

Diploma Thesis

# Model-based quantity surveying in infrastructure construction with integration of machine data

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

DIPLOMARBEIT

## Modellbasierte Abrechnung im Verkehrswegebau mit Integration von Maschinendaten

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Artem Igumnov, BSc**  
Matr.Nr.: 01431070

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald Goger**  
Dipl.-Ing. **Andreas Jurecka**  
Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Bettina Chylik, BSc**

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

Wien, im Oktober 2020



---



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meines ganzen Studiums sowie beim Verfassen dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Goger bedanken, der mir das Verfassen dieser Arbeit in meinem gewählten Schwerpunkt am Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement ermöglicht hat. Einen weiteren großen Dank möchte ich an Herrn Dipl.-Ing. Andreas Jurecka Universitätslektor und Universitätsassistentin Frau Dipl.-Ing. Bettina Chylik äußern, die mich während der Bearbeitung der Diplomarbeit fachlich und organisatorisch unterstützt haben und mir von den frühesten Stadien an viel geholfen haben, dieses nicht triviale Thema auf die richtige Weise zu entfalten.

Besonders möchte ich mich bei Herrn Ing. Martin Hörhan sowie meinen anderen ArbeitskollegInnen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Arbeit mit ihrem fachlichen Wissen unterstützt, sowie eine Kooperation seitens des Bauunternehmens zur Erarbeitung dieses Thema ermöglicht haben.

Ein besonders großer Dank geht an meine Eltern sowie die ganze Familie, die mich bereits vor dem Studienanfang für ein Auslandsstudium motiviert und während meines Studiums unterstützt haben. In großer Entfernung von zu Hause ist dies unentbehrlich gewesen. Außerdem möchte ich mich bei meinen Freunden in allen meinen Wohnorten bedanken, die den Alltag während intensiven Lernphasen immer verschönert haben.

Schlussendlich möchte ich mich bei meinen StudienkollegInnen in allen Phasen meines langen Studienweges für ihre Unterstützung bedanken. Dank ihrer Hilfsbereitschaft und einer effizienten Zusammenarbeit konnten alle ab und zu vorkommenden Schwierigkeiten im Studium erfolgreich überwunden werden.



## Kurzfassung

Schlagwörter: Bauabrechnung, Digitalisierung, BIM, Leistungserfassung, Digitales Geländemodell, Baumaschinendaten, Projektanalyse, Verkehrswegebau.

Die vorliegende Diplomarbeit gibt einen Einblick in den Einfluss der Digitalisierung auf einen wesentlichen Bestandteil der Bauausführungsphase im Verkehrswegebau: die Bauabrechnung. Da mittlerweile eine Tendenz zur Personaloptimierung auf der Baustelle zu erkennen ist, kommt es öfters zu erhöhten Herausforderungen für das in der konventionellen Abrechnung eingesetzte Personal. Der tendenziell daraus folgende Qualitätsverlust hat das Potenzial mit den heute verfügbaren Instrumenten der Digitalisierung abgedeckt werden zu können.

Zu Beginn dieser Arbeit werden die Grundlagen des gegenwärtigen Bauabrechnungsablaufs bei Projekten im Verkehrswegebau dargestellt. Für das allgemeine Verständnis werden in erster Linie die wesentlichen Unterschiede zwischen den konventionellen und modellbasierten Abrechnungsmethoden erläutert, auf deren Grundlage die wesentlichen potentiellen Vorteile der modellbasierten Abrechnung erklärt werden.

Im Laufe der Arbeit wird untersucht, wie neue Datenquellen in den modellbasierten Abrechnungsprozess integriert werden können. Auf Basis von aktuellen Pilotprojekten eines international tätigen Baukonzerns werden die derzeitigen Möglichkeiten einer Bestandsmodellierung mit Drohnen und Baumaschinen dargestellt. Es werden sowohl die Vorteile als auch die Nachteile der aktuellen Erfahrung analysiert. Ein besonders großes Nutzungspotential in der modellbasierten Abrechnung stellt die Nutzung von Baumaschinendaten dar, welchen im Rahmen dieser Diplomarbeit besondere Aufmerksamkeit zukommt. Auf Basis der aktuellen Forschung werden verschiedene Anwendungsfälle analysiert und zusammengefasst. Ebenfalls eine wichtige Rolle spielen dabei die GNSS-Kontrollsysteme und Datenplattformen, deren Einsatzmöglichkeiten auf Basis von aktuellen Pilotprojekten im DACH-Raum und Finnland dargestellt werden.

Zur Erhebung der notwendigen Daten wurden sowohl Abrechnungsleitfäden von kooperierenden Bauunternehmen und öffentlichen Auftraggebern als auch das Wissen der Unternehmensexperten erforscht. Ein anderer wichtiger Bestandteil dieser Diplomarbeit ist die Analyse der zukünftigen Rollen der in der Bauabrechnung involvierten Parteien. Innerhalb dieser Arbeit wird versucht den Einfluss der Veränderungen im Abrechnungsablauf auf die Auslastung der Parteien in der Zukunft abzuschätzen und die daraus folgenden Vorteile und Nachteile abzuleiten.



## Abstract

Keywords: construction billing, quantity surveying, digitization, BIM, activity recording, digital terrain model, construction machine data, project analysis, traffic route construction.

This diploma thesis gives an insight into the influence of digitization on an essential part of the construction phase in traffic route construction: quantity surveying for construction billing. Since there is now a tendency to optimize workforce on construction sites, there are increased challenges for the workforce deployed in conventional quantity surveying for billing. The consequent loss of quality has a potential to be covered with the digitalization tools available today.

At the beginning of this work, the basics of the current quantity surveying process for the projects in traffic route construction are presented. For general understanding, the main differences between the conventional and model-based quantity surveying methods are explained, whereby the main potential advantages of model-based quantity surveying in traffic route construction are clarified.

In the course of this diploma thesis, research is carried out into how new data sources can be integrated into the newborn model-based quantity surveying process. Based on current pilot projects by an international construction company, current options for as-built modelling with drones and construction machinery are presented. Both advantages and disadvantages in the current experience are analysed. The construction machine data present a particularly large potential for use in model-based quantity surveying, in the context of this thesis, this data is given special attention. Based on current research, various use cases of the machine data are analysed and summarised. The GNSS control systems and data platforms herewith play not the last role in the process, their possible application is represented based on current pilot projects in DACH countries and Finland.

In order to collect the necessary data, quantity surveying guidelines from the cooperative construction company and the public clients as well as the knowledge of the company experts were analysed. Another important part of this diploma thesis is the analysis of the future roles of all parties involved in quantity surveying. From this analysis, the thesis examines the influence of the changes in construction billing process on the occupancy rate of the parties in the future and emphasizes the resulting advantages.





# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	iii
Kurzfassung .....	v
Abstract .....	vii
Inhaltsverzeichnis .....	ix
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Aufbau der Diplomarbeit.....	1
1.2 Motivation .....	2
1.3 Forschungsmethodik .....	2
1.4 Forschungsabgrenzung.....	3
1.5 Forschungsfragen .....	3
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Begriffsbestimmungen .....	5
2.2 Einführung in die Abrechnung.....	7
2.2.1 Gründe für die Prozessänderung.....	8
2.2.2 Regionale Besonderheiten .....	8
2.2.3 Unterschied der Abrechnung im Hochbau und Verkehrswegebau.....	9
2.2.4 Regelwerke für die Abrechnung .....	9
2.2.5 Arten der Leistungsabrechnung .....	10
2.2.6 Rechnungsarten.....	11
2.2.7 Rechnungselemente.....	12
2.3 Konventionelle Abrechnungsmethoden .....	13
2.3.1 Allgemeine Bearbeitungsschritte .....	13
2.3.2 Erstellung der Abrechnungsgrundlagen .....	16
2.3.3 Mengenermittlung und Erstellung der Aufmaßblätter .....	16
2.4 Building Information Modeling .....	19
2.4.1 Begriffsklärung.....	19
2.4.2 BIM in der Planung und der Ausführung .....	20
2.4.3 BIM-Anwendungsfälle .....	21
2.4.4 Klassifizierung der Einsatzfälle .....	22
2.4.5 Dimensionen.....	24
2.4.6 Projektrollen .....	24
2.4.7 BIM im Verkehrswegebau .....	24
2.5 Technologische Grundlagen .....	25
2.5.1 Bauwerksvermessung.....	25
2.5.2 Digitales Geländemodell.....	30

2.5.3	Baumaschinendaten.....	34
2.5.4	Beteiligte Geräte.....	37
2.6	Konzepte der modellbasierten Abrechnung .....	41
2.6.1	Abrechnung mit Querschnittsflächen und Einflusslängen .....	42
2.6.2	Grundlegende Methode der modellbasierten Abrechnung.....	43
2.6.3	Modellbasierte Abrechnung über Leistungswerte.....	44
3	Modellbasierte Abrechnung mit Drohnen .....	45
3.1	Relevante BIM-Anwendungsfälle .....	45
3.2	Systemaufbau.....	45
3.3	Allgemeine Beschreibung des Abrechnungsprozesses mit Drohnen.....	46
3.4	Erläuterung des Ablaufs anhand des Pilotprojekt A5 Umfahrung Drasenhofen .....	47
3.4.1	Projektvorstellung .....	47
3.4.2	Angebotsphase .....	48
3.4.3	Ausführungsphase.....	48
3.5	Bestandserfassung.....	49
3.6	Abrechnungsmodellerstellung .....	51
3.7	Mengenermittlung .....	52
3.7.1	Varianten der Mengenermittlung .....	53
3.7.2	Mengenermittlung im betrachteten Pilotprojekt .....	53
3.8	Alternativer Ablauf in iTWO 2017 .....	55
3.8.1	Vorbereitung des Projektes in der AVA-Software .....	55
3.8.2	Mengenermittlung in iTWO.....	57
3.9	Erstellung der elektronischen Aufmaßblätter .....	59
3.10	Prozessdiagramm .....	61
3.11	Zusammenfassung.....	63
4	Integration der Maschinendaten in die modellbasierte Abrechnung.....	65
4.1	Grundlegende Ideen und Überlegungen.....	65
4.1.1	Idee 1: Wägesystem .....	66
4.1.2	Idee 2: Querschnittsbruchpunkte.....	66
4.1.3	Idee 3: Raster.....	67
4.2	Relevante BIM-Anwendungsfälle .....	67
4.3	Maschinensteuerungssysteme.....	67
4.3.1	Systemaufbau .....	67
4.3.2	Anwendungskonzept.....	68
4.3.3	Einsatzgebiet .....	69
4.3.4	Zuständigkeiten .....	69

4.3.5	Qualitätssicherung.....	69
4.3.6	Produktanalyse.....	70
4.3.7	Maschinesteuerungssystem Trimble GCS900 und die Begleitkomponenten .....	71
4.3.8	Maschinesteuerungssysteme Leica iCON grade iGD4SP und iCON grade 42 .....	73
4.4	Maschinendaten von Planiertrauen .....	74
4.4.1	Systemaufbau und Funktionsweise.....	75
4.4.2	Einsatzkonzept.....	75
4.4.3	Experimentvorstellung .....	76
4.4.4	Mengenermittlung mit Trimble GCS900 .....	77
4.4.5	Mengenermittlung mit Leica iCON grade 42.....	80
4.4.6	Mengenermittlung Fazit .....	81
4.5	Maschinendaten von Hydraulikbaggern .....	83
4.5.1	Systemaufbau und Funktionsweise.....	83
4.5.2	Einsatzkonzept.....	84
4.5.3	Pilotprojektvorstellung.....	85
4.5.4	Mengenermittlung .....	87
4.5.5	Überlegungen zu alternativen Ablaufmöglichkeiten.....	91
4.6	Prozessdiagramm .....	92
4.7	Rolle der Informationsmanagementsysteme.....	94
4.7.1	Informationsmanagementsystem Infrakit.....	94
4.7.2	Anwendungserfahrung in Finnland .....	94
4.8	Zusammenfassung.....	95
5	Entwicklungsthemen für die modellbasierte Abrechnung.....	99
5.1	Allgemeine Entwicklungsrichtungen .....	99
5.1.1	Iterationsreduktion.....	99
5.1.2	Standardisierung und Automatisierung .....	99
5.1.3	Mehr Leistungen in der Planungsphase .....	100
5.1.4	Kommunikation .....	101
5.1.5	Nachhaltigkeit.....	101
5.2	Tablets als Bestandsdatenerfassungsmittel .....	102
5.2.1	Einsatzpotenzial.....	102
5.2.2	Anwendung .....	102
5.2.3	Zusammenfassung.....	103
6	Forschungsergebnisse .....	105
6.1	Zusammenfassung.....	105
6.2	Beantwortung der Forschungsfragen.....	106

6.2.1	Forschungsfrage 1 .....	106
6.2.2	Forschungsfrage 2 .....	107
6.2.3	Forschungsfrage 3 .....	107
6.2.4	Forschungsfrage 4 .....	108
6.3	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf.....	109
7	Verzeichnisse.....	111
7.1	Abkürzungsverzeichnis .....	111
7.2	Literaturverzeichnis.....	113
7.3	Verzeichnis der sonstigen Abbildungsquellen.....	118
7.4	Abbildungsverzeichnis.....	119
7.5	Tabellenverzeichnis .....	121
8	Anhang.....	123
8.1	Fragebogen Experteninterview .....	123

# 1 Einleitung

Das folgende Kapitel dient der Einführung in die Diplomarbeit “Modellbasierte Abrechnung im Verkehrswegebau mit Integration von Maschinendaten”. Zuerst wird auf den Aufbau der Arbeit eingegangen, sowie die Motivation und das persönliche Interesse am vorliegenden Thema abgebildet. Weiter folgt die Vorstellung der Methodik und der angewendeten Forschungswerkzeuge. Es werden klare Forschungsabgrenzungen gesetzt und die Hauptforschungsfragen dieser Diplomarbeit vorgestellt.

## 1.1 Aufbau der Diplomarbeit

Kapitel 2 dieser Arbeit verschafft einen Überblick über die aktuellen Abrechnungsmethoden im Infrastrukturbau mit Fokus auf den Verkehrswegebau. Nach der Klärung der themenrelevanten Begriffe wird auf die Grundlagen der Abrechnung eingegangen, unter welchen alle bedeutsamen Besonderheiten des Abrechnungsablaufs im Bereich Verkehrswegebau zusammengefasst sind. Um eine Vergleichsbasis für die modellbasierte Abrechnung zu bekommen, werden anschließend aktuelle konventionelle Abrechnungsmethoden vorgestellt. Nach dem Eintauchen in die Grundlagen von Building Information Modeling (BIM), mit welchen die Grundlagen der modellbasierten Abrechnung eng verflochten sind, werden wichtige technologische Grundlagen vorgestellt, welche die Basis der Konzepte der modellbasierten Abrechnung bilden. Abschließend werden die Konzepte der modellbasierten Abrechnung über die Querschnittswerte, Volumenkörper und Leistungswerte dargestellt.

