289
B.2	Beispiel eines Mischprotokolls . . . . .	290
B.3	Handzettel einer Probenahme für ein 2-Komponenten Injektionsmittel . . . .	291
B.4	Beispiel eines Bohr-Handprotokoll mit Bohransprache . . . . .	292
B.5	Beispiel eines Injektions-Handprotokolls . . . . .	293
B.6	Maschinenbericht Bohren [137] . . . . .	294
B.7	Beispiel eines Injektionsprotokolls [5] . . . . .	295
B.8	Beispiel einer injektionstechnischen Untersuchung aus dem Labor . . . . .	296
C.1	Prozessmanagement im Multichart Modus in eguana SCALES . . . . .	297
C.2	Anlagenaggregation im Prozessmanagement in eguana SCALES . . . . .	298
C.3	Anzahl der laufenden Pumpen pro Baustelle in eguana SCALES . . . . .	299
C.4	Anzahl der laufenden Pumpen pro Anlage in eguana SCALES . . . . .	300
C.5	Zeitreihen der Lagerstände und Verbräuche von Materialien in eguana SCALES	301
C.6	DA11 Austauschformat in eguana SCALES beispielhaft für drei Abrechnungs- positionen . . . . .	302
D.1	Prüfanweisung Teil 1 zur Berechnung der Viskosität [61] . . . . .	303
D.2	Prüfanweisung Teil 2 zur Berechnung der Viskosität [61] . . . . .	304
E.1	Ansätze der Vergleichsrechnung für die Dokumentations- und Analysezeit . .	305
E.2	Vergleich der monatlichen Dokumentationszeiten bei der Feldstudie . . . . .	306

## Tabellenverzeichnis

2.1	Chancen und Herausforderungen nach Goger et al. [55] mit hoher Auswirkung	25
2.2	Chancen der Digitalisierung in der Bauwirtschaft nach Nennungen in der Literatur ab 2010 [73]	27
2.3	Zustimmungen in % zu Aussagen für digitales Wissensmanagement im Baubetrieb	29
2.4	wichtigster erwarteter Nutzen von Wissensmanagementsystemen in %	30
2.5	Wichtigkeit von Attributen von Wissensmanagementsystemen	31
3.1	Bandbreiten von Leistungswerten für Bohrtechnik	49
3.2	Bandbreiten von Leistungswerten für Injektionstechnik	50
4.1	Einschätzung der Interessensvertreter zu den Entwicklungsstufen in %	77
4.2	Auswahl bestehender Bohrdatenlogger und Datenerfassungen	79
4.3	Auswahl bestehender Injektionssteuerungen und Auswertungssoftware	85
4.4	Auswahl bestehender Monitoringsysteme in der Injektionstechnik	89
5.1	Wichtigste Notationselemente mit Beispielen nach BPMN 2.0 [141] [75]	98
5.2	Aufgabentypen im BPMN aus [75] und [157] für den Baubetrieb adaptiert	101
5.3	Beispiele häufig verwendeter Identifikationsnummern	106
5.4	Maximale Verhältnisse der Zeitanteile des tradierten Dokumentationsprozesses	122
6.1	Systembeeinflussungen nach [126] im Zusammenhang mit der Bauausführung	126
6.2	Standardleistungspositionen LB-VI, Version 5 für Injektionsarbeiten, vereinfacht aus [93]	136
6.3	Gestaffelte Positionen für Pumpenbetriebsstunden adaptiert aus [147]	137
6.4	Beispiel für Soll-Prozesse aus den Interviewtranskripten	152
6.5	Anforderungen an die Eingabe	164
6.6	Anforderungen an die Funktionalitäten	165
6.7	Anforderungen an die Ausgabe	170
6.8	Qualitätsattribute der gewünschten Funktionen	171
6.9	Anforderungen an das implementierte System im Gesamtkontext	172
6.10	Vorgaben für die Durchführung der Systemerstellung	172
6.11	Anforderung an Prüfung, Einführung, Betreuung und Betrieb	173
7.1	Beispiele mobiler Projektdokumentationsplattformen	180
7.2	Beispiele von Echtzeit-Baudatenmanagementsystemen	180
7.3	Beispiele von ERP-Systemen für das Bauwesen	181

7.4 Leistungskennzahlen im digitalen Prozessmodell . . . . . 190

7.5 Die wichtigsten Parameter der Datenkontrolle von Injektions- und Bohrverläufen 203

7.6 Icons im Modul Daten . . . . . 207

7.7 Beispiele von Bohr- und Injektionstätigkeiten mit typischer Zuordnung zu einer  
Verwendungsgruppe . . . . . 209

7.8 Icons im Modul Materialien – Reiter „Mischungen“ . . . . . 214

7.9 Beispiele für automatische Abrechnungspositionen in eguana SCALES . . . . . 216

7.10 Ebenen der Visualisierung in eguana SCALES . . . . . 219

7.11 Icons im Modul Visualisierung . . . . . 221

8.1 Verhältnisse der Dokumentationstätigkeiten zueinander und Zeitersparnis beim  
Pilotprojekt . . . . . 235

8.2 Verteilungen für Vorgangsdauern [66] . . . . . 239

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Begriffe

AG	Auftraggeber
AI	Acrylatinjektion
AN	Auftragnehmer
API	Application-Programming-Interface
BIM	Building-Information-Modelling
BPMN 2.0	Buisness Process Model Notation in der Version 2.0
BV	Bohrlochverschluss
CADD	Computer Aided Desing and Drafting
D3	Data-Driven Documents
DNF	Discrete Fracture Modelling
DQ	Datenqualität
DSV	Düsenstrahlverfahren
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FSV	Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr
FTE	Vollzeitäquivalent (engl.: full time equivalent)
GIS	Geoinformationssystem
GPS	Global Positioning System
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
ISRM	International Society for Rock Mechanics Commission on Rock Grouting
KPI	Key Performance Indicator bzw. Leistungskennzahl
LB	Leistungsbeschreibung
MWD	Bohrdatenaufzeichnung (engl.: Measurement while Drilling)
PDCA	Planen-Durchführen-Prüfen-Handeln (engl.: Plan-Do-Check-Act)
RE	Requirement Engineering
Regex	Regular Expression
SASL	Simple Authentication and Security Layer
W/B-Wert	Wasserzementwert

## Datenformate

ANSI	American National Standards Institute
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CBOR	Concise Binary Object Representation
CSV	Comma Separated Values
D11	Austauschformat nach REB-VB 23.003 mit 80 Zeichen pro Zeile
DXF	Drawing Interchange File Format
JPEG	File Interchange Format der Joint Photographic Expert Group
JSON	JavaScript Object Notation
PDF	Portable Document Format
PNG	Portable Network Graphics
XLSX	Excel Spreadshhet XML
XML	Extensible Markup Language



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



# Anhang

## A Prozessbegehung und Leitfragen

Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik  
 Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald GÖGER**



## Experteninterview

mit

### Prozessbegehung und Leitfragen

zum Thema

## Digitales Datenmanagement für Bohr- und Injektionsarbeiten

### Stakeholder: Ausführung / Planung Überwachung

#### Zweck

Im Zuge der Ausführung meiner Dissertation am Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik des Instituts für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement der TU Wien, beschäftige ich mich mit der Umsetzungsrelevanz von Soft- und Hardwaretechnik im Kontext der Industrie 4.0. In den vier verschränkten Feldern Überwachung, Steuerung, Optimierung und Autonomie wird die Frage der Weiterentwicklungsmöglichkeiten und der praktischen Umsetzbarkeit der Teilbereiche Datenbankverknüpfung von Herstell- und Arbeitsparameter, Bauprozesszeitmanagement, Qualitätsmanagement, Materialmanagement, Protokollwesen und automatisierte Aufmaßerstellung erforscht.

Für die Modellierung eines ideellen Wissensmanagementsystems werden Anforderungen von Stakeholdern im Zusammenhang mit den Bauverfahren Injektion und Bohren mit Hilfe von Experteninterviews und qualitativer Inhaltsanalyse erforscht. Die Aufnahmen werden entsprechend der Vertraulichkeitserklärung behandelt und anonymisiert weiterverarbeitet.

#### Forschungsfeld

Weiterentwicklung der tradierten Bauprozessabwicklung bei Bohr- und Injektionsarbeiten

#### Beantwortung der Forschungsfrage

Welche Anforderungen werden an Datenmonitoringsysteme im Spezialtiefbau gestellt?

#### Vorgehensweise

1. Allgemeine Daten
2. Prozessbegehung des Dokumentations- und Analyseprozesses am aktuellen Projekt (kann entfallen, wenn keine Projekte vorliegen)
3. Vertraulichkeitserklärung unterzeichnen
4. Leitfragen Anforderungen (Aufnahme des Interviews)
5. Leitfragen IT-Systeme

Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik  
 Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald GÖGER**



## 1 Allgemeine Daten

Name

Alter

Position

Aufgaben- / Verantwortungsbereiche

Frühere Erfahrung mit Bauverfahren  
 Injektion- und Bohren

Bohrverfahren:

Injektionsverfahren:

Selbsteinschätzung: Wie stehen Sie digitalen Neuerungen im Bereich der Abwicklung und Kontrolle von Bohr- und Injektionsarbeiten gegenüber?

sehr positiv    eher positiv    neutral    eher negativ    negativ

Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik  
 Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald GÖGER**



## 2 Prozessbegehung

Denken Sie an Ihre durchzuführenden, periodischen (täglich, wöchentlich, monatlich) Prozesse (Organisationsprozesse, Dokumentationsprozess & Anlaysen) im Zusammenhang mit Bohr- und Injektionsdaten.

Mit welchem Input beginnen diese, welche Aktivitäten sind notwendig und welche Folgeprozesse lösen diese aus?

Start	Teilprozesse	Zeitanteil [h]	Ende	Folgeprozess

Welche IT-Systeme benutzen Sie für die Durchführung Ihrer Arbeiten?

IT-System	Verwendung

Zählen Sie auf mit welchen Dateninput Sie zu tun haben und zu welchen Sie diesen weiterverarbeiten.

Input (Datensätze / Protokolle / Auswertungen)	Output (Datensätze / Protokolle / Auswertungen)

Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik  
 Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald GÖGER**



### 3 Vertraulichkeitserklärung Experteninterview

Das Interview zum Thema „digitales Datenmanagement für Bohr- und Injektionsarbeiten“ wird auf Grundlage eines Leitfragenkatalogs zwischen

Dipl.-Ing. Leopold Winkler  
 TU Wien – IBPM,  
 Fachbereich Baubetrieb und  
 Bauverfahrenstechnik  
 Karlsplatz 13/234  
 1040 Wien, Austria

Name und Anschrift Fachexperte:

geführt. Hiermit versichere ich, Leopold Winkler dem Fachexperten folgende Rahmenbedingungen:

- Das Interview wird ausschließlich zur Ausarbeitung der wissenschaftlichen Forschungsfrage verwendet.
- Die Teilnahme am Interview ist durch Sie als Fachexperten freiwillig. Die Leitfragen dienen dazu, unterschiedliche Themenbereiche anzusprechen.
- Es müssen nicht alle Fragen beantwortet werden. Gegenfragen können jederzeit gestellt werden.
- Das Interview wird ausschließlich zu Transkriptionszwecken, mittels einem digitalen Aufnahmegeräts aufgenommen. Die Aufnahmen werden nach der Transkription gelöscht.
- Sämtliche im Rahmen des Interviews erhobenen Daten werden streng vertraulich behandelt und zur weiteren Verwendung anonymisiert.
- Ausschnitte aus dem Interview dürfen in anonymisierter Form in Dissertation und eventuell daraus hervorgehenden Veröffentlichungen erst nach Ihrer Freigabe der Transkripte zitiert werden.

Ich, Leopold Winkler bin ausschließlich für die Durchführung und Auswertung der Daten verantwortlich. Sie können nach Abschluss der Studie eine Zusammenfassung der Ergebnisse in digitaler Form erhalten.

\_\_\_\_\_  
 Leopold Winkler, am

Ich, \_\_\_\_\_  
 bestätige, dass ich über das Forschungsprojekt und über die Rahmenbedingungen aufgeklärt wurde. Außerdem erkläre ich mich mit meiner Unterschrift dazu bereit, Inhalte dieses Interviews für eine Transkription freizugeben.

\_\_\_\_\_  
 , am

Experteninterview

4

Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik  
 Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald GÖGER**



#### 4 Leitfragen funktionale Anforderungen (Beginn der Aufzeichnungen)

Unter den funktionalen Anforderungen werden Funktionalitäten beschrieben, die ein System erfüllen soll. Was soll das ein optimiertes Wissensmanagement in folgenden Teilbereichen tun können?

Datenaufnahme

Wie werden die Daten auf der Baustelle erhoben, und welche fehlenden Schnittstellen gibt es in der Ausführung?

Liegen die Daten in notwendiger Genauigkeit vor?

Wie würde sich Ihre Arbeit mit dem Blick auf Echtzeitdaten verändern?

Datenhaltung

Wie sollen die Daten auf der Baustelle abgespeichert werden?

Weiterverwendung von Daten

Welche Weiterverwendungsmöglichkeiten sehen Sie im projektübergreifenden Zusammenhang für erzeugte Daten in einem Projekt? Was ist dafür aus Ihrer Sicht notwendig?

(Reizwörter: Abrechnung, Leistungsaufwände / Kalkulation, Planung / Projektmanagement)

Qualitätskontrolle

Wie überprüfen Sie die Qualität der Bohr- und Injektionsleistungen?

(Injektionsgut, Kommentierung Protokolle, korrekte Ausführung)

Welche Qualitätsprüfungen liegen nicht in digitaler Form vor?

Materialmanagement

Wie kann das Materialmanagement durch die Verknüpfung mit den Herstellern optimiert werden?

Auswertungen / Analysen

Welche Auswertungen und Analysen soll ein Wissensmanagementsystem automatische durchführen?

Welche Art von Visualisierungen bevorzugen Sie für Ihre Arbeit? Welche Zusammenhänge würden Sie gerne am Beginn Ihrer Arbeit visualisiert zur Verfügung gestellt haben?

(Reizwörter: Listen, Integration Planung / Geologie, Körper mit Eigenschaften)

Welche Schnittstellen zu anderen Systemen benötigen Sie?

Experteninterview

5

Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik  
 Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald GÖGER**



Zusammenarbeit andere Beteiligte am Bau

Welche Anforderungen habe Sie an das interne / externe Protokollwesen?

(Reizwörter: schnelle Bearbeitung, Einheitlichkeit der Protokolle, Individuelles Arbeiten)

Wie können diese Protokollwesen nach Ihrer Meinung, durch digitales Prozessmanagement abgelöst werden?

Welche Art der Abrechnung / bzw. der Bauüberwachung wäre auf Grundlage eines gemeinsamen digitalen Datenmanagements anzustreben?

## 5 Leitfragen nichtfunktionale Anforderungen

Unter nichtfunktionalen Anforderungen versteht man die Qualität unter welcher die Funktionalitäten durchgeführt werden sollen.

Wie soll ein optimiertes Wissensmanagement in der Ausführung funktionieren?

Vor- und Nachteile

Welche Nachteile bieten bestehende IT-Systeme mit denen Sie gearbeitet haben?

(Reizwörter: Systemausfälle / Datenverlust, Personalbedarf IT, Kosten, Ingenieursmäßiges Denken, Komplexität / Fehleranfälligkeit, Datenbearbeitung)

Welche Vorteile könnten neu entwickelte IT-Systeme bringen?

(Reizwörter: Entlastung der Baustelle, Transparenz?)

Globale Datenbank

Inwiefern kann die Sicherheit und das Unternehmenswissen bei zentralen Wissensmanagementsystemen gefährdet sein?

Handhabung

Welche Anforderungen würden Sie hinsichtlich der Handhabung an digitale Wissensmanagementsysteme stellen?

(Reizwörter: Intuitiv einfach, Support, ortsungebunden, Anpassungsfähigkeit)

Entwicklungspotentiale

Welche Entwicklungspotentiale haben Datenmonitoringsysteme? Welche Module sollten diese beinhalten (sofern noch nicht erwähnt)?

(Reizwörter: Abbruchkriterien, Bauzeitprognosen, Analyse nach festgelegten Algorithmen?)