Das dritte Kapitel widmet sich der modellbasierten Abrechnung mit aktivem Einsatz von Drohnen. Nach einer allgemeinen Beschreibung des Ablaufkonzeptes und der wesentlichen Besonderheiten, wird der Ablauf der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen auf Basis eines Projektes des kooperierenden Bauunternehmens im Bereich des Straßenbaus genauer analysiert. Abschließend wird das zukünftige Nutzungspotential für weitere Infrastrukturprojekte ermittelt.

Mit der Analyse der Integration von Baumaschinendaten in die modellbasierte Abrechnung für Projekte im Verkehrswegebau befasst sich das vierte Kapitel. Da es heutzutage in der Praxis noch wenig Erfahrungsberichte zu solchen Implementierungen gibt, ist ein flächendeckender Einsatz dieser Art der modellbasierten Abrechnung noch nicht stattgefunden. Der Akzent in diesem Kapitel wird somit auf die Konzipierung des Datenflusses von einem möglichen System gesetzt. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei der Analyse der marktbeherrschenden Maschinenkontrollsysteme und Kollaborationsplattformen geschenkt.

Das fünfte Kapitel beschäftigt sich mit der Analyse der zukünftigen Rollenverteilung in einem standardisierten Prozess der modellbasierten Abrechnung. Nach einem Überblick über die verschiedenen aktuellen Kommunikationsproblemen zwischen den involvierten Parteien, die zu störenden Missverständnissen und als Folge davon zu Parteienkonflikten führen können, werden die Vorteile der Prozessstandardisierung analysiert und dargestellt. Abschließend wird das Einsatzpotential der neuen Bestandserfassungsmittel wie beispielsweise Tablets und Smartphones für die modellbasierte Abrechnung analysiert.

Zum Ende der Arbeit im sechsten Kapitel werden die aktuellen Forschungsergebnisse zusammengefasst und die gestellten Forschungsfragen beantwortet. Anschließend wird der Forschungsbedarf für weiterführende Themen erläutert, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht tiefer behandelt werden konnten.

## 1.2 Motivation

Heutzutage ist Building Information Modeling (BIM) generell kein Zukunftsthema mehr. Allmählich gewinnt BIM in allen Bereichen der Bauprozesse an Bedeutung. Dabei ist hervorzuheben, dass der Workflow im Planungsprozess bei einigen mittelständischen Planung- und Ingenieurbüros bereits weitgehend digitalisiert ist. Wohingegen BIM in den Ausführungsprozessen noch eher selten zur Anwendung kommt.

Wegen den relativ hohen Investitionskosten gibt es auf dem österreichischen Binnenmarkt noch immer eine Menge ausführende kleine und mittlere Unternehmen (KMU), bei denen der Übergang von konventionellen Abläufen auf BIM-gestützte Abläufe nicht stattgefunden hat. Bei den meisten ausführenden Großunternehmen befindet sich der Einsatz von BIM in einer aktiven Entwicklungsphase. Teilweise ist diese Situation damit verbunden, dass die Prozesse selbst nicht wirklich einfach zu standardisieren sind. Die Bauausführung ist ein komplexer Prozess, welcher wiederum aus vielen autonomen und nichttrivialen Prozessen besteht. Einer davon ist die Bauabrechnung, weshalb sich diese Diplomarbeit der Digitalisierung dieses Prozesses im Bereich des Verkehrswegebau widmet.

Der Bereich des Verkehrswegebau stellt ein besonderes Interesse von der Seite der wirtschaftlichen Motive dar, da es in diesem Bereich bei den besonders großen Baulosen um riesige Erd- und Materialmengen geht, was im Falle einer erfolgreichen Prozessoptimierung zu bedeutsamen Ersparnissen führen kann. Somit ist es von besonderem Interesse, wie die modellbasierte Abrechnung bei solchen großzügigen Projekten erfolgreich eingesetzt und dementsprechend alle bedeutenden Abläufe optimieren kann. In weiterer Folge ist es außerdem bedeutend wie diese Abläufe für die zukünftigen Projekte im Bereich Verkehrswegebau standardisiert werden können.

## 1.3 Forschungsmethodik

Die vorliegende Diplomarbeit basiert auf einer umfassenden Literaturrecherche. Vor allem wurden zahlreiche Bücher zu den Themen "Building Information Modeling" und "Abrechnung" untersucht, worauf eine intensive Recherche der zu den Themen relevanten wissenschaftlichen Artikel in verschiedenen Sprachen folgte. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Basiswissensstandes für diese Arbeit sind die Besprechungen mit den in der Thematik erfahrenen Arbeitskollegen<sup>1</sup> sowie eine intensive Analyse der Dokumentation von den aktuellen und abgeschlossenen themenrelevanten Infrastrukturprojekten.

---

<sup>1</sup> Der Autor legt großen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wurde jedoch oftmals entweder die maskuline oder feminine Form gewählt. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des jeweils anderen Geschlechts.

## 1.4 Forschungsabgrenzung

Nach der Erhebung des aktuellen Forschungsbedarfes wurden die Forschungsfragen definiert. Zur Beantwortung der festgelegten Fragen wurden die erforderlichen Grundlagen ausgearbeitet. Nach einer kurzen Analyse der aktuellen Probleme in der herkömmlichen Abrechnung, wurde analysiert wie diese im Verkehrswegebau mit dem Einsatz einer modellbasierten Abrechnung minimiert und wie die beschriebenen Prozesse in Zukunft standardisiert werden könnten. In diesem Fall wurde hauptsächlich die angewandte Forschung eingesetzt.

Die in dieser Arbeit angewandten Werkzeuge sind somit eine weitgehende Literaturrecherche, Analyse von abgeschlossenen und laufenden Projekten, Untersuchung von relevanten Arbeitsanleitungen und Normen sowie die Experteninterviews.

## 1.4 Forschungsabgrenzung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit der Prozessbeschreibung und –Analyse sowohl existierender und in der Baupraxis getesteter Methoden der modellbasierten Abrechnung, als auch jenen Methoden, die laut Meinung der befragten Experten in naher Zukunft ein hohes Einsatzpotential haben. Die in dieser Arbeit beschriebenen Prozesse beziehen sich hauptsächlich auf die Phase der Bauausführung. Prozesse, welche in den vorangehenden Projektphasen stattfinden, wie zum Beispiel die LV-Erstellung, sind nicht Teil dieser Arbeit. Wegen den wesentlichen Verfahrensunterschieden zwischen dem Hochbau und dem Verkehrswegebau, ist der Anwendungsbereich der beschriebenen Methoden der modellbasierten Abrechnung nur auf den Verkehrswegebau beschränkt.

## 1.5 Forschungsfragen

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit der Frage, mit welchen Methoden und Werkzeugen die modellbasierte Abrechnung im Verkehrswegebau am effizientesten durchgeführt werden kann und wie diese Prozesse standardisiert werden können. Eine Gegenüberstellung der in dieser Arbeit beschriebenen modellbasierten Abrechnungsmethoden wird sowohl die Vorteile der einzelnen Methoden demonstrieren, als auch die mögliche Umsetzung der Standardisierung visualisieren.

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Forschungsfragen behandelt:

### Forschungsfrage 1:

Gibt es einen Unterschied zwischen der modellbasierten und konventionellen Abrechnung bezüglich dem Aufwand und der Genauigkeit der Ergebnisse? Welcher Mehrwert entsteht für die Projektbeteiligten, wenn sie sich für die modellbasierte Abrechnung im Zuge eines Verkehrswegebauprojektes entscheiden?

Forschungsfrage 2:

Welches Potential bietet die modellbasierte Abrechnung mit Integration von Drohnen- und digitalen Vermessungsdaten im Verkehrswegebau?

Forschungsfrage 3:

Welches Potential besitzt die Integration von Maschinendaten in die modellbasierte Abrechnung von Verkehrswegebauprojekten? Welche Maschinendaten können für die modellbasierte Abrechnung herangezogen werden?

Forschungsfrage 4:

Welchen Einfluss wird ein flächendeckender Einsatz der modellbasierten Abrechnung im Verkehrswegebau auf die Verteilung der Aufgaben und Tätigkeiten zwischen den im Prozess involvierten Personen haben?



# 2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen der Abrechnung und Building Information Modeling sowie auf die Technologien eingegangen, welche für die Durchführung des Konzeptes der modellbasierten Abrechnung notwendig sind. Unter Berücksichtigung der wichtigsten themenrelevanten Begriffe wird auf die Thematik der Abrechnung näher eingegangen, um die Rolle dieses Prozesses in der Ausführungsphase zu bestimmen sowie die Besonderheiten aufzuklären. Um eine Vergleichsbasis zu schaffen, werden die Grundlagen der konventionellen Abrechnung und der modellbasierten Abrechnung dargestellt.

## 2.1 Begriffsbestimmungen

**Abrechnung:** „Die gemeinsam von Auftraggeber und Auftragnehmer vorzunehmende Feststellung der Rechnungssumme für eine Bauleistung.“ [56, S. 4]

**Abrechnungszeitraum (AZ):** „Zeitraum, den die Abschlags-/Teil-Rechnung umfasst.“ [12, S. 6]

**Attribut:** „Alphanumerisches Element, bestehend aus einer immer gleich bleibenden Bezeichnung und variablem Inhalt. Z.B. Attribut „Fläche“ mit variablem Flächeninhalt.“ [46, S. 6]

**Aufmaß:** „Das Vermessen von Bauteilen, es dient im Einheitspreisvertrag der Feststellung der tatsächlich ausgeführten Leistungsmengen vor Ort(...). Es ist eine der Grundlagen der Bauabrechnung und dient zudem der Erstellung von Bestandsunterlagen.“ [56, S. 18]

**Auftraggeber (AG):** „Jede natürliche oder juristische Person, die vertraglich an einen Auftragnehmer einen Auftrag zur Erbringung von Leistungen gegen Entgelt erteilt oder zu erteilen beabsichtigt.“ [44, S. 4]

**Auftragnehmer (AN):** „Jeder Unternehmer, mit dem vertraglich vereinbart wird, dem AG eine Leistung gegen Entgelt zu erbringen.“ [44, S. 4]

**Basisplan:** „Bezugsbasis für die Überwachung und das Controlling der Leistungserbringung im Projekt.“ [50, S. 6]

**Bestandsmodell:** „Bauwerksmodell, das den Ist-Zustand eines Bauwerks bis zum gewählten Fertigstellungsgrad abbildet. Im Straßenbau gibt das Bestandsmodell den Istzustand der Bebauung, bereits vorhandener Verkehrswege und Leitungen, die Bebauung mit Gebäuden, sowie die sonstigen Flächennutzungen oder die natürlichen Bedingungen, wie z. B. Wasserläufe, Topographie, vor Errichtung einer geplanten Straße wieder.“ [8, S. 3]

**BIM Abwicklungsplan (BIM Execution Plan, BAP/BEP):** „Die Summe aller Vorgaben zu allen BIM-bezogenen Inhalten, Strukturen, Prozessen und Rollen verstanden, die in einem Projekt zu Beginn für alle Beteiligten festgelegt werden.“ [6]

**Building Information Modeling (auch Gebäudedatenmodellierung):** „Die optimierte Planung und Ausführung von Gebäuden mit Hilfe entsprechender Software. BIM ist ein intelligentes digitales Gebäudemodell, das es allen Projektbeteiligten - vom Architekten und Bauherrn über den

Haustechniker bis hin zum Facility Manager - ermöglicht, gemeinsam an diesem integralen Modell zu arbeiten und dieses zu realisieren.“ [2]

**Building Information Modeling Level 2 (BIM Level 2):** „Methode zum Erstellen, Vorhalten und Vernetzen eines gewerkübergreifenden (integralen) virtuellen CAD-Modells, beginnend mit der ersten Gebäudeskizze, endend mit dem Abbruch des Bauwerks.“ [46, S. 6]

**Building Information Modeling Level 3 (BIM Level 3, iBIM):** „Vollständig integraler, gemeinschaftlicher Prozess der Modellierung eines virtuellen Gebäudemodells in Übereinstimmung mit der Ausführung für die Datenpflege über den gesamten Lebenszyklus, in einem gemeinsamen, zentralen Datenmodell unter Einarbeitung von Sachdaten für weiterführende Informationen, die als zusätzliche Dimensionen beschrieben werden.“ [46, S. 6]

**Computer Aided Design (CAD):** „Computer unterstütztes Zeichnen von Konstruktionsunterlagen für bauliche, mechanische, elektrische oder elektronische Erzeugnisse mit Hilfe von spezieller Software.“ [46, S. 6]

**Controlling:** „Vergleich der tatsächlichen mit den geplanten Daten, bei dem Abweichungen analysiert und gegebenenfalls geeignete Korrekturmaßnahmen und Vorbeugungsmaßnahmen ergriffen werden.“ [50, S. 6]

**Industry Foundation Classes (IFC):** „Offener Standard im Bauwesen zur Beschreibung und zum Austausch von digitalen Gebäudemodellen.“ [47, S. 4]

**Leistungsabweichung:** „Veränderung des Leistungsumfangs entweder durch eine Leistungsänderung oder durch eine Störung der Leistungserbringung.“ [48, S. 9]

**Leistungsumfang (Bau-Soll):** „Alle Leistungen des Auftragnehmers (AN), die durch den Vertrag, z. B. bestehend aus Leistungsverzeichnis, Plänen, Baubeschreibung, technischen und rechtlichen Vertragsbestimmungen, unter den daraus abzuleitenden, objektiv zu erwartenden Umständen der Leistungserbringung, festgelegt werden.“ [48, S. 9]

**Leistungsverzeichnis (LV):** „In Positionen gegliederte Beschreibung der Leistungen für ein bestimmtes Vorhaben, gegebenenfalls einschließlich sonstiger Bestimmungen.“ [44, S. 4]

**Leistungszeitraum (LZ):** „Zeitraum, in dem die Leistung erbracht wurde. Ein Leistungszeitraum endet jeweils mit dem letzten jedes Kalendermonates.“ [12, S. 6]

**Mehr- oder Minderkostenforderung (MKF); Zusatzangebot:** „Forderung eines Vertragspartners auf terminliche und/oder preisliche Anpassung des Vertrags.“ [48, S. 9]