Experteninterview

6

Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald GÖGER**



(Ende der Aufzeichnungen)

Aufnahmen

Datei	Länge



**B Tradierte Handzettel und Protokolle**

<b>Herstellprotokoll: Kontrolle der Injektionsmittel</b>		N°: <u>1 von 7</u>											
Baustelle: <u>851 H</u> Bauteil: <u>TM 310</u>	Datum/Schicht: <u>9.12.22 / Nacht</u>												
<b>Pumpe</b>													
Injektionsmittel: <u>XYZ</u> Mischung: <u>A1 + A2 + B + B140-18</u> Mischverhältnis A:B: <u>1:1</u> Topfzeit: <u>40</u> Min	P1: <u>15000.73</u> ml P2: <u>15000.79</u> ml Kolben (PUM) induktiv (AC) P1: <u>5</u> (ml bzw %) Max. Mengenmessfehler: <u>5</u> (%) P2: <u>5</u> (ml bzw %) Max. Mengenmessfehler: <u>5</u> (%) (A2, B) (Gesamt)												
<b>Qualitätssicherung</b>													
Pumpe Nr.	Uhrzeit	Komp.	Voll	Abgewogene Menge (=AM)	Volumen Konversion: (Dichte Komp.: AM)	Delta: (2 x Delta: (Vol A - Vol B) / Vsoll) x 100	Max. Mischungsverhältnis (SOLL)	Status: [OK - KO]	Gesamt Volumen (A+B)	Delta (A+B) \ Vsoll (=DeltaG)	Max. Mengenmessfehler (SOLL)	Status: [OK - KO]	Maßnahme
		Soll	10.000 ml	[g]	[ml]	[%]	5% (AC) 9% (PU)		[ml]	[ml]	5% (AC) 16% (PU)		
2	18:00	A	10000	5272	5025	0,98	5%	OK	10099	99	5%	OK	Muster
1	20:42	B	10000	5074	5074		5%	OK	10092	92	5%	OK	Rechenbeispiel
		A		5275	5215				50,54	100,5 - 100 = 0,5			
		B		5064	5064				ist kleiner 5%	92			
		A											
		B											
		A											
		B											

Abb. B.1: Handzettel eines Ausliterversuchs

Baugrundinjektionen		Mischprotokoll											
Datum / Schicht:		Injektionsmittel:										Anlage:	
Abschnitt													
#	Uhrzeit [hh:mm]	Komp. A I Charge Nummer	Komp. A II Charge Nummer	Wasser 20 kg [✓]	B			Temperatur		Reaktionszeit [min]	Rückstell- probe [Komp]	Bemerkung/ Entsorgung Restmenge	
					Typ [Bezeichnung]	Menge [g]	Charge Nummer	Komp. A [°C]	Komp. B [°C]				Spritzb. [°C]
1	5:30												
Übertrag: Zeitpunkt letzte Vormischung (Entsorgung wenn Zeitpunkt größer 5 Std zurückliegt)													
2	6:30	271117.1	061117.1	✓	DL40-18	270	061117.1	20.4	18.9	19.1	—	—	
3	6:35	—  —	—  —	✓	—  —	—  —	—  —	—  —	—  —	—  —	—	—	
4	6:40	—  —	—  —	✓	—  —	—  —	—  —	—  —	—  —	38	ja	—	
5													
Beispiel, wenn Zeitpunkt der letzten Vormischung älter als 5 Std ist													
6	5:30												
Übertrag: Zeitpunkt													
7	13:00												
8	13:15	271117.1	061117.1	✓	DL40-18	270	061117.1	20.5	18.0	18.5	—	—	Entsorgung RM (5:30)
9													
10													
11													
12													
13													
14													
Bemerkungen:													
für Bauherr		für xx			Bauleiter			Anlagenführer					
Datum/Unterschrift		Datum/Unterschrift			Datum/Unterschrift			Datum/Unterschrift			Unterschrift		

Abb. B.2: Beispiel eines Mischprotokolls

**Probennahmeprotokoll**

Muster AC

Produkt .....		Datum Probenahme: Mo. den 18.12.	
Komponente	Temperatur [°C]	Chargennummer	Probenummer
<b>A I</b>	20,1	27117.1	0010 (Pipette aus A I, dann in Döschen)
<b>A II</b>		06117.1	
<b>B</b>	19,2	06117.1	
Festmuster	Bauteiltemperatur [°C]	Reaktionszeit (T [°C], Zeit [min])	Probenummer
Temp.-messung Würth Geräte Nr. 170306422	19,5	35°C, 38 min	FM ...000-1.....
<b>Tunnelmeter / Tunnel</b>			
<b>Injektionsmaßnahme</b>	<input type="checkbox"/> Sonstiges .....		

Die Proben werden durch den Überwachungsbeauftragten der MFPA Leipzig GmbH am Entnahmetag mitgenommen.  
 Die Proben sind spätestens am 3. Werktag nach erfolgter Entnahme an die  
 xxx  
 zu senden. Die Sendung erfolgt kostenfrei für xxx

Die ordnungsmäße Probenentnahme und Richtigkeit vorstehender Angaben bescheinigen:

Datum: 18.12.      Name (DRUCKSCHRIFT):      Unterschrift:

Probeneingang MFPA DATUM /: Eingangnummer:	Bemerkungen (Zustand Probe)	Unterschrift Annahme

Abb. B.3: Handzettel einer Probenahme für ein 2-Komponenten Injektionsmittel

<b>BOHRUNG - SCHURF - SCHACHT</b>						Dok.Nr.	
						Stand:	
Auftraggeber:							
					<b>Bericht Nr.:</b>	<b>0004</b>	
Gelände (GOK) <b>0,00</b> m, bezogen auf: <b>GOK</b>					Datum		
Bohrrichtung: Vertikal		Winkel Vertikal <b>0,00</b> °			Winkel nicht zutreffend °		
Wasserspiegel ab GOK:			Verrohrung ab GOK:		Arbeitszeit: von bis Uhr		
um	Uhr:	m	∅	<b>742,0</b>	bis	m	
um	Uhr:	m	∅		bis	m	
Wetter und Temperatur:						° C	
Aufschlus- art Bohrwerk- zeug Spülung	Krone Kronen-∅ (Bohr-∅)	Tiefe ab GOK in m		Beschreibung der Schichten (Bodenart / Gesteinsart, Einschlüsse besonderer Art, Farbe und Beschaffenheit, Besonderheiten beim Bohren)	Wasser- beob- achtung	Proben	
		von	bis			Art	Tiefe ab GOK
1	2	3	4	5	6	7	8
720	730	59,00	61,00	59-62 weich bis 61 hart Messung Steuerr OST		1	
745	755	61,00	63,00	mittelhart "		1	
810	820	63,00	65,00	hart - mittelhart Messung		1	
940	1040	65,00	67,00	mittelhart Ausbau v. Einbau Hammer Steuerr OST *		1	
1055	1105	67,00	69,00	hart - mittelhart Aus - Einbau Hammer		1	
1315	1350	69,00	71,00	weich		1	
1400	1410	71,00	73,00	"		1	
1425	1430	73,00	75,00	sehr weich		1	
1470	1455	75,00	77,00	weich		1	
1505	1510	77,00	79,00	weich - mittelhart Messung		1	
1540	1545	79,00	81,00	mittelh. Steuerr OST		1	
1600	1605	81,00	83,00	"		1	
1620	1630	83,00	85,00	" Messung Ausg. Einbau Hammer		1	
Sonstiges (ev. Lageskizze):  * Krone gewechselt auf Maxb.				AUSMÄSSFESTSTELLUNG		Legende:	
				Pos.	Menge	Bezeichnung	
						zu Spalte 1:	
						Sch Schacht M Meißel	
						GB Greiferbohrung	
						SB Schlagbohrung	
						DB Drehbohrung HB Hammerbohrung	
						WS Wasserspülung CF Counterflush	
						LS Luftspülung SKI SK mit Inliner	
						DS Dickspülung SK Seilkernrohr	
						EK Kernbohrung mit Einfachkernrohr	
						DK Kernbohrung mit Doppelkernrohr	
				zu Spalte 2:			
				HM Hartmetallkrone			
				Dia Diamantkrone			
				zu Spalte 6:			
				GW Grundwasser } mit Höhenangaben.			
				SW Sickerwasser } Anstieg, Abfall			
				zu Spalte 7:			
				10 Gestörte Probe, Menge in l			
				12 Ungestörte Probe, ∅ in cm			
				20 Würfelprobe, Kantenlänge in cm			
				WP Wasserprobe KP Kernprobe			
Bohrgerät: <b>Casagrande M9-II</b>					Fortsetzungsbericht Nr.: <b>0005</b>		
ZÜBLIN Spezialtiefbau Ges.m.b.H. Bohreräteführer (Name, Unterschrift):				Für den Auftraggeber (Name, Unterschrift):			

Abb. B.4: Beispiel eines Bohr-Handprotokoll mit Bohransprache

Injektion-Handprotokoll						
Datum / Schicht: 25.10.18/XX		Röhre / TM:				
Bohrdurchmesser: [mm]		Injektionsmat.:				
Länge / Injektionsabschnitte: [m]		Lumpennummer: 1				
			<b>Abbruch Kriterien:</b> - P Max: 10 bar - V Max: 500 l - Haltezeit: 5 min - Qmin: 1 l [Autom. Reset] - Abbruch: Bei Austritt und Umlauf  <b>Abkürzungen:</b> - DK: DK erreicht - A: Abbruch - PNS: Packer Nachsetzen - B: Bohrloch blockiert			
Eingabe Name	Packer Tiefe	Uhrzeit		Menge [ltr]	Status	Bemerkungen / Unterbrechungen
		Beginn	Ende			
10172603 1		07:18	07:34	28,0	DK	
10172605 1		08:01	09:32	90,5	A	Sp. Beton
10172608 1		09:34	10:15	34,0	DK	
10172609 1		10:24	10:43	26,6	DK	
10172610 1		10:54	11:44	147,2	A	Stromausfall
10172610 1 ST2		11:51	12:43	129,0	A	Sp. Beton
10172611 1		12:48	13:22	63,1	A	Sp. Beton
10172612 1		13:31	14:05	57,0	A	Stromausfall
10172612 1 ST2		14:08	14:19	12,4	A	Stromausfall
10172612 1 ST3		14:27	14:29	0	A	Stromausfall
10177612 1 ST4		14:34	17:14	144,3	A	Austritt ca. 12 Uhr Beton füllte Packung Sp. Beton
10172614 1		17:29	20:52	468,67	A	Stromausfall
10172614 1 ST2		20:58	21:18	31,55	V	
Die vielen Stromausfälle waren Grund das Kernbohrer ein Problem mit seiner Absaugung hatte. wurde repariert						
<b>Allgemeine Bemerkungen:</b>						
Bauherrn	Bauleiter			Anlagenführer		
Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift		Unterschrift		

Abb. B.5: Beispiel eines Injektions-Handprotokolls

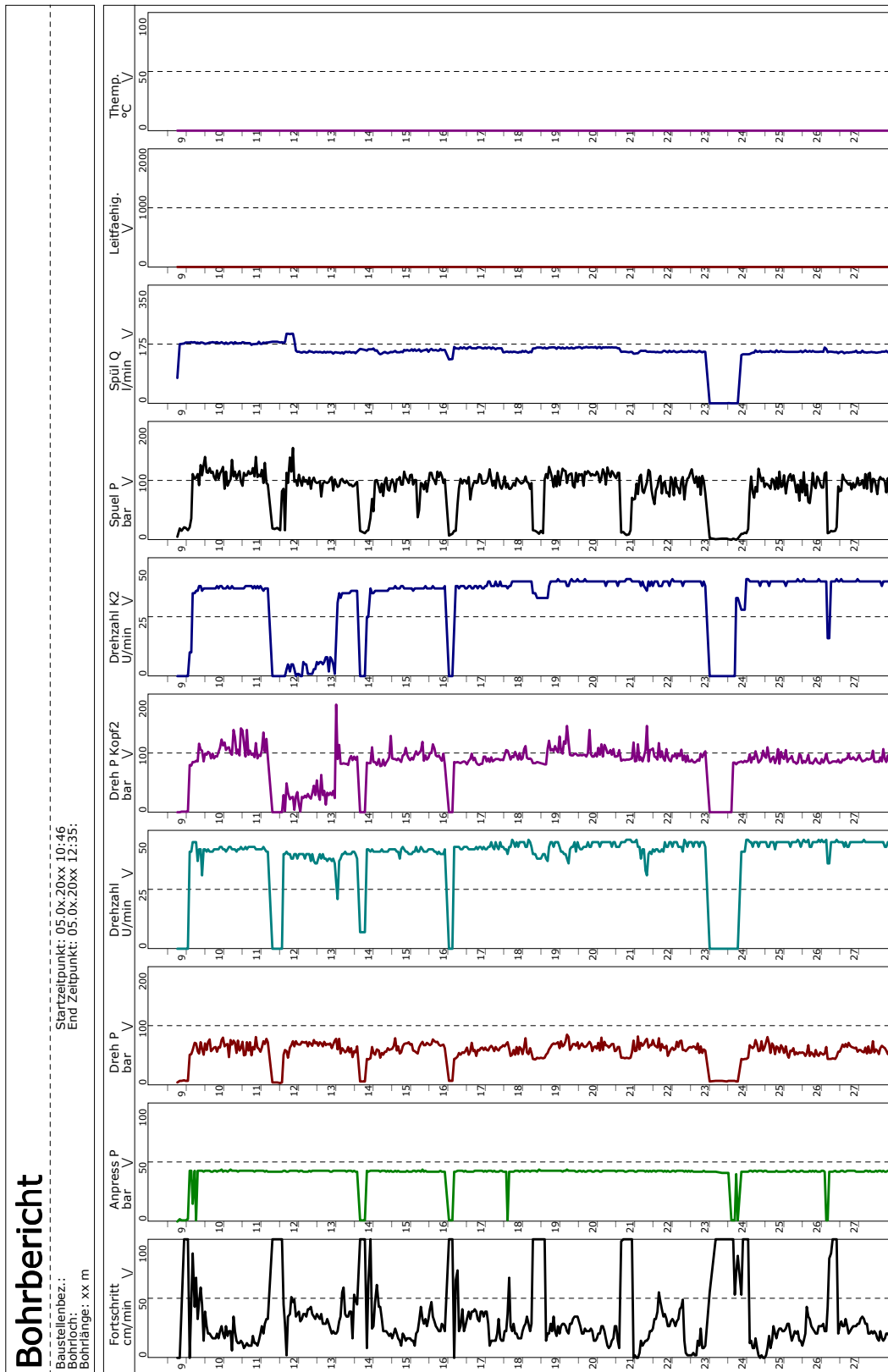


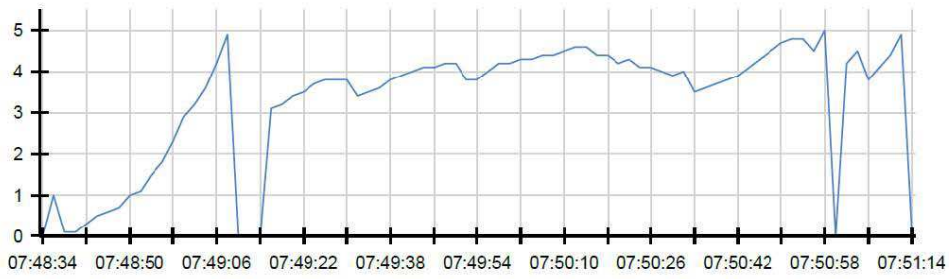
Abb. B.6: Maschinenbericht Bohren [137]

## PQ Registration Report

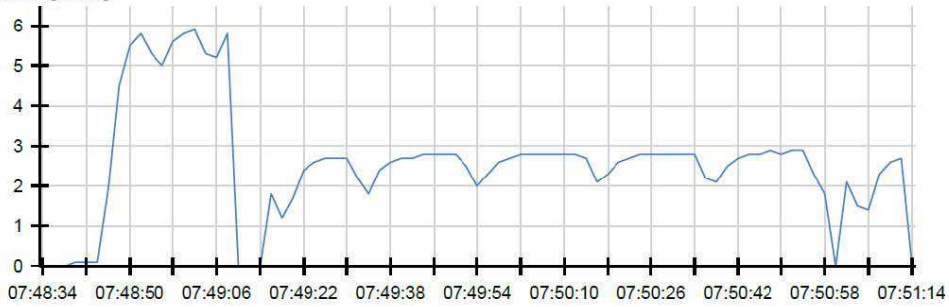
Job Site: sh7\_22 Plant1  
 Hole: bh2013  
 Generated: 01.06.2017 16:13:40

Channel:	1	Max. Pressure:	5.0 bar
Start Time:	16.04.2017 07:48:32	Avg. Pressure:	3.3 bar
Stop Time:	16.04.2017 07:51:10	Max. Flow:	5.9 l/min
Duration:	00:02:30	Avg. Flow:	2.6 l/min
Quantity:	7.0 l	Max. GIN:	8.8
Stage:	8	Mode:	0
Length:	4.0 m	Mixture:	grouting

Pressure [bar]



Flow [l/min]



GIN

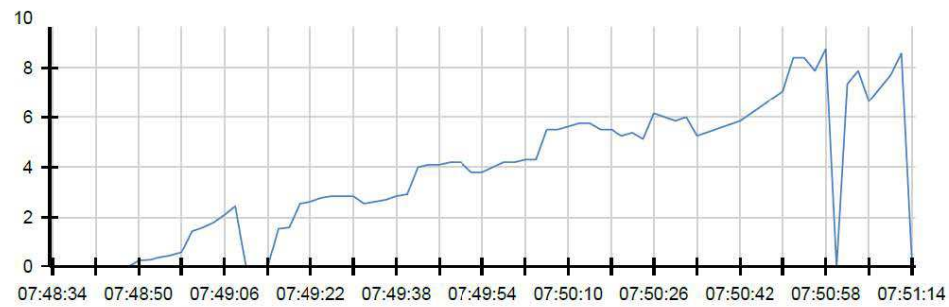


Abb. B.7: Beispiel eines Injektionsprotokolls [5]