**Mengenermittlung:** „Engl. Quantity Take-Off (QTO). Auch Massenermittlung. Die Bestimmung bzw. Berechnung der Mengen von auszuführenden Bauleistungen, meist gemäß bestimmter Normen.“ [9, S. 583]

**Merkmal:** „Alphanumerisches Element, bestehend aus einer immer gleichbleibenden Bezeichnung und variablem Inhalt im BIM-Level 3 Umfeld.“ [47, S. 5]

**Preisperiode (PP):** „Zeitraum mit gleich bleibenden Preisen.“ [12, S. 6]

## 2.2 Einführung in die Abrechnung

**Regieleistungen:** „Leistungen, die nach tatsächlichem Aufwand abgerechnet werden. Beispiele sind eine Leistungsstunde oder Materialeinheit. Regieleistungen werden eingeteilt in angehängte Regieleistungen und selbständige Regieleistungen.“ [48, S. 9]

**3D-Punktwolke:** „Durch beispielsweise Laserscanning oder Photogrammetrie erzeugte Menge von dreidimensionalen Punkten in unorganisierter räumlicher Struktur.“ [9, S. 583]

## 2.2 Einführung in die Abrechnung

Die Abrechnung ist einer der wichtigsten Prozesse in der Ausführungsphase. Gemäß Schneider / Wormuth [56] ist es die Feststellung der Rechnungssumme für eine Bauleistung, die gemeinsam von Auftragnehmer und Auftraggeber vorgenommen wird. Laut der Betriebswirtschaftslehre sind die Grundziele jedes Unternehmens die Gewinnmaximierung und Liquiditätssicherung. Im Fall eines Bauunternehmens hat der Abrechnungsprozess einen direkten Einfluss auf die beiden Grundziele. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die Abrechnung fehlerfrei und mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt wird. Nach einem historischen Rückblick und einer kurzen Vorstellung der aktuellen Situation des Abrechnungsablaufs, werden in diesem Unterkapitel wichtige regionale prozessbezogene Unterschiede erläutert, sowie bedeutsame Besonderheiten des Abrechnungsprozesses im Bereich des Verkehrswegebbaus zusammengefasst. Um diese Besonderheiten aufzuklären, wird auf die relevanten Regelwerke, Rechnungsarten und verschiedene Abrechnungsarten eingegangen. Die Position der Abrechnung in den AVA-Prozessen (Ausschreibung – Vergabe – Abrechnung) ist in Abbildung 2-1 sichtbar.

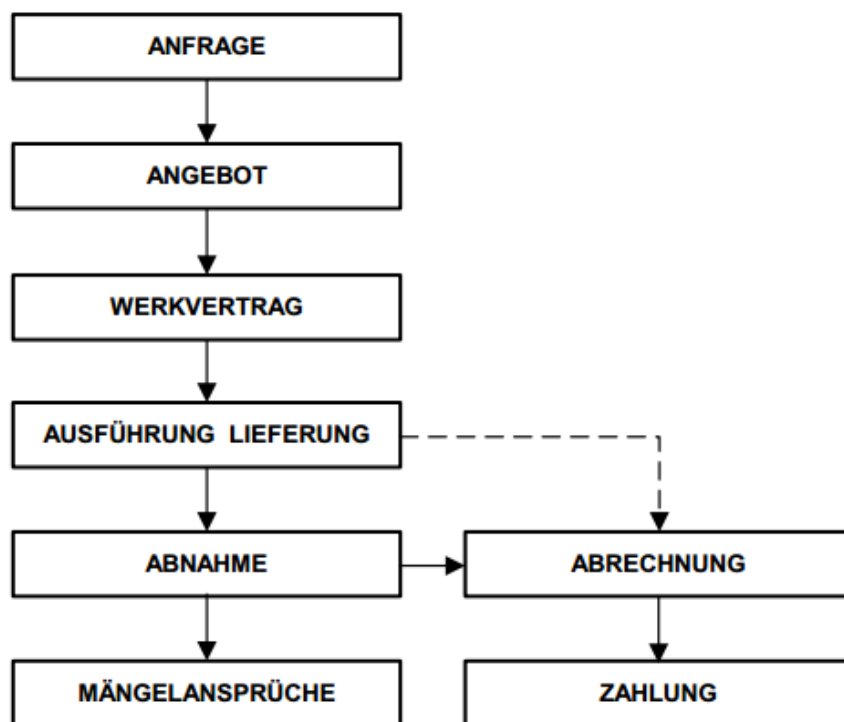


Abbildung 2-1: Position der Abrechnung im AVA-Bereich [55]

### 2.2.1 Gründe für die Prozessänderung

Die Abrechnungsprozesse auf Baustellen in Österreich waren laut der befragten Experten nicht immer so, wie sie heute beobachtet werden können. Früher hat die Situation so ausgesehen, dass die meisten Techniker, die in die baustellenbezogenen Prozesse involviert wurden, keinen akademischen Hintergrund hatten. Der typische Berufsweg eines Abrechnungstechnikers kann auf folgende Weise beschrieben werden: nach dem Abschluss einer HTL-Ausbildung bekam ein neugebackener Techniker die Aufgabe der Erstellung von Feldaufmaßen. In weiterer Folge fand eine Beförderung in den Bereich der Abrechnung statt. Somit konnte sich der Techniker mit seiner bereits erworbenen Erfahrung gut in den LV-Positionen aus. Nach der Expertenmeinung hat der Prozess auf diese Weise gut funktioniert. Nach einer mehrjährigen Erfahrung in der Abrechnung konnte der Techniker weiter zum Bauleiter befördert werden. Dadurch erhielt der Bauleiter sein fundamementiertes Wissen von den Leistungsverzeichnissen, den dazugehörigen Arbeitsschritten sowie dem Nachtragswesen.

Die gegenwärtige Situation unterscheidet sich vor allem dadurch, dass es auf der Baustelle heutzutage mehr Techniker mit akademischem Hintergrund gibt. Es ist kaum vorstellbar, dass sich ein Absolvent einer technischen Universität gleich nach dem Studienabschluss ausschließlich mit Feldaufmaßen beschäftigt. Somit wird die Abrechnung heutzutage öfters nicht von speziell ausgebildetem Personal durchgeführt, sondern von Hochschulabsolventen neben anderen Tätigkeiten mitgemacht, die oft keine praktische Erfahrung mit der Durchführung der Feldaufmaße haben. Ein weiteres Problem ist eine flächendeckende Prozessoptimierung in der Baubranche, die mithin das Baustellenpersonal betrifft. Unter Optimierung wird vor allem die Neuverteilung der Aufgaben verstanden, wobei zunehmend mehr Arbeitsaufgaben mit weniger Personal bewältigt werden müssen. Daraus folgende Konsequenzen sind Personalüberlastung und Qualitätsverlust. Eine potentielle Lösung von diesen Problemen ist die Digitalisierung, welche in diesem Fall einen Übergang von einer konventionellen zu der modellbasierten Abrechnung darstellt.

### 2.2.2 Regionale Besonderheiten

Der DACH-Raum (Deutschland, Österreich und die Schweiz) unterscheidet sich von der englischsprachigen Welt durch eine spätere Spezialisierung der Abrechnungstechniker oder Abrechner in der Ausbildung. An den Universitäten wird keine regelrechte Ausbildung zum Abrechnungstechniker angeboten, jedoch nach einem allgemeinen Bauingenieurwesen-Studium werden diverse Weiterbildungen angeboten, wobei bereits gesammelte Erfahrung im Bauwesen ist für solche Art der Weiterbildung in der Regel notwendig. Der Abrechner im DACH-Raum unterstützt hauptsächlich die Bauleitung, sein Aufgabenbereich erstreckt sich auf die Erfassung von Maßen und Materialmengen, Prüfung des Leistungskatalogs während der Vorbereitungsphase, Kontrolle der bautechnologischen Abläufe, Abrechnung selbst, Nachkalkulation sowie die Projektdokumentation. [21]

In englischsprachigen Ländern wird die Abrechnungstätigkeit von Spezialisten durchgeführt, welche als Quantity Surveyors (QS) bekannt sind. Die Bezeichnung stammt von dem Begriff „Bill of Quantities“ (BOQ), welcher im DACH-Raum dem Leistungsverzeichnis (LV) entspricht. Das Aufga-

## 2.2 Einführung in die Abrechnung

benspektrum eines Quantity Surveyors ist breiter als jenes eines Abrechners im DACH-Raum. Außer den allgemeinen abrechnungsbezogenen Tätigkeiten übernimmt er viele Aufgaben, die in deutschsprachigem Raum von Kalkulanten und anderen Spezialisten in früheren Projektphasen ausgeführt werden, wie zum Beispiel Kostenplanung, Vorkalkulation, Wertmanagement, Erstellung von dem Leistungsverzeichnis sowie allgemeine Angebotsbearbeitung. Auf der Baustelle ist ein Quantity Surveyor die zweitwichtigste Person nach dem Projektleiter. Zu seinen Aufgaben in der Ausführungsphase zählen unter anderem die Mengenberechnung der von dem AN ausgeführten Arbeiten, Vereinbarung mit dem AN der monatlichen Bewertungen sowie der endgültigen Abrechnung. Gegenüber dem Kunden hat der QS eine separate Verantwortung für die Berichterstattung über die finanziellen Gesamtaspekte von dem Projekt, die anderenfalls über den Projektmanager erfolgt. [1] [24] Außer den Kompetenzen von den Spezialisten unterscheidet sich das Ausbildungssystem. Die Quantity Surveyors absolvieren an den Universitäten statt allgemeinem Bauingenieurstudium einen abgesonderten Studiengang. Nach einer gewissen Erfahrung können die QS zertifiziert werden, zum Beispiel in Australien können die Spezialisten für die Mitgliedschaft bei AIQS (Australian Institute of Quantity Surveyors) qualifiziert werden. [1]

Einen wesentlichen Einfluss auf die regionale Spezifik der Abrechnungsarbeiten hat laut den Experten des kooperierenden Unternehmens die Qualität der Planungsunterlagen. Erfahrungsgemäß ist sie in skandinavischem Raum auf einem höheren Niveau als im DACH-Gebiet, aus diesem Grund kommen die Konfliktsituationen zwischen den Beteiligten in der Abrechnungsphase seltener vor, daher erfolgt die Abrechnungstätigkeit in einer freundlichen und respektvollen Umgebung, was die Qualität der Arbeiten selbst positiv beeinflusst.

### 2.2.3 Unterschied der Abrechnung im Hochbau und Verkehrswegebau

Aufgrund der in der Regel komplizierten Oberflächengeometrie entstehen bei der Abrechnung von Erdbauleistungen im Bereich des Verkehrswegebbaus wesentlich häufiger Probleme als bei der Abrechnung von Roh- und Ausbauarbeiten im Bereich des Hochbaus. Zur gleichen Zeit ist die Gefahr wichtige Einzelheiten zu übersehen größer, da die Leistungsverzeichnisse für die Verkehrswegebauprojekte erfahrungsgemäß aus einer größeren Anzahl an Positionen bestehen. Das Bestehen dieser Unterschiede ist der Grund, warum diese Diplomarbeit hauptsächlich dem Bereich Verkehrswegebau gewidmet wird, und nicht einer universalen modellbasierten Abrechnung für verschiedene Bauprojekttypen. [24]

### 2.2.4 Regelwerke für die Abrechnung

Die Grundlagen zur Abrechnung und Rechnungskontrolle sind in Österreich in der ÖNORM B 2110: Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen – Werkvertragsnormen [48] festgelegt. Bauverträge können jedoch von den Bestimmungen dieser Norm abweichen. Insbesondere werden die Abweichungen im Bereich der Abrechnung spürbar, somit sind die individualvertraglichen Regelungen zu beachten. Infolge eigener Bauverträge der Bauherren kommt es in einigen Fällen zu Missverständnissen zwischen den Beteiligten bei der Abrechnung. [23]

Die **ÖNORM B 2110** „Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen – Werkvertragsnorm“ [48] enthält allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen zu abrechnungsrelevanten

Themen wie Rechnungslegung, Zahlung, Sicherstellungen sowie Mengenermittlung, welche in den nächsten Unterkapiteln ausführlicher erläutert werden.

Die **ÖNORM B 2118** „Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen unter Anwendung des Partnerschaftsmodells, insbesondere bei Großprojekten – Werkvertragsnorm“ [49] enthält allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen unter Anwendung des Partnerschaftsmodells. Diese Norm ist vor allem für Großprojekte und komplexe Bauvorhaben vorgesehen, daher ist sie für den Bereich Verkehrswegebau von besonderer Relevanz.

Eine andere relevante Norm ist die **ÖNORM A 2063** „Austausch von Leistungsbeschreibungs-, Elementkatalogs-, Ausschreibungs-, Angebots-, Auftrags- und Abrechnungsdaten in elektronischer Form“ [45]. „Diese ÖNORM regelt den Aufbau von Datenbeständen, die automationsunterstützt in den Phasen Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung (AVA) zwischen allen Beteiligten, wie LB-Herausgeber, EK-Herausgeber, Planer, Auftraggeber, Bieter oder Auftragnehmer, ausgetauscht werden.“ [45, s. 4] Im Rahmen dieser ÖNORM werden die Leistungsbeschreibung (LB), der Elementkatalog (EK), das Leistungsverzeichnis (LV) und die Abrechnung näher erläutert. Von besonderer Relevanz für diese Diplomarbeit sind Kapitel 7, welches den Datenaustausch von Abrechnungsdaten beschreibt, und Kapitel 8, in welchem die Grundzüge der elektronischen Mengenermittlung erläutert werden.