			Projekt:		
			Projektnummer: 822		
			Datum: 29.07.20xx		
ERGEBNISSE DER INJEKTIONSTECHNISCHEN UNTERSUCHUNGEN					
PROBENDATEN			822_100_1	822_100_2	822_100_3
<b>Probennummer</b>					
Produktname					
Komponente A1	[%]		100	100	100
Komponente A2	[% v. A1]		5,0	5,0	5,0
Komponente B2	[% v. A1]		0,2	0,8	2,5
Wasser	[% v. A1]		100	100	100
TEMPERATUR			Abb. 1	Abb. 2	Abb. 3
Komponente A1	[°C]		23,0	25,6	21,5
Komponente A2	[°C]		23,0	25,7	21,4
Komponente B2	[°C]		n.m.	n.m.	n.m.
Wasser	[°C]		17,0	15,0	17,4
Max. Reaktionstemperatur	[°C]		59,0	66,0	66,0
DICHTE					
Dichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,01	1,02	1,03
VISKOSITÄT			Abb. 6	Abb. 7	Abb. 8
Rheologischer Typ		[-]	Newton	Newton	Newton
Versuchstemperatur		[°C]	20,0	20,0	20,0
<b>Anfangsviskosität <math>\eta</math></b>		[mPa s]	1,56	2,06	5,71
Schergefälle von/bis		[1/s]	173 / 1200	173 / 1200	173 / 686
im Zeitbereich		[mm:ss]	01:18 / 02:03	01:16 / 02:01	01:14 / 01:39
Viskositätsentwicklung					
Schergefälle $\gamma$		[1/s]	800	800	800
Zeit bei $\eta = 20$ mPa·s		[hh:mm:ss]	00:10:18	00:05:20	00:03:14
Zeit bei $\eta = 40$ mPa·s		[hh:mm:ss]	00:12:18	00:06:48	00:04:02
Zeit bei $\eta = 60$ mPa·s		[hh:mm:ss]	00:13:22	00:07:28	00:04:26
Zeit bei $\eta = 80$ mPa·s		[hh:mm:ss]	00:13:54	00:07:59	00:04:45
Zeit bei $\eta = 100$ mPa·s		[hh:mm:ss]	-	00:08:15	00:04:58
TOPFZEIT / GELZEIT					
Viskosität		[mPa s]	7,81	10,29	11,42
Zeit		[hh:mm:ss]	00:08:30	00:04:30	00:02:30
SYNÄRESE / VOLUMENÄNDERUNG					
Versuchstemperatur		[°C]	10,0	10,0	10,0
Volumenänderung Gel <sup>1)</sup>					
Gelierende $\Delta V$		[%]	1,0	1,6	1,0
28 Tage $\Delta V$		[%]	2,4	2,8	0,2
Synäreswasser <sup>2)</sup>					
28 Tage $\Delta m_w$		[%]	-2,0	-3,6	-2,2

1) Gelvolumen: positiver Wert Volumensabnahme

2) negativer Wert: Wasseraufnahme d. Gels

positiver Wert: Wasserabgabe d. Gels

**Abb. B.8:** Beispiel einer injektionstechnischen Untersuchung aus dem Labor



### C Digitale Berichte

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

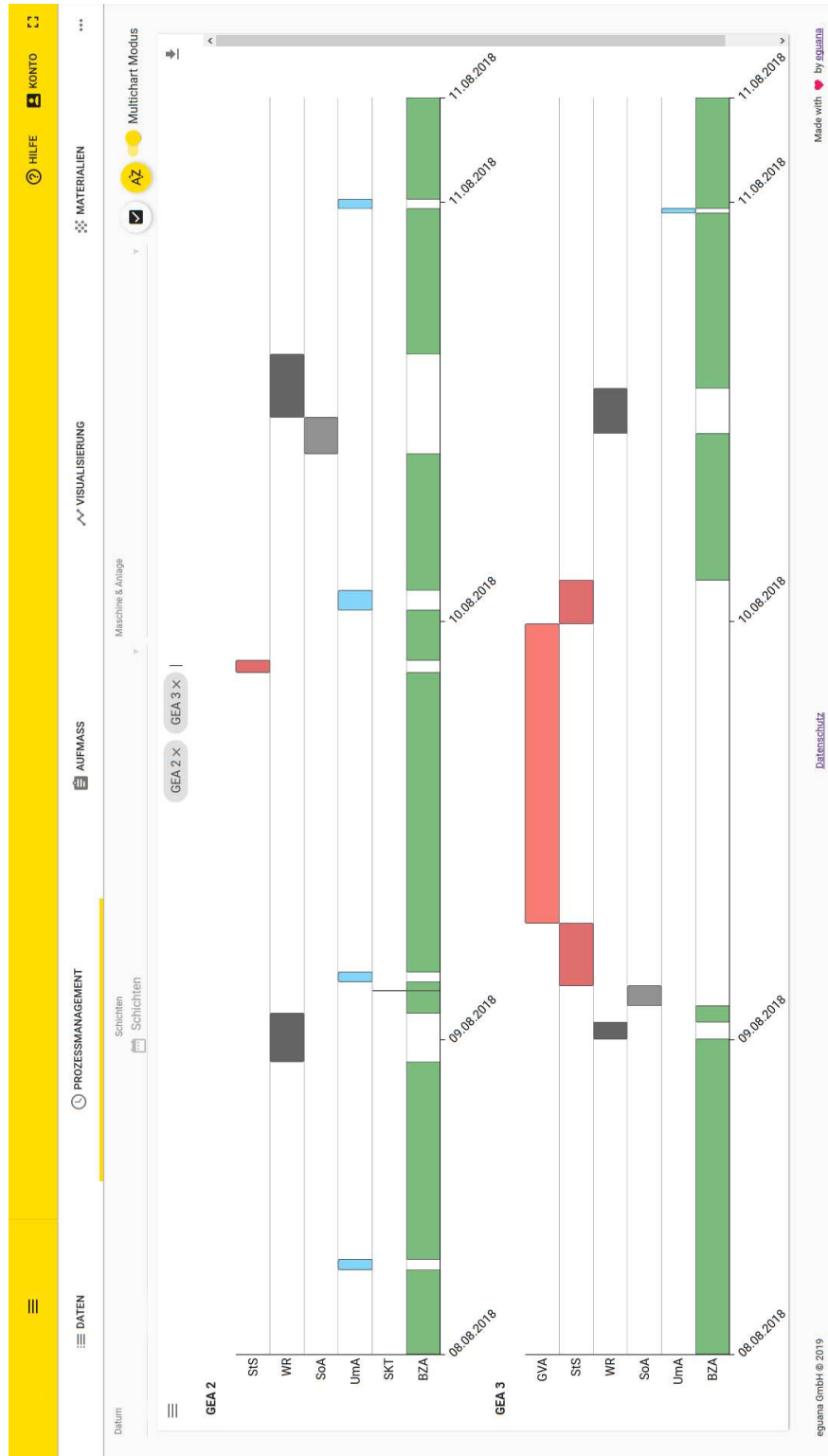


Abb. C.1: Prozessmanagement im Multichart Modus in eguana SCALES

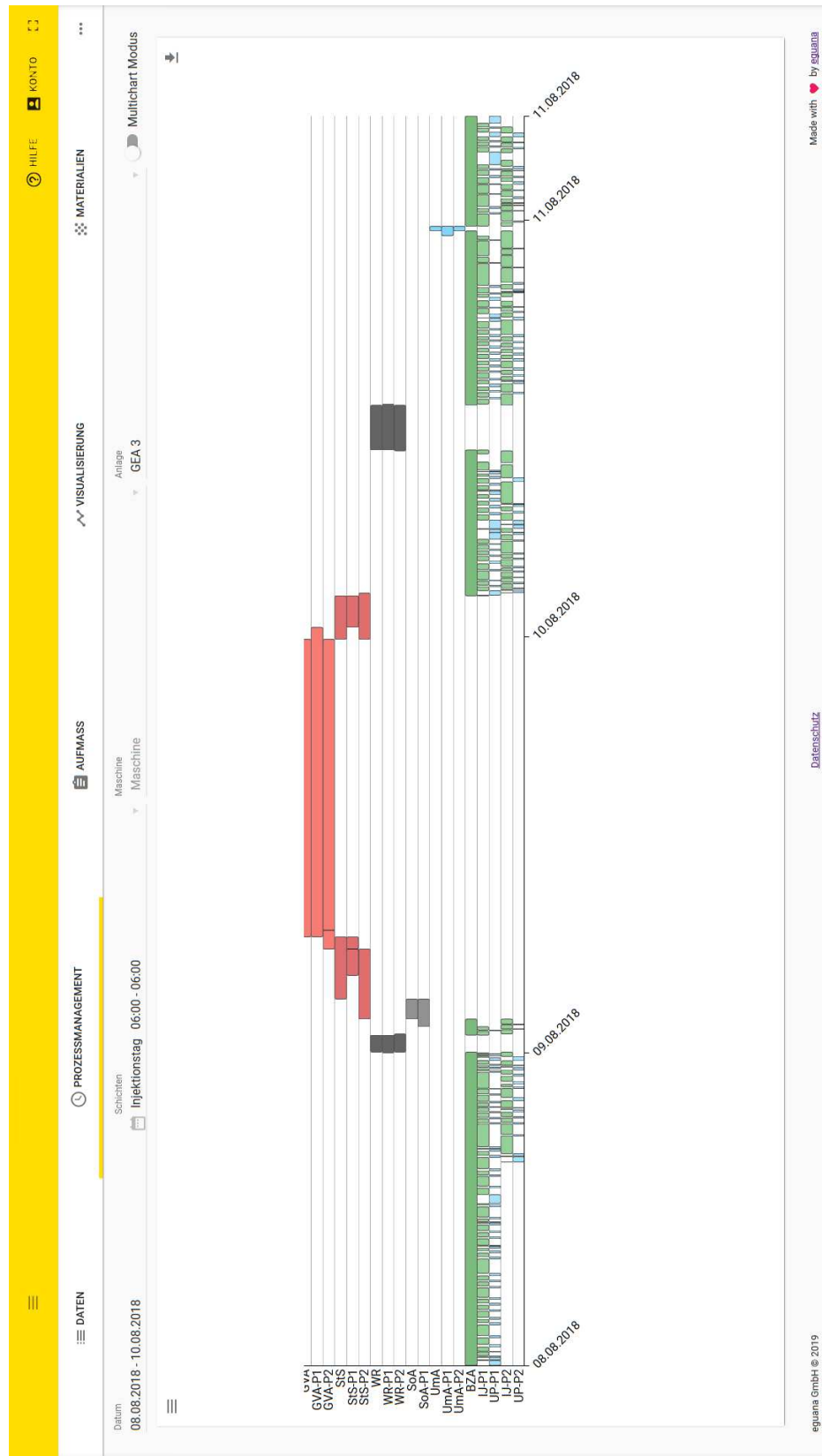


Abb. C.2: Anlagenaggregation im Prozessmanagement in eguana SCALES

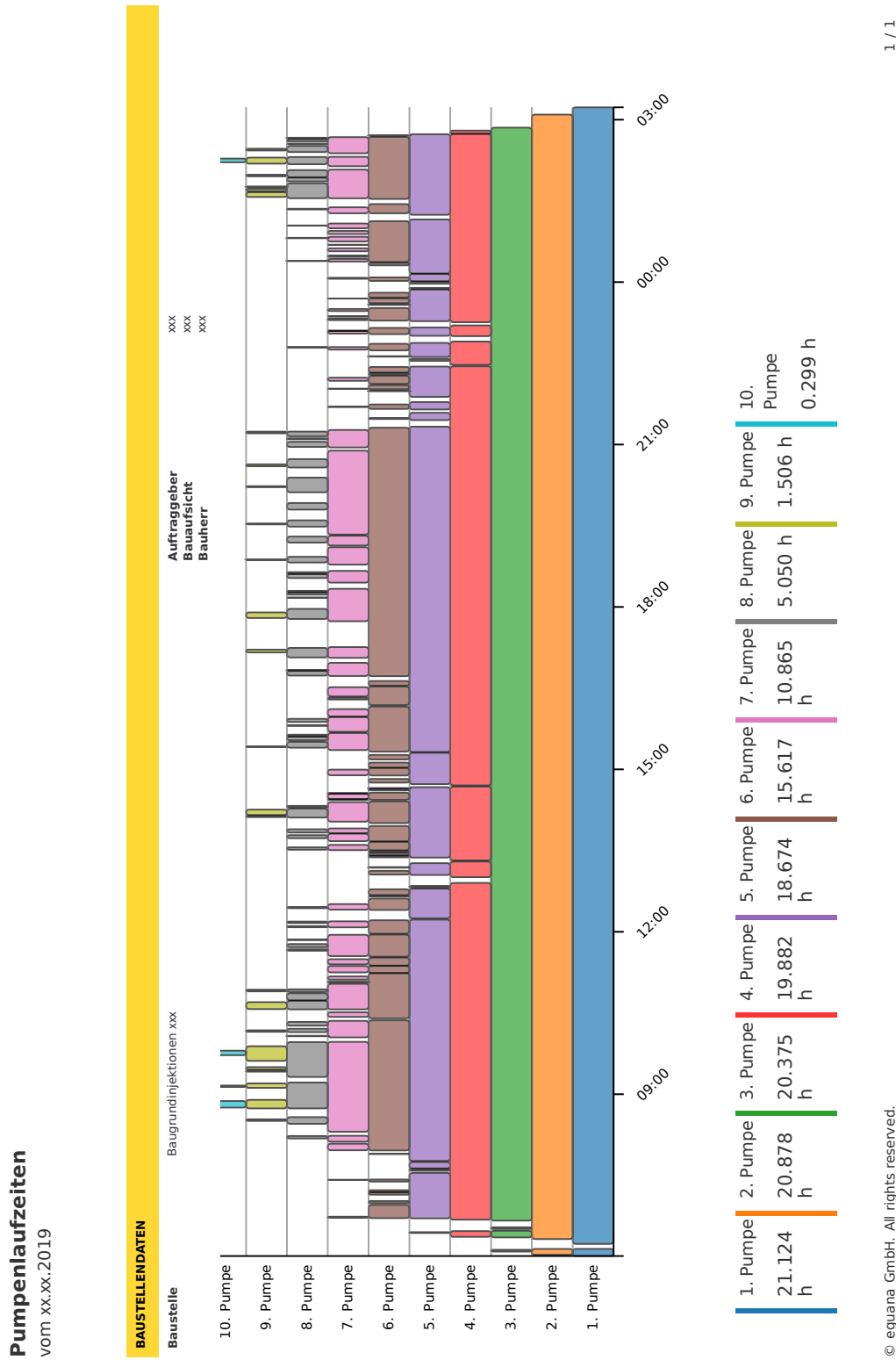


Abb. C.3: Anzahl der laufenden Pumpen pro Baustelle in eguana SCALES

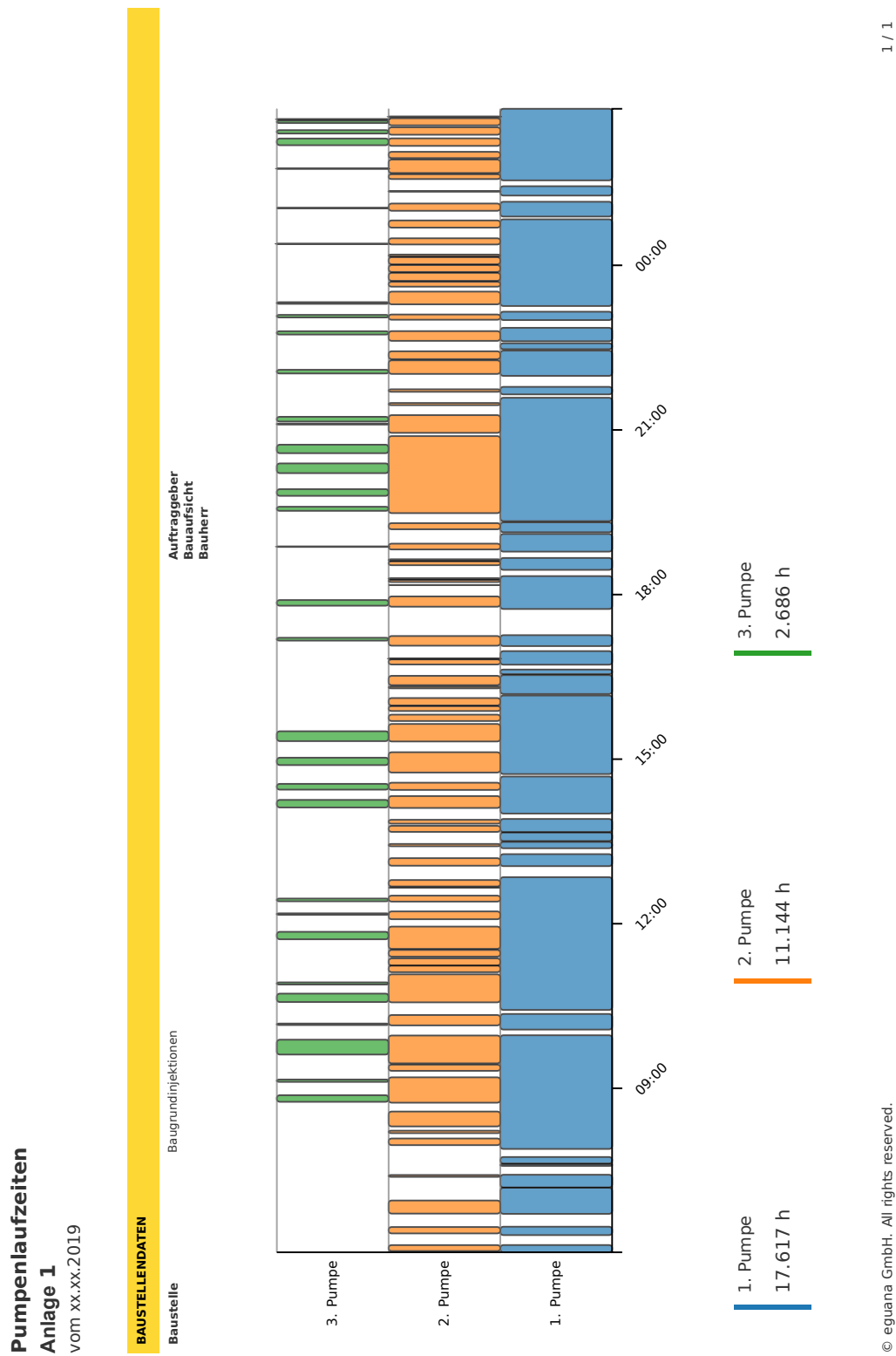


Abb. C.4: Anzahl der laufenden Pumpen pro Anlage in eguana SCALES



Abb. C.5: Zeitreihen der Lagerstände und Verbräuche von Materialien in eguana SCALES