Die **Werkvertragsnormen der Serien B 22xx und H 22xx** sind ebenfalls für die Abrechnungsprozesse relevant. Laut ÖNORM B 2110 [48] gelten für einzelne Sachgebiete mit der Vereinbarung dieser Norm alle ÖNORMEN mit vornormierten Vertragsinhalten, zu denen die Werkvertragsnormen der Serien B 22xx und H 22xx zählen, wenn die Leistungen oder einzelne Positionen dieser Leistungen diese Sachgebiete betreffen. Diese Vertragsnormen enthalten die Bestimmungen über Ausmaß und Abrechnung für jeweilige involvierte Gewerke. [48]

### 2.2.5 Arten der Leistungsabrechnung

Gemäß ÖNORM B 2110 gibt es drei Arten der Leistungsabrechnung:

- Abrechnung der Leistung nach Einheitspreisen  
Erfolgt nach den tatsächlichen Mengen der erbrachten Leistung. Die erste Grundlage für diese Abrechnungsform ist das Leistungsverzeichnis, welches seinerseits auf einer standardisierten Leistungsbeschreibung basiert. Eine weitere Grundlage bilden die Vertragsbestimmungen. Der AN ermittelt die Massen für die einzelnen Positionen und dokumentiert diese in einem Aufmaßprotokoll. Im Folgenden werden die ermittelten Mengen mit dem Einheitspreis multipliziert wodurch man den Preis pro Position erhält. Werden diese zusammenaddiert spricht man vom Gesamtabrechnungspreis. [23]
- Abrechnung der Leistung nach Pauschalpreisen bei einem Detail-Pauschalpreisvertrag oder einem Global-Pauschalpreisvertrag  
In diesen Fällen erfolgt die Abrechnung mittels einer Pauschale. Die Zahlungen (Teilrechnungen) erfolgen entweder nach einem vorab definierten Zahlungsplan oder in Abhängigkeit vom Grad der Leistungserbringung. Der AN darf kein höheres Entgelt fordern, solange

## 2.2 Einführung in die Abrechnung

die im Vertrag vereinbarten Grundlagen der Leistungserbringung sich nicht verändert haben. [23]

- Abrechnung der Leistung nach Regiepreisen

In diesem Fall werden die erbrachten Leistungen nach dem tatsächlichen Aufwand abgerechnet. Die Regieleistungen werden laut ÖNORM B 2110 [48, S. 31] „nach der anerkannten Art und dem anerkannten Ausmaß“ abgerechnet, zum Beispiel nach Arbeitsstunden für Lohn- und Gehaltsempfänger oder nach Material.

Zu Pauschalpreisen sollte laut ÖNORM A 2050 [44] nur in den Fällen ausgeschrieben werden, wenn Art, Güte und Umfang einer Leistung sowie die Umstände, unter denen diese Leistungen zu erbringen sind, zum Zeitpunkt der Ausschreibung hinreichend genau bekannt sind und mit einer Änderung während der Ausführung nicht zu rechnen ist. Somit wird die Abrechnung erfahrungsgemäß in den meisten Fällen nach Einheitspreisen durchgeführt. Die im Rahmen dieser Arbeit analysierten Beispiele beziehen sich hauptsächlich auf die Abrechnung der Leistungen nach Einheitspreisen.

### 2.2.6 Rechnungsarten

Je nach Umfang eines Projektes gibt es verschiedene Arten von Rechnungen, die der Auftragnehmer gemäß Vertrag dem Auftraggeber im Regelfall nach der Leistungserbringung stellt.

Grundsätzlich sind alle Rechnungen gemäß ÖNORM B 2110 [48] so zu erstellen, dass sie mit einem zumutbaren Aufwand geprüft werden können. Wichtig dabei ist die Namen und Anschriften der AG und AN anzugeben, den Zeitraum über den sich die Erbringung der Leistungen erstreckt, die Auflistung der Leistungen in richtiger Reihenfolge aus dem LV (ausgenommen bei Pauschalabrechnungen) und die zur Prüfung notwendigen Unterlagen beizulegen.

#### *Abschlagsrechnung*

Bei jenen Bauvorhaben, deren Fertigung sich auf eine lange Zeitperiode erstreckt, kann der Auftragnehmer bereits während der Ausführung entsprechend den erbrachten Leistungen eine Abschlagsrechnung legen. Die Periodizität dieser Rechnungen kann vom AG vertraglich festgelegt werden. Es muss jedoch mindestens ein Zeitabstand von einem Monat zwischen zwei aufeinanderfolgenden Rechnungen eingehalten werden. [48] [52] Jede Abschlagsrechnung muss laut ÖNORM B 2110 [48, S. 33] folgende Angaben enthalten:

- 1) *die gesamten seit Beginn der Ausführung erbrachten Leistungen im zumindest annähernd ermittelten Ausmaß,*
- 2) *die Art und Menge der allenfalls bereits in das Eigentum des AG übertragenen Materialien u. dgl.,*
- 3) *die vereinbarten Preise der Leistungen,*
- 4) *allfällige Preisumrechnungen, aufgegliedert nach den einzelnen Preisanteilen und den jeweiligen Preisperioden,*
- 5) *die Beträge der verlangten, jedoch noch nicht erhaltenen Abschlagszahlungen und der bereits erhaltenen Abschlagszahlungen, und*
- 6) *den abzurechnenden Deckungsrücklass.*

Wichtig dabei ist eine fortlaufende Nummerierung. Wenn ein Zahlungsplan vereinbart wurde, kann gemäß Heck/Müller [23] der Abschlagsrechnungsablauf folgendermaßen aussehen:

1. 30% des Gesamtpreises bei Austragserteilung
2. 30% bei Beginn der Leistungserbringung
3. 30% bei der Schlussrechnung
4. 10% nach Abnahme

#### **Teilschlussrechnung**

Die ÖNORM B 2110 [48, S. 34] definiert: „Über vereinbarte Teilleistungen können Teilschlussrechnungen gelegt werden. Sie sind wie Schlussrechnungen zu behandeln.“ Die Teilschlussrechnungen können beispielweise bei Projekten mit mehreren Bauphasen eingesetzt werden, wobei nach dem Abschluss der jeweiligen Bauphase eine Teilschlussrechnung vom AN an den AG gestellt wird. [23]

#### **Schlussrechnung**

„Die Gesamtleistung ist in der Schlussrechnung, die als solche zu bezeichnen ist, abzurechnen. Etwaige Abschlagsrechnungen und -zahlungen sowie Haftungsrücklass, Vertragsstrafe, Prämie u. dgl. sind anzuführen.“ – ÖNORM B 2110 [48, S. 34]

Nachdem die Leistungen in vollem Maß vom AN ausgeführt sind, ist dem AG eine Schlussrechnung zu legen. Die Schlussrechnungen sind spätestens zwei Monate nach der Leistungserbringung vorzulegen, sofern vertraglich keine anderen Bedingungen vereinbart wurden. Die Abschlagsrechnungen, Haftungsrücklass, Vertragsstrafen usw. müssen ausgewiesen und abgezogen werden. Der Deckungsrücklass wird entweder mit der Schlussrechnung freigegeben oder auf einen Haftungsrücklass angerechnet. [23] [48]

#### **Regierechnung**

Laut ÖNORM B 2110 [48] müssen die Regieleistungen monatlich abgerechnet werden. Die Abrechnung der Regieleistungen basiert auf den Regieberichten in welchen die erbrachten Leistungen und die verwendeten Materialien dokumentiert sind. [48] [52]

### **2.2.7 Rechnungselemente**

In diesem Unterkapitel werden einige Rechnungselemente beschrieben, die für die Rechnungslegung von besonderer Relevanz sind.

#### **Deckungsrücklass**

Der Deckungsrücklass dient dem Auftraggeber als Sicherstellung gegen eine mögliche Überzahlung des Auftragnehmers, da laut ÖNORM B 2110 die Abrechnungsmengen in den Abschlagsrechnungen nur annähernd ermittelt werden müssen. Der Deckungsrücklass wird in den Abschlagsrechnungen in der Höhe von 5 % des Rechnungsbetrages einbehalten, wenn er nicht vom AN



## 2.3 Konventionelle Abrechnungsmethoden

durch ein Sicherstellungsmittel abgelöst ist. Mit der Teilschluss- oder Schlussrechnung wird der Deckungsrücklass freigegeben oder auf einen Haftungsrücklass aufgerechnet. [23] [48]

### *Haftungsrücklass*

Der Haftungsrücklass dient dem Auftraggeber als Sicherstellung, dass der Auftragnehmer seine Pflichten aus dem Titel der Gewährleistung erfüllt. Laut ÖNORM B 2110 wird er von der Summe der Teilschluss- und Schlussrechnung abgezogen und beträgt 2 %. Wird der Haftungsrücklass nicht in Anspruch genommen, muss dieser spätestens 30 Tage nach Ablauf der Gewährleistungsfrist freigegeben werden, soweit dieser nicht durch Sicherstellungsmittel abgelöst ist. [23] [48]

### *Sicherstellungsmittel*

Gemäß ÖNORM B 2110 [48] werden hauptsächlich zwei Arten von Sicherstellungsmitteln unterschieden: bare Sicherstellungsmittel wie Bargeld ohne Verzinsung oder Sparbücher und unbare Sicherstellungsmittel wie Bankgarantien oder Versicherungen.

### *Skonto*

Wenn die aufgeforderte Zahlung innerhalb einer vereinbarten Frist erfolgt, kann der Auftraggeber mit einem Abschlag vom Preis rechnen, welcher als Skonto bezeichnet wird. Zum Beispiel kann vertraglich vereinbart werden, dass bei einer Zahlung innerhalb von 15 Tagen ab dem Rechnungsdatum ein Skonto von -2% gewährt wird. Wenn demzufolge die Zahlung innerhalb von 30 Tagen ab Rechnungsdatum ankommt, wird kein Skonto gewährt. Würde die Zahlung allerdings innerhalb von 10 Tagen erfolgen, könnte der AG mit einem Abschlag von 2% rechnen. [23]

## 2.3 Konventionelle Abrechnungsmethoden

Um eine Vergleichsbasis für die modellbasierte Abrechnung zu bekommen, muss die konventionelle Abrechnung genauer betrachtet werden. Dieses Unterkapitel verschafft einen Überblick über die aktuellen konventionellen Abrechnungsmethoden im Bereich des Verkehrswegebau.

### 2.3.1 Allgemeine Bearbeitungsschritte

Die konventionelle Abrechnung besteht generell aus mehreren Schritten, die in Abbildung 2-2 sichtbar sind. Nach einer fertiggestellten Bauleistung werden die Abrechnungsgrundlagen in Zusammenarbeit von AG und AN vorbereitet (in Abbildung 2-2 als Aufmaß AN + AG bezeichnet), welche als Basis für die Mengenermittlung dienen. Nach einer fachtechnischen Prüfung der Mengen seitens AG, werden vom AN auf der Grundlage der fertiggestellten Aufmaßblätter die Kosten ermittelt, welche in die Rechnung aufgenommen werden. Nach einer rechnerischen Prüfung der Kosten und einer allgemeinen Prüfung und Feststellung der Rechnung seitens AG, wird die Zahlung an den Auftraggeber geleistet. Unter der Feststellung der Rechnung wird die Bescheinigung verstanden, dass die Abrechnung rechnerisch und fachtechnisch in Ordnung ist sowie sich in Übereinstimmung mit den vertraglichen Bedingungen befindet. [55] Nach der Prüfung der Zahlung seitens AN ist der Prozess der Abrechnung abgeschlossen.

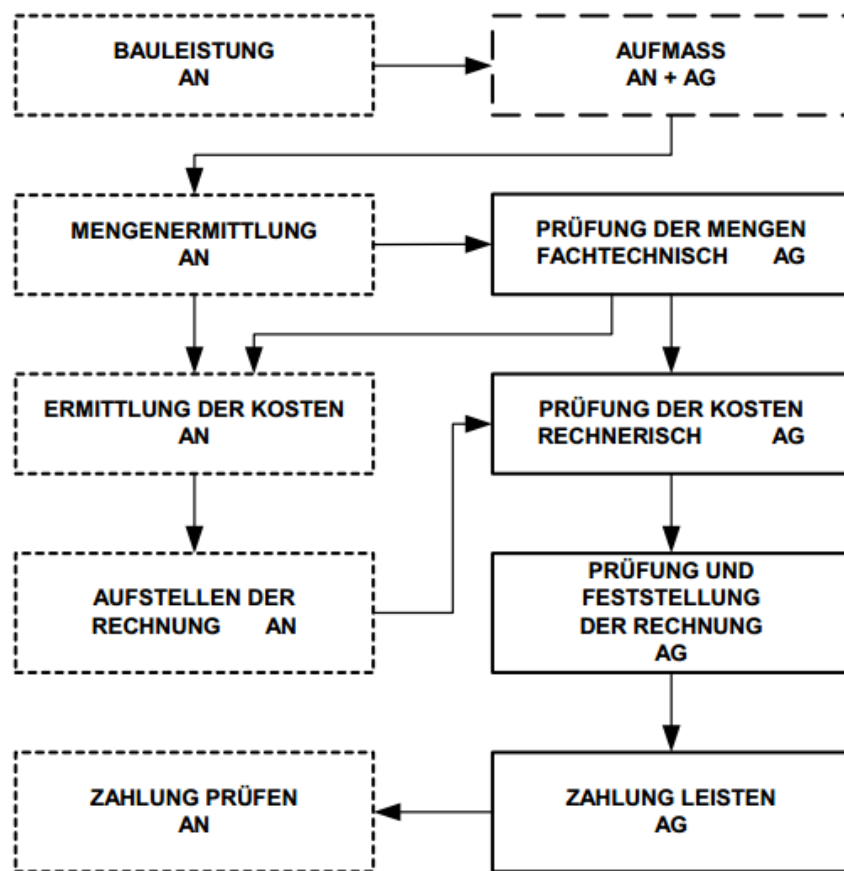


Abbildung 2-2: Schema des Abrechnungsablaufs [55]

Die Interessen des Auftraggebers werden zumeist durch die örtliche Bauaufsicht (ÖBA) vertreten. Die ÖBA übernimmt für den AG die Prüfung der Unterlagen und nimmt etwaige Korrekturen vor. Ein Beispiel für die Rollenverteilung kann dem Ablaufschema für die Bauabrechnung von der Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFiNAG) entnommen werden, welche in Abbildung 2-3 dargestellt ist. Das von Brigola/Krempf [12] beschriebene Ablaufschema basiert auf mehreren Punkten des Abrechnungsleitfadens für Bauleistungen und Dienstleistungen der Firma ASFiNAG. In Abschnitt 4.2 des Dokumentes wird der Aufbau und die Gliederung der Rechnungen dargestellt. Das Kapitel 4.3 beinhaltet die wesentlichen Informationen zu den einzelnen Schritten des Ablaufschemas, wie z.B. das Abrechnungsstartgespräch, Erstellung der Abrechnungsgrundlagen oder Zusammenstellung der Gesamtrechnung. Besonders zu erwähnen ist Punkt 4.3.3 „Erstellung der EDV-Aufmaßblätter“, auf den im Ablaufschema verwiesen wird. Dieser Punkt beschreibt die Besonderheiten bei der Erstellung der EDV-Aufmaßblätter und wird daher inklusive den anderen bedeutsamsten Schritten in den nächsten Unterkapiteln ausführlicher dargestellt.

## 2.3 Konventionelle Abrechnungsmethoden



### Ablaufschema für Bauabrechnung ÖN B 2118:

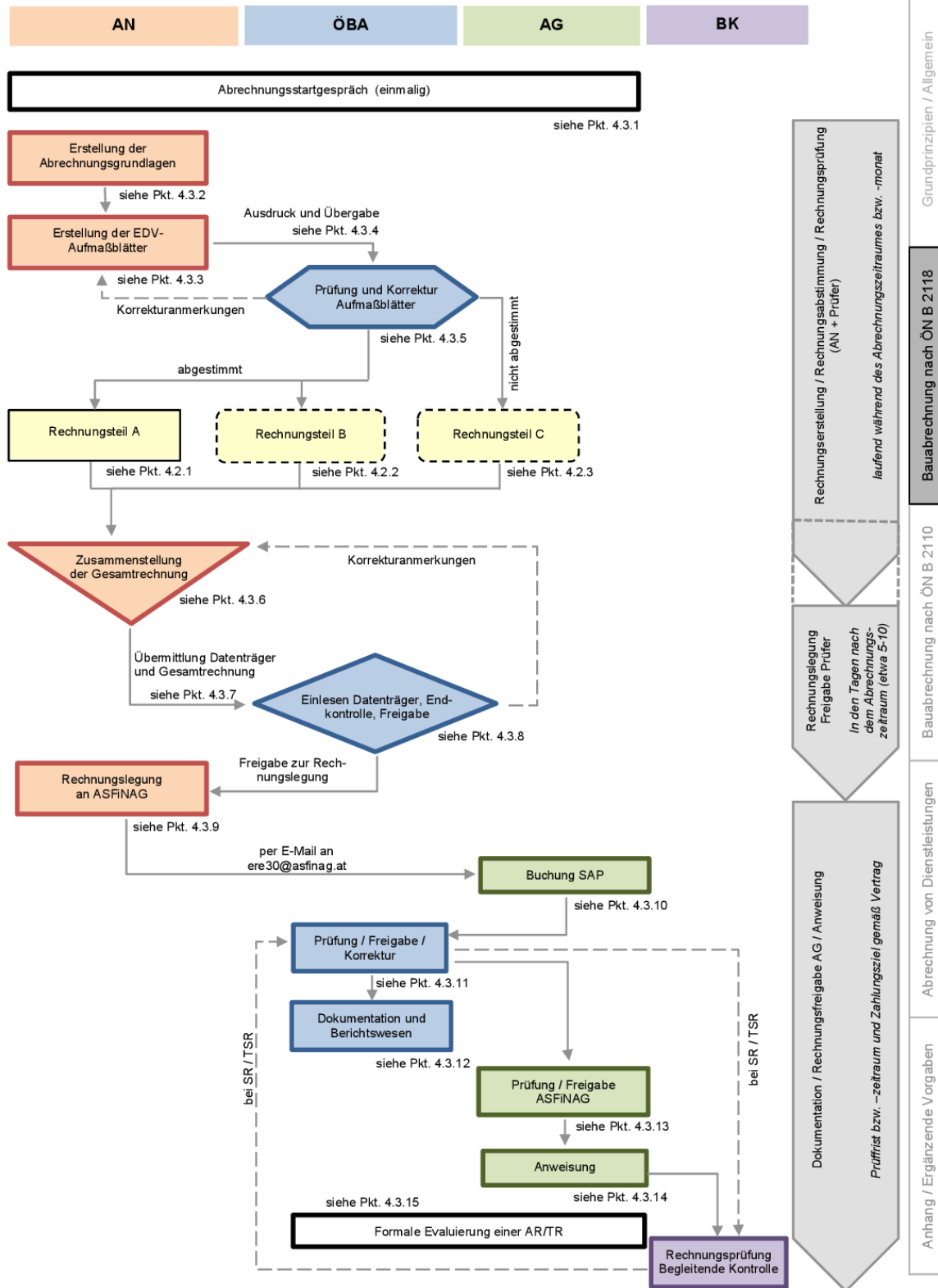


Abbildung 2-3: Ablaufschema für die Bauabrechnung der Firma ASFINAG [12]

### 2.3.2 Erstellung der Abrechnungsgrundlagen

Als Abrechnungsgrundlagen werden gemäß Brigola/Krempl [12, S. 14] jene Elemente bezeichnet, welche in weiterer Folge als Grundlage für die Mengenermittlung und Erstellung der Aufmaßblätter dienen:

- *Pläne*
- *Beilagen/Planauszüge*
- *Feldaufnahmeblätter*
- *Regieberichte*
- *Bauvertrag*

### 2.3.3 Mengenermittlung und Erstellung der Aufmaßblätter

Die Mengenermittlung ist eines der Zentralelemente der Ausführungsphase und vor allem des Abrechnungsprozesses. Bei der konventionellen Abrechnung werden die Mengen generell entweder nach Planmaß oder nach Feldaufmaß abgerechnet. Laut ÖNORM B 2110 [48] werden die Mengen entweder nach den diesbezüglichen Vereinbarungen oder nach den einschlägigen Normen abgerechnet. Im Zweifelsfall gilt eine Abrechnung nach Planmaß als vereinbart. Wichtig ist, dass die Prüfung der Mengen und Rechnungsbeträge auch auf manuelle Weise möglich sein muss, wobei alle erforderlichen Informationen für die Nachvollziehbarkeit der Mengenermittlung aufgelistet werden müssen. Bei einer automationsunterstützten Abrechnung müssen die Daten gemäß ÖNORM A 2063 übergeben werden.


#### *Aufmaßblätter*

Die Mengen werden gemäß Brigola/Krempl [12] in den sogenannten Aufmaßblättern erfasst, welche entweder händisch oder digital erstellt werden. In den meisten Fällen werden die Aufmaßblätter digital erstellt, wofür unterschiedliche AVA-Programmlösungen wie beispielsweise *RIB iTWO*, *ABK* und *AUER Success* bereitstehen. Es wird empfohlen, innerhalb eines Aufmaßblattes nur jene Positionen einer zusammengehörigen Leistung zu berechnen, wie zum Beispiel das Herstellen eines zusammenhängenden Bauteils. Ein Beispiel eines in iTWO erstellten Aufmaßblattes ist in Abbildung 2-4 zu sehen.

Der Aufbau der Aufmaßblätter muss übersichtlich und nachvollziehbar erfolgen. Jedes Aufmaßblatt muss mindestens auf eine Abrechnungsgrundlage verweisen, wobei die abgerechneten Werte auf diesen Abrechnungsgrundlagen eindeutig und ohne Hilfsrechnung des Prüfers auffindbar sein müssen. Für die Gliederung und Nummerierung von Aufmaßblättern müssen logische und verständliche Systeme festgelegt werden, welche im Rahmen eines Projektes konsequent beibehalten werden müssen. Ein Beispiel einer sinnvollen Nummerierung ist in Abbildung 2-5 sichtbar. Der Austausch von elektronischen Aufmaßblättern wird in ÖNORM A 2063 geregelt.

## 2.3 Konventionelle Abrechnungsmethoden

**iTWO** → Hier können Sie den eigenen  
→ Firmennamen eintragen



**Messurkunde 23003**

Projekt:	→2016-20	→Hirsch	→ Mit RE-Menge
Aufmaß:	→ Tiefbau	→ Erdarbeiten - Krankenhaus am Rande der..	→ Sortiert nach OZ
<b>K-Erläuterung</b>	<b>→ Faktor → FN → Rechenansatz</b>		<b>→ Ergebnis → Adresse</b>
<b>10.10.10</b>	→ Oberboden BG1 abtragen lagem Abtrag-D 20cm		→ m2
→	→	→ 91+100=	→ 100,000 → 1 → A0
→	→	→ 5 → 10,000 → 5,000 → 2,000 →	→ 15,000 → 1 → B0
→ Summe 10.10.10 → Oberboden BG1 abtragen lagem Abtrag-D..			→ 115,000
→ Vortrag			→ 0,000
→ Gesamtsumme			→ 115,000
<b>10.10.15</b>	→ Boden Baugrube lösen laden T bis 3,5m BK4		→ m3
→	→	→ 91+700=	→ 700,000 → 1 → C0
→ Summe 10.10.15 → Boden Baugrube lösen laden T bis 3,5m ..			→ 700,000

Abbildung 2-4: Aufmaßblatt erstellt in iTWO [76]

Immer:

Stelle 1 ... Rechnungsteil (immer)  
Teil A / Teil B / Teil C

z.B.:

Stelle 2 ... Firmen (ARGE-Partner oder Subunternehmer; z.B.)  
R ... Firma 1 / S ... Firma 2 / T ... Firma 3

Stelle 3-7 ... fortlaufende Nummerierung  
00001 ... 1.AMBL / 00002 ... 2.AMBL / 00003 ... 3.AMBL

AMBL AT00015 ... Rechnungsteil A / Firma 3 / 15. AMBL

Abbildung 2-5: Mögliche Nummerierung der Aufmaßblätter [12]

### Mengenermittlung bei der Abrechnung nach Planmaß

Die Mengenermittlung nach Planmaß hat auf Basis des für die Ausführung der jeweiligen Leistung gültigen Planstandes zu erfolgen. – ÖNORM B 2110 [48]

Im Falle der Abrechnung nach Planmaß sind laut Brigola/Krempel [12] die Ausführungspläne, die zum Zeitpunkt der jeweiligen Leistungserbringung Gültigkeit hatten, die Hauptgrundlage. Die aus den Plänen ermittelten Mengen werden in den Aufmaßblättern erfasst. Die Planbezeichnung und dessen Revisionsindex müssen im Aufmaßblatt angeführt werden. In den meisten Fällen werden vom AN eigene Abrechnungspläne erstellt, in denen die für die Abrechnung verwendeten Werte und Flächen markiert werden.

### Mengenermittlung bei der Abrechnung nach Feldaufmaß

Im Falle der Abrechnung nach Feldaufmaß sind die Naturaufnahmen die Basis der Mengenermittlung, welche auf den sogenannten Feldaufnahmeblättern (FAB) erfasst werden. Dieses Verfahren

ist besonders wertvoll, wenn die freigegebenen Pläne nicht ausreichend sind, um eine präzise Auswertung durchzuführen. Die Feldaufnahmen werden von AN und AG gemeinsam oder durch dessen Vertreter (ÖBA) durchgeführt. Der Aufnahmebereich muss durch eine eindeutige Beschreibung lagemäßig zugeordnet werden, welche auch für Dritte nachvollziehbar sein muss, zum Beispiel durch die Stationierung. Außerdem muss der Leistungsmonat sowie optional das entsprechende Aufmaßblatt im Feldaufmaßblatt angegeben werden, damit die abgerechnete Leistung eindeutig zuordenbar wird. [12] [52] Ein Beispiel eines Feldaufnahmeblattes ist in Abbildung 2-6 einsehbar.

Nach der Kontrolle der Datenträger und Rechnungen inklusive etwaiger Korrekturen wird die Rechnungslegung seitens der ÖBA freigegeben. Der AN kann somit die Rechnung an den AG legen. Nach einer Prüfung und ggfs. Korrektur seitens der ÖBA in einer vertragsgemäß vorgegebenen Frist, erfolgt die Zahlung an den AN. [12]

Straße: Abschnitt: <u>Bauhof 03</u> Gegenstand: <u>Bauleistungen</u> Bestell-Nr.: <u>301502873</u>		Auftragnehmer:	
<b>(FELD)AUFNAHMEBLATT NR.: <u>S0340/2</u></b>			
Bauteil: <u>Brüchenspl. AS 219 NFB Wien</u>		Leistungsmonat: <u>11/17</u>	
Auftragnehmer: Datum und Unterschrift:		Örtliche Bauaufsicht: Datum und Unterschrift:	

Felddaufnahmeblatt: Ver. 2015\_01

Seite 1 von 1

Abbildung 2-6: Beispiel von einem Felddaufnahmeblatt [17]

## 2.4 Building Information Modeling

Angesichts einer flächendeckenden Arbeitskraftteuerung und des Kampfs um die Produktionsoptimierung ist die Digitalisierung im letzten Jahrzehnt eines der zentralen Themen in allen Industriebranchen geworden. Obwohl im Bauwesen schon seit langem digitale Werkzeuge eingesetzt werden bleibt der Grad der Weiternutzung einmal erzeugter digitaler Informationen hinter den anderen Branchen zurück. Öfters gehen Informationen infolge der allgemein verbreiteten Informationsübergabe durch gedruckte Baupläne oder Datenträger von isolierten Softwarelösungen (Insellösungen) verloren. Mögliche Konsequenzen sind in Abbildung 2-7 dargestellt. Während der Übergänge von einer Projektphase in die andere werden wesentliche Teile der digitalen Informationen verloren. Besonders kritisch wird es, wenn es um einen Informationsaustausch zwischen den Projektbeteiligten geht, welche das Projekt in verschiedenen Projektphasen bearbeiten. Dies betrifft beispielsweise die Übergabe der Informationen von der Planung über die Ausführung bis zum Facility Management (FM). [10] Dieses beträchtliche Problem wird sukzessive mit dem Einsatz von Building Information Modeling (BIM) bewältigt, welches seinerseits ein Schlüsselement im Konzept der modellbasierten Abrechnung ist. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen dieser Technologie erläutert.