00	23.0032009Injektionen	1122PPPI0
111024020	91608=	0009D0
111024020	*Auflistung nach Einzeltagen je Packerstellung	0009D4
111024020	*Siehe Tagesdokumentation, Kuerzel BPK	0009D8
111024020	*01.08.2019 - 41 Stueck	0009E0
111024020	*02.08.2019 - 82 Stueck	0009E4
111024020	*03.08.2019 - 79 Stueck	0009E8
111024020	*05.08.2019 - 60 Stueck	0009F0
111024020	*06.08.2019 - 87 Stueck	0009F4
111024020	*07.08.2019 - 75 Stueck	0009F8
111024020	*08.08.2019 - 88 Stueck	0009G0
111024020	*09.08.2019 - 89 Stueck	0009G4
111024020	*10.08.2019 - 7 Stueck	0009G8
111024045	9130386,5=	0009H0
111024045	*Auflistung nach Einzeltagen je Beaufschlagung	0009H4
111024045	*Siehe Tagesdokumentation, Menge	0009H8
111024045	*01.08.2019 - 6102,6 l	0009I0
111024045	*02.08.2019 - 3566,3 l	0009I4
111024045	*03.08.2019 - 3588,6 l	0009I8
111024045	*05.08.2019 - 2322,8 l	0009J0
111024045	*06.08.2019 - 4337,7 l	0009J4
111024045	*07.08.2019 - 4306,4 l	0009J8
111024045	*08.08.2019 - 3339,2 l	0009K0
111024045	*09.08.2019 - 2453,1 l	0009K4
111024045	*10.08.2019 - 369,8 l	0009K8
111025010	91396,716=	0009L0
111025010	*Auflistung nach Einzeltagen je Beaufschlagung	0009L4
111025010	*Siehe Tagesdokumentation, Netto-Pumpzeit	0009L8
111025010	*01.08.2019 - 61,365 h	0009M0
111025010	*02.08.2019 - 48,324 h	0009M4
111025010	*03.08.2019 - 43,164 h	0009M8
111025010	*05.08.2019 - 39,131 h	0009N0
111025010	*06.08.2019 - 50,876 h	0009N4
111025010	*07.08.2019 - 50,355 h	0009N8
111025010	*08.08.2019 - 48,95 h	0009O0
111025010	*09.08.2019 - 45,866 h	0009O4
111025010	*10.08.2019 - 8,685 h	0009O8
99		

Abb. C.6: DA11 Austauschformat in eguana SCALES beispielhaft für drei Abrechnungspositionen

## D Prüfanweisungen Injektion


Nummer: 1		<b>PRÜFANWEISUNG</b>	
Datum: 17.09.2017		Bestimmung der Fließgrenze und der Viskosität von zementbasierten Injektionsmitteln	
<b>ANWENDUNGSBEREICH</b>			
Bestimmung der Fließgrenze und der plastischen Viskosität von zementbasierten Injektionsmittel im Baustellenlabor durch eingeschultes Personal mittels Viskosimeter.			
<b>BENÖTIGTE GERÄTE</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Behälter ca. 3- 4 Liter</li> <li>• Messbecher 1000 Milliliter</li> <li>• Viskosimeter</li> <li>• Innerer Messzylinder mit gewellter Oberfläche</li> </ul>			
<b>ZUGEHÖRIGE NORMEN</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• DIN 53019 Viskosimetrie – Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern</li> <li>• EN ISO 3219 Kunststoffe – Polymere/Harze in flüssigem, emulgierten oder dispergierten Zustand – Bestimmung der Viskosität in einem Rotationsviskosimeter</li> </ul>			
<b>ARBEITSANWEISUNG</b>			
Nr.	Beschreibung der einzelnen Schritte		
1.	Computer und Viskosimeter miteinander verbinden und einschalten. Im Eingabefenster das verwendete Viskosimeter auswählen.		
2.	Inneren Messzylinder für die Prüfung zementbasierter Injektionsmittel an Viskosimeter anbringen.		
3.	Äußeren Messzylinder ca. bis zur Hälfte oder bis zur Marke mit Suspension füllen und in das Viskosimeter einbauen.		
4.	Äußeren Messzylinder soweit mit Suspension auffüllen, bis etwas Suspension über den Rand des inneren Messzylinders überläuft.		

Abb. D.1: Prüfanweisung Teil 1 zur Berechnung der Viskosität [61]


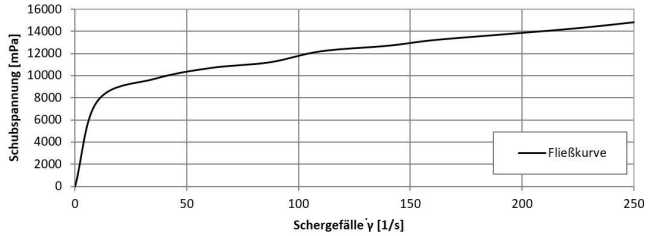
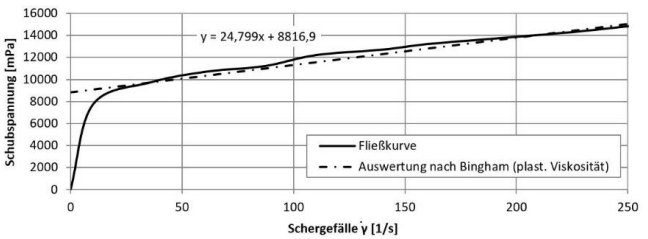
Nummer: 2		<b>PRÜFANWEISUNG</b>	
Datum: 17.09.2017		Bestimmung der Fließgrenze und der Viskosität von zementbasierten Injektionsmitteln	
<b>ARBEITSANWEISUNG</b>			
Nr.	Beschreibung der einzelnen Schritte		
5.	Das zu dem Viskosimeter dazugehörige Prüfprogramm starten. Darin das Viskosimeter und den verwendeten Messzylinder auswählen. Programm starten.		
6.	Nach Abschluss des Prüfprogramms Prüfbericht abspeichern.		
7.	Fließkurve durch Auftragen der Schubspannung [mPA] gegen das Schergefälle [1/s] ermitteln.	<b>Fließkurve</b> 	
8.	Anlegen einer Geraden an den flachen Teil der Fließkurve. Bestimmen der Geradengleichung $[y = k * x + d]$ für diese Gerade. Der Wert für k entspricht dabei der plastischen Viskosität und der Wert d der Fließgrenze.	<b>Fließkurve</b> 	
9.	Fließgrenze im Eingabefenster in Pascal [Pa] eintragen. Plastische Viskosität im Eingabefenster in Millipascalsekunden [mPa*s] eintragen		
Hinweise:	Alle verwendeten Geräte nach der Prüfung gründlich reinigen Der exakte Arbeitsablauf kann in Abhängigkeit des verwendeten Viskosimeters variieren. Es ist jedenfalls die Gebrauchsanleitung des verwendeten Gerätes zu beachten.		

Abb. D.2: Prüfanweisung Teil 2 zur Berechnung der Viskosität [61]



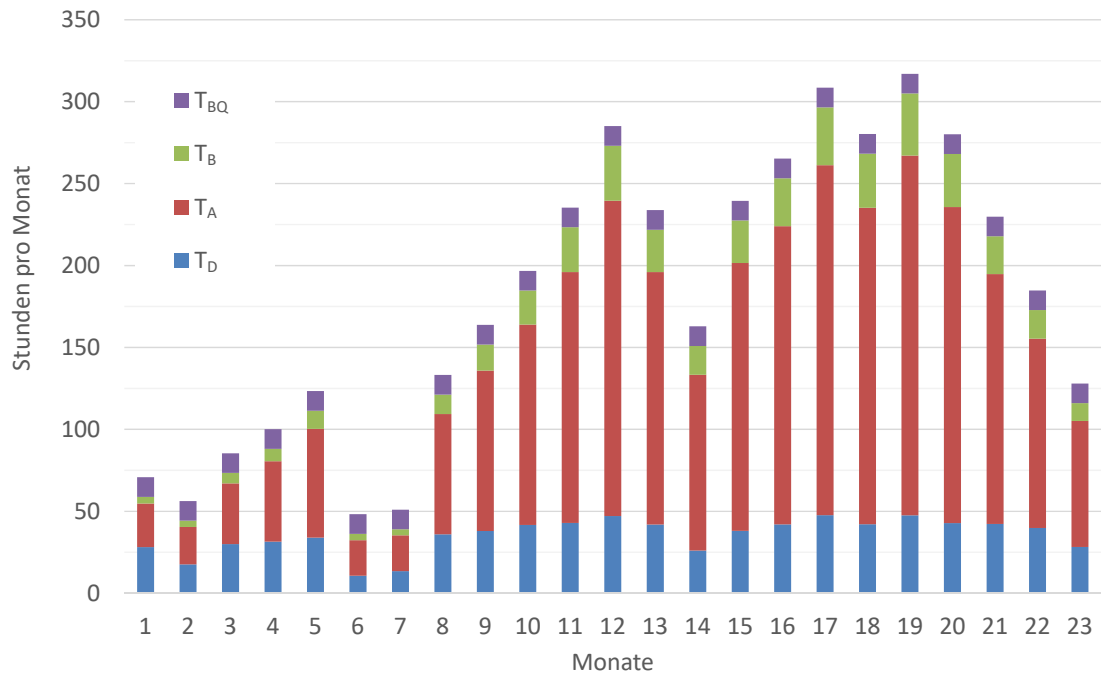
### E Vergleichsrechnung für die Feldstudie

	tradiert	digital		Multipl.	Bezug
<b>Daten Beschaffung</b> $t_D$					
<b>Fußweg zur Anlage</b>	1025	0 s			
Treppe	15	0 s	1,00	s	
Tore/Türen	10	0 s	1,00	s	
Fortbewegung	1000	0 m	1,00	s	
<b>USB-Stick handling</b>	59	0 s			
Flash drive suchen/einstecken	12	0 s	1,00	s	
Konnektivität zum Rechner	16	0 s	1,00	s	
Ordner am Zielsystem öffnen	11	0 s	1,00	s	
Neuen Ordner anlegen	9	0 s	1,00	s	
Ordner am Zielsystem schließen	3	0 s	1,00	s	
Flash drive sicher entfernen	8	0 s	1,00	s	
<b>Datentransfer</b>	5,7	0 s			
Datentransfer IDE	5	0 s	308,00	i	
Datentransfer Notebook	0,7	0 s	308,00	i	
<b>Website-Handling</b>	0	30 s		1	
Authentifizierung	0	30 s	1,00	s	
<b>Fußweg zum Baubüro</b>	1025	482,5 s			
Treppe	15	0 s	1,00	s	
Tore/Türen	10	0 s	1,00	s	
Fortbewegung	1000	0 m	1,00	s	

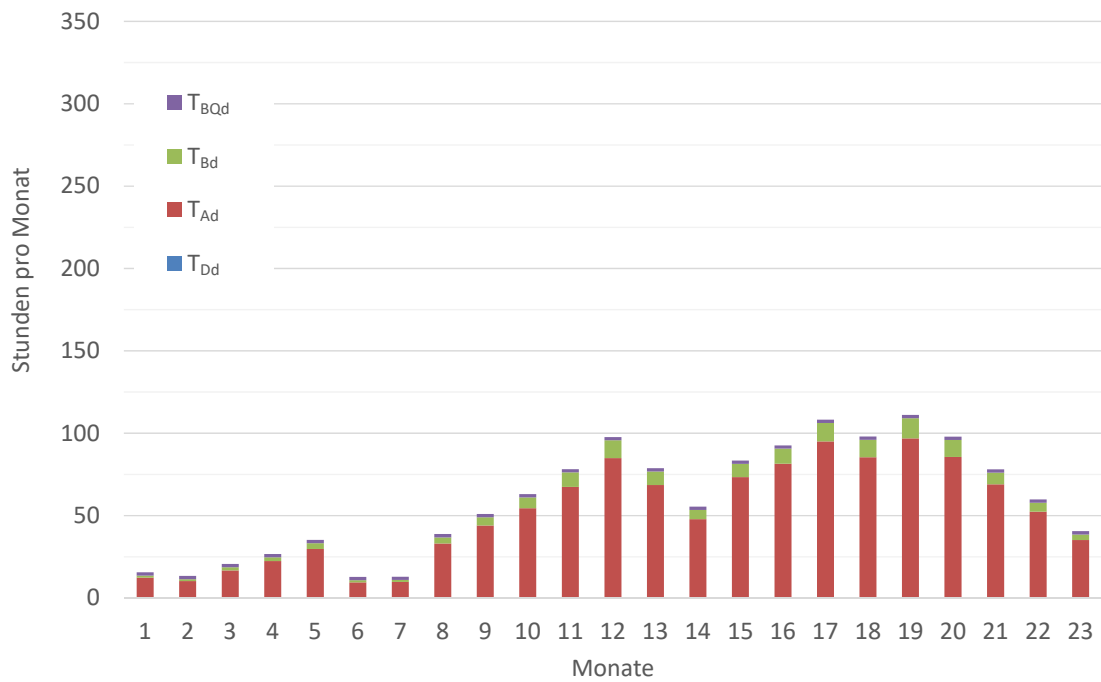
<b>Auswertung</b> $t_A$					
<b>Diagramme</b>					
Datei öffnen /zwischen Einträgen navigieren	5	1 s	308,00	i	
Diagramm kontrollieren	15	8 s	308,00	i	
Diagramm kommentieren	20	15 s	30,80	i.a <sub>kom</sub>	
Abweichungen eruieren	105	77 s	21,56	i.a <sub>er</sub>	
Daten begutachten/Eruierung	15	2 s			
Rücksprache mit Polier/Pumpenfahrer	60	60 s			
Kommentierung/Korrektur	30	15 s			
Datei speichern / freigeben	6	1 s	308,00	i	
<b>Tagesübersicht (Protokolle)</b>					
Datei öffnen	6	0 s	5,00	a	
Protokoll/Einträge kontrollieren	5	0 s	308,00	i	
Einträge korrigieren	16	0 s	21,56	i.a <sub>er</sub>	
Sheets umschalten/Handprotokoll	5	0 s	11,00	p	
Datei speichern	6	0 s	5,00	a	
<b>Prozesszeitauswertung</b>					
Aufbereiten der Daten / Vervollständigung Prozessvorschlag	600	300 s	11,00	p	

<b>Abgabe</b> $t_B$					
<b>PDF</b>					
Files auswählen	1	0,5 s	324,00	i+p+a	
PDF-erstellen	3	1 s	324,00	i+p+a	
Dateien drucken	2	2 s	324,00	i+p+a	
<b>Ablage</b>					
Übersichten archivieren	10	0 s	16,00	a+p	
Diagramme archivieren	2	0 s	308,00	i	
Übersichten versenden/ uploaden	10	0 s	16,00	a+p	
Diagramme versenden/ uploaden	2	0 s	308,00	i	

Abb. E.1: Ansätze der Vergleichsrechnung für die Dokumentations- und Analysezeit



(a) tradiert



(b) eguana SCALES

Abb. E.2: Vergleich der monatlichen Dokumentationszeiten bei der Feldstudie

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die hier vorliegende Forschungsarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, sowie der Literatur wörtlich entnommene Stellen als solche gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

---

Ort, Datum

---

Dipl.Ing. Leopold Winkler, BSc



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Danksagung

Herzlicher Dank gilt:

Meinem Betreuer Prof. Gerald Goger, der nicht nur fachliche Stütze war, sondern auch immer an dieses Projekt geglaubt hat.

Den Gutachtern dieser Dissertation, Prof. Gert Stadler und Prof. Hans Christian Jünger, für ihre Expertise und Zeit während des Beurteilungsprozesses.

Philipp Maroschek und dem Team von eguana für die Organisation des Forschungsprojektes und die erfolgreiche Umsetzung von eguana SCALES.

Sewerin Sabew und der Marti Geotechnik für die tiefen Einblicke in ihre Baustellenprozesse.

Marco Huymajer für die unermüdliche Unterstützung beim Layout mit  $\LaTeX$  und bei der Programmierung der Bauzeitprognose.

Dem lieben Lukas Zuba für das gewissenhaft durchgeführte Lektorat.

Meiner Freundin Catherine für ihre bedingungslose Unterstützung in allen Lebenslagen,  
ihr Vertrauen und ihre liebevolle Zuneigung.

Meiner Familie und meinen Freunden, die für mich da sind.