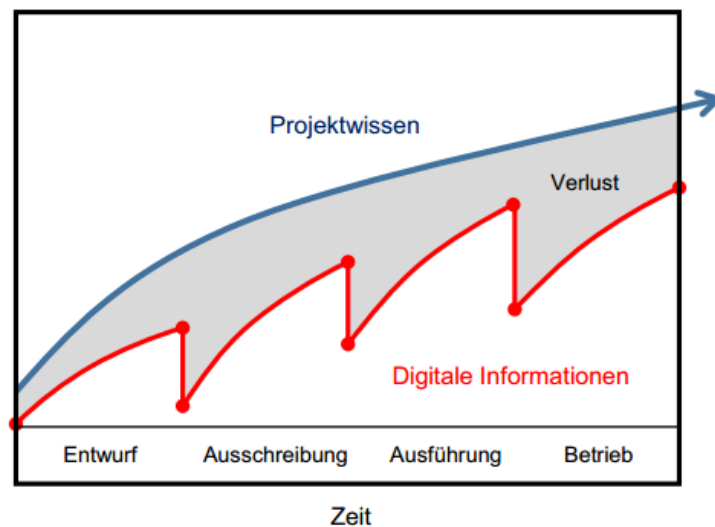


Abbildung 2-7: Informationsverlust durch Brüche im Informationsfluss [10]

### 2.4.1 Begriffsklärung

Der Begriff Building Information Modeling (BIM) umfasst nicht nur die 3D-Modellierung. Laut Austrian Standards [2] ist es „die optimierte Planung und Ausführung von Gebäuden mit Hilfe entsprechender Software. BIM ist ein intelligentes digitales Gebäudemodell, das es allen Projektbeteiligten - vom Architekten und Bauherrn über den Haustechniker bis hin zum Facility Manager - ermöglicht, gemeinsam an diesem integralen Modell zu arbeiten und dieses zu realisieren.“ Wichtig dabei ist, dass BIM nicht nur ein Informationsmodell ist, sondern eine Methode, mit welcher der Informationsaustausch erfolgt. Neben der dreidimensionalen Geometrie der Bauteile gehören ebenfalls nicht-geometrische Zusatzinformationen dazu, zum Beispiel Typinformationen, technische Eigenschaften oder Kosten. Der Begriff BIM wird im erweiterten Sinne verwendet, um

die Nutzung dieses digitalen Modelles über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks zu beschreiben, von der Planung über die Ausführung bis zur Bewirtschaftung und schließlich zum Rückbau. Die Einsatzgebiete von BIM in verschiedenen Objektlebenszyklusphasen sind in Abbildung 2-8 erkennbar. [10] [46]

## 2.4.2 BIM in der Planung und der Ausführung

Die Umsetzung der BIM-Methodik in der Planung bringt eine Menge von Vorteilen mit sich. Vor allem ist es möglich, die Kollisionskontrolle zwischen den Teilmodellen der am Projekt beteiligten Gewerke durchzuführen, damit die wahrscheinlichen Konflikte so früh wie möglich entdeckt werden. Je früher sie entdeckt werden, desto einfacher und kostengünstiger ist die Behebung. Überdies ist es möglich, verschiedene Berechnungs- und Simulationsprogramme anzuschließen, die die Objektgeometrie direkt aus dem Modell übernehmen können und nach der Durchführung die benötigten statischen Nachweise und Geometrieänderungen in das Zentralmodell zurückladen können. Ein gutes Beispiel einer solchen Softwarekombination ist die Revit-RFEM Schnittstelle, wobei in Revit das 3D-Modell erzeugt wird, und in RFEM alle notwendigen statischen Nachweise durchgeführt werden. Außerdem kann mit dem Informationsmodell eine hochpräzise Mengenermittlung abgewickelt werden, welche die Grundlage für eine zuverlässige Kostenschätzung bildet und somit das Erstellen des Leistungsverzeichnisses für die Ausschreibung wesentlich beschleunigt. Allerdings gibt es Nachteile, die den allgemeinen Einsatz der Methode gewissermaßen abbremsen. Zu denen zählen vor allem die Software- und Schulungskosten sowie eine Aufwandsverlagerung in die früheren Projektphasen gegenüber den bisherigen Abläufen, mit welcher einige Organisationsstrukturen nicht kompatibel sind. [9]

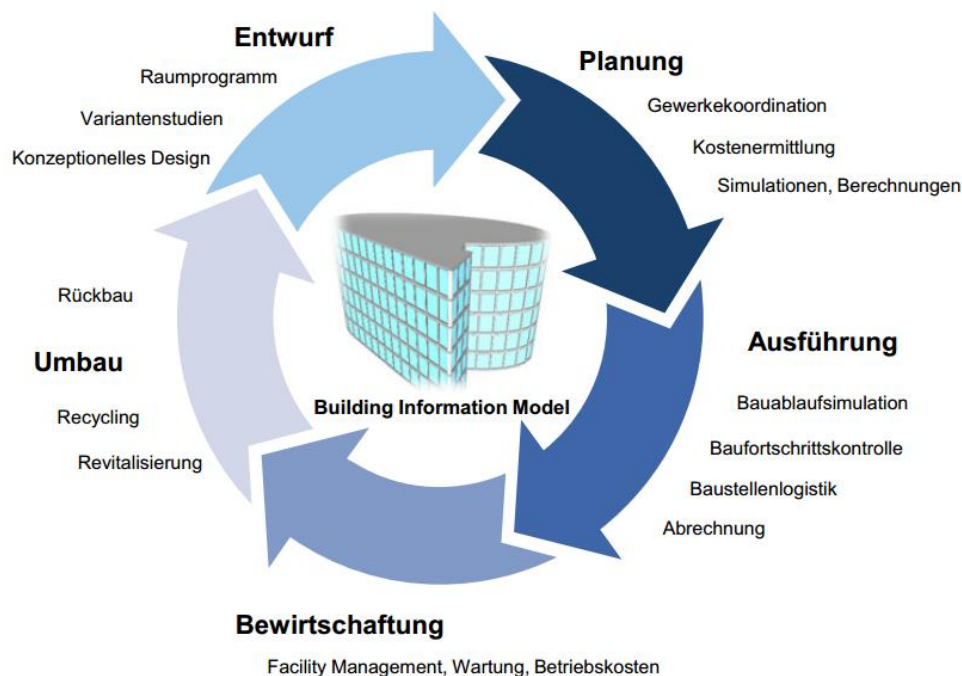


Abbildung 2-8: BIM über den gesamten Objektlebenszyklus [9]

Auch für die Vorbereitung und Begleitung der Bauausführung bietet die Nutzung von BIM wesentliche Vorteile. Die Bereitstellung eines Informationsmodells seitens der Planung im Rahmen der



## 2.4 Building Information Modeling

Ausschreibung erleichtert den Bauunternehmen die Aufwandsermittlung für die Angebotsabgabe. Da die Planung und Ausführung in vielen Fällen nicht vom gleichen Unternehmen abgewickelt werden, muss heutzutage der Bauherr fordern, dass die Planung in BIM durchgeführt wird und, dass das fertige Informationsmodell für die Ausführungsunternehmen bereitsteht, damit die Unternehmen es für die weitere Projektbearbeitung übernehmen können. [9] Da die entsprechenden Regelungen sich derzeit noch im Entwicklungsstand befinden, ist es in vielen Fällen in Österreich noch immer üblich, dass das ausführende Unternehmen für Projekte im Bereich Infrastrukturbau vom Planer nur aus dem Informationsmodell abgeleitete digitale PDF-Pläne bekommt, aber keine Informationsmodelle. Aus diesem Grund werden Modelle oft als Eigenleistung der Bauunternehmen erzeugt, um einige Vorteile von BIM während der weiteren Projektbearbeitung nutzen zu können sowie die internen Standards der Informationsbearbeitung zu entwickeln. Somit wird das Unternehmen in Zukunft für eine funktionierende vollständige Informationsübergabe Planung-Ausführung-FM und damit für eine vollwertige BIM-Bearbeitung bereit. Ein anderer Vorteil ist die Möglichkeit einer Bauablaufvisualisierung, die mittels einer Verknüpfung des Terminplans mit dem Modell erfolgt. Daraus können räumliche Kollisionen frühzeitig erkannt werden, bevor die Bauphase beginnt und die Baustellenlogistik kann modellbasiert koordiniert werden. [9] Des Weiteren kann eine präzise Abrechnung von Bauleistungen mittels BIM realisiert werden, was das Zentralthema dieser Diplomarbeit ist.

### 2.4.3 BIM-Anwendungsfälle

Für die Steigerung der Effizienz und Qualität der Prozesse beim Einsatz von BIM ist gemäß den Steckbriefen der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle [11] eine genaue Festlegung der im Projekt zu erreichenden Ziele wesentlich. Zu diesen gehören vor allem Verbesserung der Kommunikation, Erhöhung der Transparenz und Plansicherheit, Risikominimierung und Effizienzgewinn. Mit Erreichen dieser Ziele kann die erstrebenswerte Senkung der Projektkosten bewirkt werden. Auf Basis dieser BIM-Ziele entstanden die sogenannten BIM-Anwendungsfälle (AWF), welche ein wichtiger Bestandteil von BIM-Pilotprojekten im Bereich des Verkehrswegebau sind. Unter BIM-Anwendungsfällen werden Prozesse verstanden, welche unter Verwendung von BIM-Modellen bei der Erreichung von den festgelegten BIM-Zielen mitwirken.

Die nachfolgende Liste beinhaltet die Anwendungsfälle, welche aus Sicht der Arbeitsgemeinschaft BIM4INFRA2020 [11] am wichtigsten sind und somit eine Empfehlung für die standardisierte Anwendung von BIM repräsentieren.

- AWF 1 Bestandserfassung
- AWF 2 Planungsvariantenuntersuchung
- AWF 3 Visualisierungen
- AWF 4 Bemessung und Nachweisführung
- AWF 5 Koordination der Fachgewerke
- AWF 6 Fortschrittkontrolle der Planung
- AWF 7 Erstellung von Entwurfs- und Genehmigungsplänen
- AWF 8 Arbeits- und Gesundheitsschutz: Planung und Prüfung
- AWF 9 Planungsfreigabe

- AWF 10 Kostenschätzung und Kostenberechnung
- AWF 11 Leistungsverzeichnis, Ausschreibung, Vergabe
- AWF 12 Terminplanung der Ausführung
- AWF 13 Logistikplanung
- AWF 14 Erstellung von Ausführungsplänen
- AWF 15 Baufortschrittskontrolle
- AWF 16 Änderungsmanagement
- AWF 17 Abrechnung von Bauleistungen
- AWF 18 Mängelmanagement
- AWF 19 Bauwerksdokumentation
- AWF 20 Nutzung für Betrieb und Erhaltung

Anhand der Expertengespräche war zu erkennen, dass in den Infrastrukturabteilungen der Bauunternehmen ein zusätzlicher Anwendungsfall eingefügt wurde, welcher für diese Arbeit eine besondere Bedeutung besitzt: AWF 21 Maschinensteuerung.

#### 2.4.4 Klassifizierung der Einsatzfälle

Um von der ganzen Palette an Möglichkeiten von BIM zu profitieren, muss es Bereichs- und Phasenübergreifend eingesetzt werden. Diese technologische Stufe wird als „Big BIM“ bezeichnet. Damit allerdings die Funktionstüchtigkeit der Abläufe nicht gefährdet wird, ist ein schrittweiser Übergang von der herkömmlichen auf die modellgestützte Arbeit sinnvoll. In der Übergangsphase können die BIM-Softwareprodukte als Insellösung durch einen einzelnen Planer im Rahmen seiner disziplinspezifischen Aufgaben eingesetzt werden. In diesem Fall wird von „Little BIM“ gesprochen, seine Anordnung im Vergleich zu anderen Einsatzfalltypen ist in Abbildung 2-9 einsehbar. Auf der anderen Seite steht die Frage, welche Softwareprodukte eingesetzt werden. Wenn es die Softwareprodukte eines einzelnen Herstellers sowie proprietäre Datenaustauschformate eingesetzt werden, geht es um „Closed BIM“. Wenn im Gegenteil dazu offene Formate und Softwareprodukte verschiedener Hersteller zum Einsatz kommen, geht es um „Open BIM“. Ein solches allgemein verbreitetes, offenes und herstellerunabhängiges Datenformat ist IFC (Industry Foundation Classes), welches von buildingSMART einer internationalen Non-Profit-Organisation entwickelt wird, die sich der Verbesserung des Datenaustauschs zwischen Softwareprodukten des Bauwesens widmet. Um die Abhängigkeit von einem gewissen Softwarehersteller zu minimieren sowie auf eine erweiterte Funktionalität von BIM ständig zugreifen zu können, ist die Annäherung zu Big Open BIM für BIM-Anwender zielführend. [9]

#### 2.4.5 Dimensionen

Die BIM-Arbeitsweise kann in Dimensionen der Planung gegliedert werden. Einigen Informationen wird so viel Bedeutung beigemessen, dass diese als einzelne Dimensionen betrachtet werden. Eine Übersicht der Dimensionen ist in Abbildung 2-10 dargestellt. Die ersten drei Dimensionen (3D) bezeichnen das digitale geometrische Modell. Unter der vierten Dimension (4D) wird die Bauzeitplanung verstanden. Mithilfe eigener Attribute werden Informationen zur geplanten Bauphase den Objekten angehängt. Als Ergebnis einer solchen Informationsverknüpfung ist eine 4D-

## 2.4 Building Information Modeling

Bauablaufvisualisierung erhältlich, die helfen kann, mögliche Mängel des Terminplans frühzeitig zu erkennen und dementsprechend anzupassen. Eine 4D-Planung findet sein Nutzen bereits in der Angebotsbearbeitung seitens der Bauunternehmen. Die fünfte Dimension (5D) ist die Kostenplanung. Den Objekten des Modells werden zusätzliche Informationen zu deren Kosten hinzugefügt. Zusammen mit der Zeitachse aus der 4. Dimension und den geometrischen Informationen aus der 3. Dimension wird die 5D-Planung erhalten, welche vor allem bei den Bauunternehmen in verschiedenen Phasen eingesetzt wird. In dieser Dimension lassen sich leichter Daten für die Abrechnung der Teilleistungen gewinnen, somit ist diese Dimension für die modellbasierte Abrechnung am relevantesten. Als sechste Dimension der Planung (6D) werden die Nachhaltigkeits-Eigenschaften bezeichnet. Die siebte Dimension (7D) enthält jene Informationen, die während der Betriebsphase von Bauwerken für Facility Management Aufgaben von Relevanz sind, zum Beispiel Kennwerte zu Wartungs- oder Reinigungsintervallen. [7]

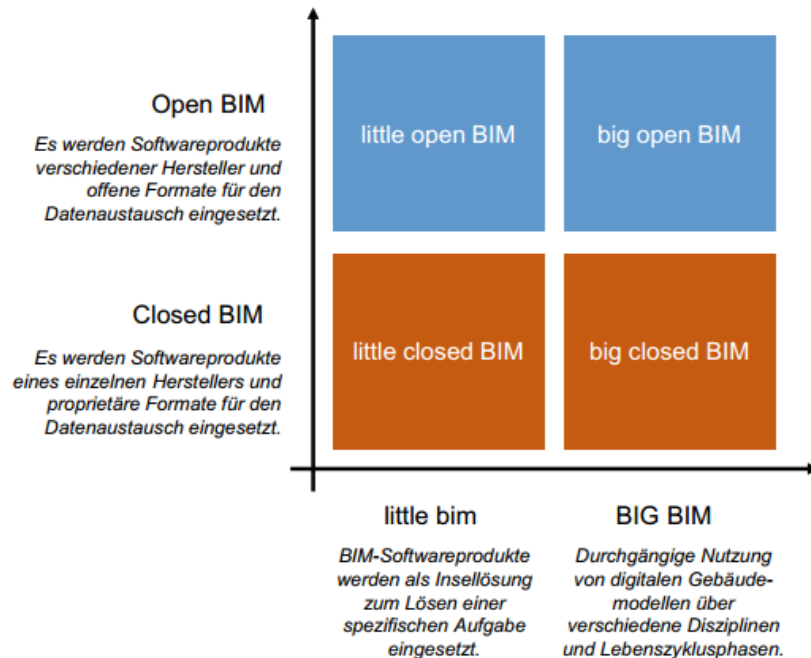


Abbildung 2-9: Die Breite des BIM-Einsatzes nach Jernigan (2008) [9]

### 2.4.6 Projektrollen

Mit der Einführung und Bearbeitung von BIM-Projekten entstehen viele neue Aufgaben verbunden mit der Bearbeitung von digitalen Modellen und der damit relevanten Daten. Mit diesen Aufgaben entstehen neue Rollen und neue Berufsbilder, zu denen vor allem der BIM-Manager und der BIM-Koordinator gehören. Zu den Aufgaben des BIM-Managers zählen die Ausarbeitung einer Strategie für die Qualitätssicherung und die Festlegung der notwendigen Arbeitsabläufe. Der BIM-Manager übernimmt in den meisten Fällen die Zusammenführung der Fachmodelle, Koordination der verschiedenen Planungsdisziplinen sowie die Modellfreigabe und Dokumentationsarchivierung. Der BIM-Koordinator ist hingegen für die Qualität des Fachmodells zuständig, er muss die Einhaltung von BIM-Standards, Datenqualität und Datensicherheit überwachen. Es gibt für jede Fachdisziplin einen eigenen BIM-Koordinator, deren Wechselbeziehungen mit dem BIM-Manager

in Abbildung 2-11 dargestellt ist. Der BIM-Manager und die BIM-Koordinatoren müssen im Laufe eines Projekts eng zusammenarbeiten. Insbesondere wenn zum Projekt mehrere Unternehmen herangezogen werden, und der Manager sowie die Koordinatoren zu verschiedenen Unternehmen gehören. [9]

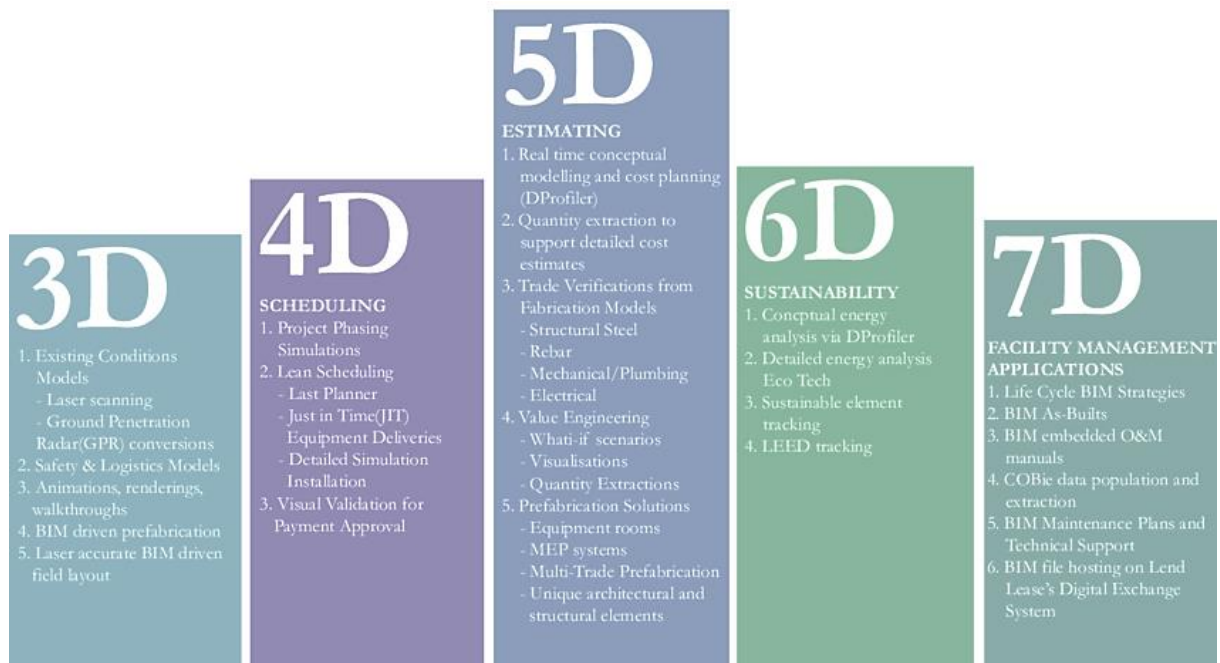


Abbildung 2-10: BIM-Dimensionen [78]

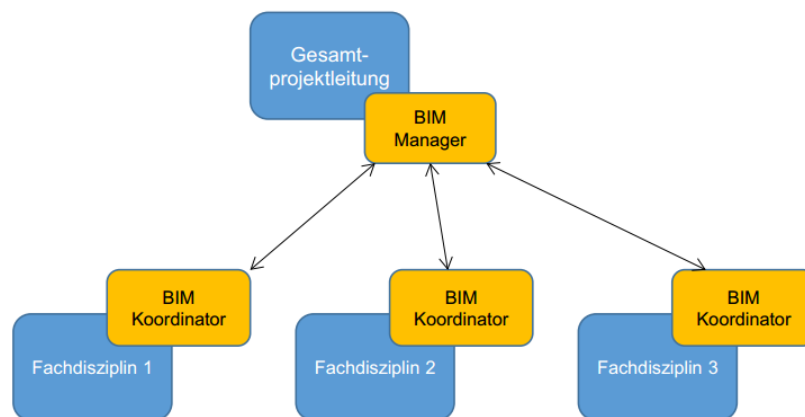


Abbildung 2-11: Aufgabenverteilung zwischen BIM-Manager und BIM-Koordinatoren [9]

### 2.4.7 BIM im Verkehrswegebau

Der Einsatz von BIM im Verkehrswegebau unterscheidet sich vom Einsatz im Hochbau durch eine andere Auswahl von eingesetzten Softwareprodukten, da die Modellierung der Elemente auf die andere Weise erfolgt, in einigen Fällen zum Beispiel achsenbasiert. Dies ist teilweise mit unterschiedlichem Bauwerksaufbau verbunden, die Unterscheidungsmerkmale werden auf dem Beispiel vom Straßenbau in nächsten Absätzen dargestellt.

Der Straßenbau ist mit großen Bauflächen und markanter Schichtung der Bauwerke besonders ausgeprägt. Der Straßenaufbau wird in mehrere Schichten unterteilt: Untergrund, Unterbau, Tragschichten und Deckschicht. Der Untergrund und der Unterbau zählen dabei zum Teilsystem Erdbau, Tragschichten und Deckschicht hingegen zum Teilsystem Oberbau. Trotz dieser Aufteilung bildet der Oberbau mit den darunterliegenden Schichten bei der Lastabtragung ein zusammenwirkendes Ganzes. [22]

Das Teilsystem Erdbau beinhaltet den Materialabtrag und -auftrag sowie die Schaffung des Planums für den Oberbau. Der Untergrund ist ein natürlich anstehender Boden, auf dem der Straßenkörper aufgebaut wird. Der Unterbau ist ein künstlich hergestellter Dammkörper der Straße, welcher in Abbildung 2-12 ersichtlich ist. Im Falle eines Einschnittes, der in Abbildung 2-13 dargestellt wird, wird die unterste Schicht des Oberbaus direkt auf den Untergrund gebaut. [22] Mit der Anwendung von BIM im Straßenbau können alle Schichten des Straßenaufbaus modelliert werden.

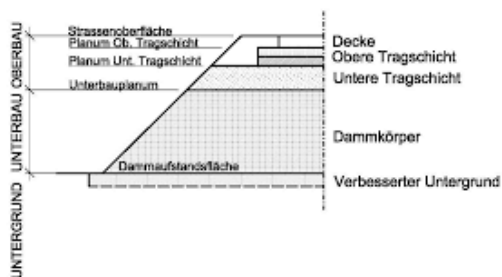


Abbildung 2-12: Schichtenaufbau, Damm [75]

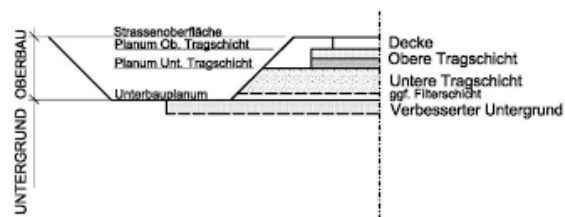


Abbildung 2-13: Schichtenaufbau, Einschnitt [75]

## 2.5 Technologische Grundlagen

Grundlage der modellbasierten Abrechnung ist ein 3D-Modell, welches monatlich aktualisiert wird. Daher ist es wichtig einen besonderen Blick auf die modernen Vermessungsmethoden zu werfen. Dieser Abschnitt ist hauptsächlich den Technologien gewidmet, welche zusätzliche Informationen für eine modellbasierte Abrechnung generieren. Zu denen gehören vor allem moderne Vermessungstechnologien sowie innovative Geometriedatenerfassungsmethoden.

### 2.5.1 Bauwerksvermessung

Das Aufmaß von Bauwerken ist ein wesentlicher Bestandteil sowohl für den Abrechnungsprozess, als auch für die Erstellung von geometrisch korrekten Bauwerksmodellen, die als Grundlage für die weitere BIM-basierte Projektbearbeitung dienen. In diesem Fall geht es grundsätzlich um kein anderes Verfahren als im Fall eines konventionellen Bauaufmaßes, die Vermessungstechnologien sind im Vergleich zur konventionellen Vermessung nicht neu. Neu ist jedoch die Dokumentationsart, da BIM einen ganzheitlichen Ansatz bei der Dokumentation verfolgt, was den Prozess selbst wesentlich beeinflusst. Statt der Punkte, Linien, Flächen und Volumina haben die Objekte und ihre Attribute eine zentrale Bedeutung im Erfassungsprozess erworben. Für weitere Projektbearbeitungsschritte wie zum Beispiel die modellbasierte Abrechnung wird nicht nur das Modell benö-

tigt, sondern auch alle dazugehörigen Parameter. Dementsprechend unterscheidet sich der Output der Vermessung. Statt zweidimensionalen Grundrissen, Schnitten und Ansichten sowie Bauteillisten wird letztendlich das mehrdimensionale Modell erzeugt. Mit der Entwicklung von leistungsfähigen Messinstrumenten werden in der aktuellen Praxis folgende Verfahren bei der Bauwerksvermessung eingesetzt: Elektronisches Handaufmaß, Tachymetrie, Photogrammetrie und Laserscanning. [9]

### *Elektronisches Handaufmaß*

Das elektronische Handaufmaß basiert auf elektrooptischen Streckenmessungen, mobilen Computern und einer speziellen Software. Dabei werden zur Streckenmessung gewöhnlich Laserdistanzmesser verwendet bei denen die zu messenden Punkte mit einem sichtbaren Laserstrahl gezielt anvisiert werden. Über eine Schnittstelle werden die Messwerte in weiterer Folge an den Laptop übertragen und in der Aufmaßsoftware bearbeitet. Für die Gesamtdimensionierung von einem rechteckigen Raum im Falle eines zweidimensionalen Aufmaßes genügt es drei horizontale Streckenmessungen durchzuführen: Länge und Breite sowie die Diagonale, die zur Kontrolle der Rechtwinkligkeit dient. Im Falle eines dreidimensionalen Aufmaßes müssen noch entsprechende Messungen in der Vertikale analog durchgeführt werden. Das Ergebnis des Prozesses ist ein Drahtmodell, welches aus CAD-Basiselementen wie Linien und Bögen besteht. Es gibt allerdings Systeme für eine 3D-Bauwerksmodellierung, in welchen die Flächen- oder Volumenelemente erzeugt werden, die gegebenenfalls parametrisiert und in die weiterfolgende BIM-Projektbearbeitung übernommen werden können. Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode besteht in der geringen Genauigkeit. Die Punkte zwischen Anfang und Ende eines Bauwerks können bis zu einem Dezimeter voneinander abweichen, weshalb dieses Verfahren hauptsächlich als Ergänzungsverfahren eingesetzt wird. [9]

### *Tachymetrie*

Moderne Tachymetrie basiert auf der elektrooptischen Distanzmessung. Die Messung kann entweder mit der Hilfe von Reflektorprismen erfolgen oder reflektorlos zu Punkten auf der Bauwerksoberfläche. Die zweite Methode zählt seit einigen Jahren zum technologischen Standard. Sie beschleunigt den Messvorgang und kann von einer Person durchgeführt werden, wogegen sonst eine zweite Person das Prisma positionieren muss. Primäre Messelemente sind die 3D-Polarkoordinaten, mit denen Punkte dreidimensional bestimmt und gleich im Instrument ins kartesische Koordinatensystem umgerechnet werden können. Die Messdaten werden für weitere Bearbeitungsschritte an einen mobilen Computer mit der Aufmaßsoftware übertragen. [9]

Bei der Tachymetrie wird generell zwischen drei Vorgehensweisen unterschieden: Erfassung der 3D-Strukturkanten, Direkterfassung von Schnitten und die 3D-Modellierung. Die erste gibt ein 3D-CAD-Drahtmodell von dem Bauwerk aus, die zweite eine 2D-Zeichnung in einer vordefinierten Schnittebene. Am bedeutendsten für die Verwendung in BIM-Modellen ist die dritte Herangehensweise, in welcher die geometriestimmenden Punkte des Bauwerks gemessen werden. Aus deren Koordinaten werden die dreidimensionalen Flächen- und Volumenelemente gebildet, welche am Ende zum Bauwerksmodell zusammengeführt werden. Während der Geometrieerfassung

## 2.5 Technologische Grundlagen

können mit entsprechenden Eingabefeldern der Erfassungssoftware gleichzeitig die Objektbildung und Informationsanreicherung erfolgen, was für die Verwendung in BIM-Modellen von Vorteil ist. [9]

### *Photogrammetrie*

Photogrammetrie ist die Vermessung anhand von photographischen Bildern. Dieses Verfahren kann in vielen Fällen nur im Außenbereich sinnvoll eingesetzt werden, da dieses Verfahren für Innenräume in den meisten Fällen zu aufwendig ist. Daher ist die Technologie insbesondere für Projekte im Bereich des Verkehrswegebbaus geeignet. Der Zeitaufwand vor Ort ist eher gering, da der Hauptteil der Vermessungstätigkeiten ins Büro verlagert wird. Generell gibt es gemäß Borrman et al. [9] vier Arten der Photogrammetrie: Einbildphotogrammetrie, Mehrbildphotogrammetrie, Stereophotogrammetrie und die UAV-Photogrammetrie (UAV – Unmanned Aerial Vehicle).

Bei der Einbildphotogrammetrie werden die Daten anhand von nur einem digitalen Bild ausgewertet. Alle Fotografien entstehen nach den Gesetzen der Zentralprojektion und weisen projektive Verzerrungen auf. Deshalb werden in der Natur parallele Objektkanten im Bild konvergiert dargestellt. Das Bild muss für die Auswertung projektiv entzerrt werden, damit die Parallelität der Objektkanten wiederhergestellt wird. Im entzerrten Bild findet in weiterer Folge die Auswertung anhand der Onscreen-Digitalisierung statt. Alle relevanten Konturen werden abgezeichnet, wobei die entzerrte Aufnahme sich im Hintergrund befindet. Prinzipienbedingt findet die fotografische Abbildung in zweidimensionaler Ebene des Kamerasensors statt, wodurch eine Dimension verloren geht. Aus diesem Grund können so grundsätzlich nur 2D-Objekte sowie die abwickelbaren Regelflächen von Zylindern oder Kegelstümpfen vermessen werden, weshalb sich dieses Verfahren für die Verwendung in BIM-Modellen nicht wirklich eignet. [9]

Bei der Mehrbildphotogrammetrie wird das gemessene Objekt von verschiedenen Standorten anhand mehrerer Bilder aufgenommen, welche sich 30 bis 90 Prozent überlappen. Dabei muss jeder Objektpunkt mindestens auf zwei Aufnahmen abgebildet werden, damit die Punkte dreidimensional bestimmt werden können. Eine weitere Voraussetzung ist die Bildorientierung. Die Positionen und Drehungen der Kamera müssen zum Zeitpunkt der Aufnahme bestimmt werden. Bei der Auswertung wird der zu bestimmende Punkt in mehreren Bildern lokalisiert und in Verbindung mit den Orientierungsdaten die korrespondierenden Raumstrahlen rekonstruiert. Als Ergebnis erhält man die 3D-Koordinaten der Punkte, aus denen die Linien der Objektkanten gebildet werden können. Anhand des photogrammetrischen Auswertungssystems PHIDAS kann die photogrammetrische Geometrieerfassung mit der Aufbereitung für BIM-Modelle kombiniert werden. Die Anwendung des Systems ist in Abbildung 2-14 dargestellt. [9]

Das Verfahren der Stereophotogrammetrie kann die Objekte stereoskopisch (räumlich) ähnlich dem menschlichen Auge betrachten. Es werden jeweils zwei Aufnahmen parallel und senkrecht zur Basis mit einem gewissen Abstand voneinander erstellt, wobei die Überlappung der Bildbereiche etwa 50 bis 60 Prozent beträgt. Der nicht bestreitbare Vorteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit der Vermessung von konturlosen Objekten wie Kuppeln. Der Nachteil besteht jedoch in einem hohen Aufwand an Personal und Ausrüstung. Daher spielt das Verfahren in der Bauwerksvermessung nur eine Nebenrolle. [9]

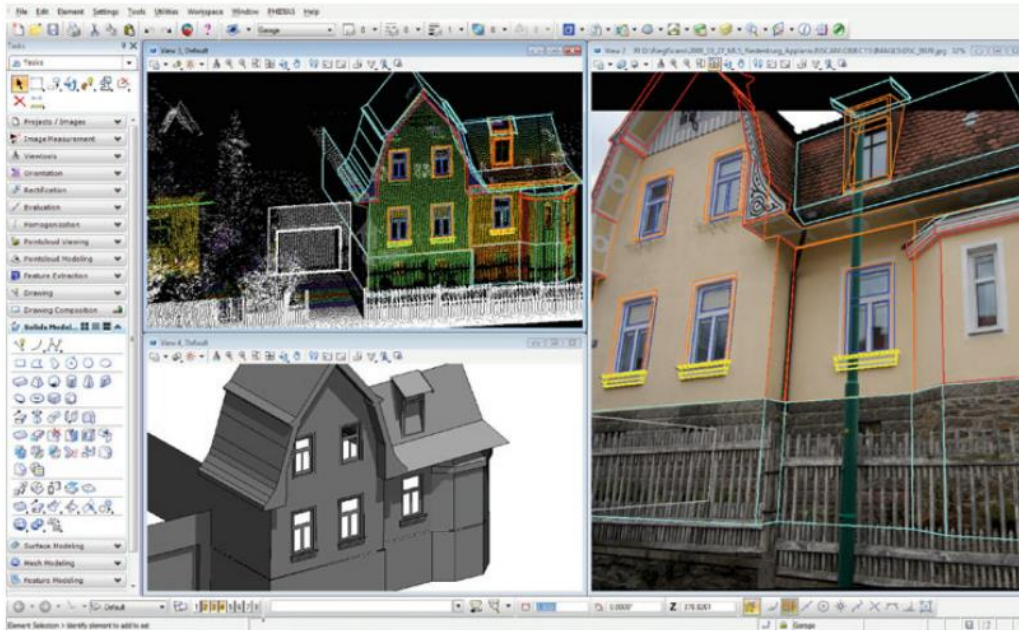


Abbildung 2-14: Photogrammetrische Auswertung eines Bauwerkes über das PHIDAS-System [9]

Bei der UAV-Photogrammetrie werden unbemannten Luftfahrzeugen (UAV – Unmanned Aerial Vehicles) eingesetzt, welche mit Kameras die Bildaufnahmen aus der Luft für die Erstellung von Oberflächenmodellen und Orthophotos liefern. Aus einer großen Anzahl stark überlappender Aufnahmen werden mit dem „Dense Image Matching“ Verfahren Punktwolken automatisiert abgeleitet, wobei die „Structure from Motion“ Methode angewendet wird. Die Punktwolken bilden die Basis für die weiterfolgende Vermaschung und Modellerstellung, welche in Unterkapitel 2.5.2 ausführlicher erläutert werden. Die Basis für die Verarbeitung von 3D-Daten aus UAV-photogrammetrischen Daten ist die exakte Orientierung aller Bilder sowie die genaue Georeferenzierung des Bildverbandes, welche über die auf der Baustelle aufgestellten Passpunkte erfolgt. Die Orientierung der Bilder kann mittels Aerotriangulation mit automatischer Verknüpfungspunktbestimmung durchgeführt werden. Eine rasche Entwicklung auf dem Markt von unbemannten Luftfahrzeugen (Drohnen) hat die Zugänglichkeit dieses Verfahrens für die Baubranche sehr positiv beeinflusst. Das Verfahren der UAV-Photogrammetrie ist für die Großprojekte im Bereich des Verkehrswegebbaus besonders wertvoll. Nur mit konventionellen Vermessungsmethoden wie das terrestrische Laserscanning, welches nachfolgend vorgestellt wird, lässt sich der Einsatz der modellbasierten Projektbearbeitung schwierig vorstellen. Es können jedoch viele Synergieeffekte aufgrund der ähnlichen Beschaffenheit erzielt werden, wenn die UAV-Photogrammetrie zusammen mit dem terrestrischen Laserscanning eingesetzt wird. [4] [9]

### *Terrestrisches Laserscanning*

Der Grundsatz des terrestrischen Laserscanning ist die horizontale und vertikale Abtastung des Messbereiches durch einen Laserstrahl in vorgegebenen Winkelschritten. Gleich wie bei einem reflektorlos messenden Tachymeter wird die Distanz zum Objektpunkt über das zurückkommende Signal gemessen. Auf diese Weise werden die 3D-Polarkkoordinaten registriert, welche des Weiteren in das kartesische Koordinatensystem umgerechnet werden. Das Ergebnis pro Scan ist wie bei der UAV-Photogrammetrie eine 3D-Punktwolke. [9]



## 2.5 Technologische Grundlagen

Generell gibt es zwei Verfahren, auf denen die Streckenmessung basiert: das Impulslaufzeitverfahren, welches eine Messrate von ca. einer Million Punkte pro Sekunden und eine Reichweite von bis zu 120 Meter aufweist, und das Phasenvergleichsverfahren mit einer Messraten von ca. 200.000 Punkte pro Sekunde und einer Reichweite von bis zu mehreren Kilometern. Die Standorte des Scanners werden frei gewählt, es ist kein Aufbau des Instrumentes über Festpunkten erforderlich. Da ein Phasenvergleichsscanner über eine begrenzte Reichweite und gleichzeitig eine große Messrate verfügt, wird im Infrastrukturbau zur Aufnahme der langgestreckten Terrains oft eine kinematische Variante des Scanners eingesetzt, wobei sich der Scanner entlang definierter Trajektorien bewegt. Auf solche Weise können Objekte mit größerer räumlicher Ausdehnung gescannt werden. [4] [9]

Von jedem Standort aus werden jeweils einzelne Punktwolken in lokalen Koordinaten erstellt, welche für die weitere Bearbeitung in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden. Dieser Prozess wird als Registrierung bezeichnet und wird mit der Software des Scannerherstellers durchgeführt. [9]

Für die Auswertung der Punktwolken gibt es ähnlich wie bei der Tachymetrie generell drei Verfahren: Direkterfassung in Schnittebenen, Konturbezogene Erfassung und die 3D-Modellierung, welche für BIM die größte Bedeutung hat. Beim letzten Verfahren werden aus den Punktwolken primitive Figuren wie beispielsweise Flächen, Quadern oder Zylindern modelliert, welche durch spezielle Fitting-Algorithmen in die Punktwolke eingepasst werden und somit die geometrische Form des Bauwerks bilden. Der Vorgang wird aktuell in den meisten Fällen halbautomatisch durchgeführt. Das bedeutet, dass die relevanten Punkte manuell selektiert und anschließend mit der Software gefittet werden. An der vollständigen Automatisierung wird derzeit aktiv geforscht und ist momentan noch kein standardisierter Prozess. [9] Es gibt allerdings bereits Beispiele in der Praxis, bei denen die Datenauswertung automatisiert mithilfe von künstlicher Intelligenz (AI) erfolgt. Die speziell entwickelten 3D-AI-Algorithmen können typische Elemente einer Baustelle wie Bordsteinkanten oder Laternen erkennen, klassifizieren und lokalisieren. [3] Da die Bestimmung der Objektgeometrie mit mehreren Messpunkten erfolgt, kann die 3D-Modellierung auf der Basis von Punktwolken mit einer sehr hohen Genauigkeit auftrumpfen. [9]

### *Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie*

Laserscanning und Photogrammetrie können erfolgreich kombiniert werden um die jeweiligen Nachteile zu kompensieren. Die Schwäche der Photogrammetrie liegt in der Tiefenmessgenauigkeit wobei gleichzeitig die Detailerkennbarkeit wegen einer höheren Auflösung an der Objektoberfläche höher ist als beim Laserscanner. Technisch gesehen werden die Punktwolken lagerichtig und deckungsgleich über die orientierten Bilder dargestellt, wobei der Vermesser in seiner neuen Rolle beide gleichzeitig betrachtet und in beiden simultan messen kann. Die Bauwerksgeometrie kann in Form von Draht-, Flächen- sowie Volumenmodellen erfasst werden. In Zukunft wird erwartet, dass die Messsensoren für Tachymetrie, Photogrammetrie und Laserscanning in einem universalen Instrument kombiniert werden. [9]

### Bevorzugte Bauwerksvermessungsarten im Verkehrswegebau

Für die Geometrieerfassung stehen heutzutage mehrere verlässliche Methoden bereit: sowohl die Einzelpunktverfahren, zu denen elektronisches Handaufmaß und Tachymetrie gehören, als auch flächenhaft erfassende Sensoren, auf denen sich Photogrammetrie und Laserscanning beziehen. Im Bereich Verkehrswegebau werden die letzten bevorzugt, obwohl dabei noch ein erhebliches Automatisierungs- und Optimierungspotenzial verbleibt. Der Hauptaufwand liegt in der Datennachbearbeitung, welcher durch die Automatisierung von aktuell manuell und semiautomatisch verarbeiteten Prozessen mit intelligenten Softwarelösungen wesentlich minimiert werden kann. Das Thema „BIM“ hat jedoch in der Vermessungspraxis aktuell eine maßgebliche Rolle erworben, und die bestehenden Prozesse werden ständig transformiert und an die neuen Herausforderungen angepasst. [9]

### 2.5.2 Digitales Geländemodell

Die Grundlage für alle Planungsaufgaben im Bereich des Infrastrukturbaus ist die Generierung eines digitalen Modells des Urgeländes, welches als Digitales Geländemodell (DGM) oder auf Englisch als digital terrain model (DTM) bezeichnet wird. Ein digitales Geländemodell besteht aus Punkten im Raum, welche netzartig zu Dreiecksflächen verbunden werden und auf solche Weise die geometrische Oberfläche lückenlos beschreiben. Ein Beispiel eines DGM ist in Abbildung 2-15 ersichtlich. Damit der tatsächliche Geländeverlauf so realistisch wie möglich modelliert werden kann, können zusätzlich Bruchkanten und Begrenzungslinien definiert werden. In der Regel wird der Delaunay-Algorithmus für die Triangulation verwendet. [4] Abbildung 2-16 beschreibt die Bearbeitungsschritte zur Erstellung eines DGM, auf welche anschließend näher eingegangen wird.

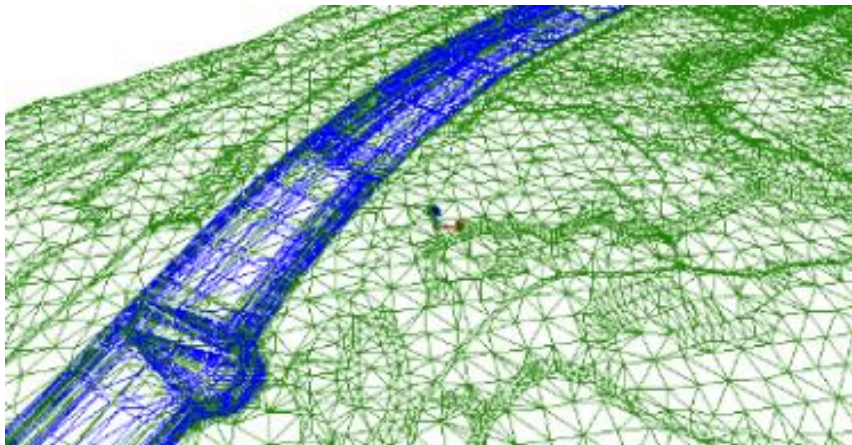


Abbildung 2-15: Beispiel eines digitalen Geländemodells (DGM) [79]

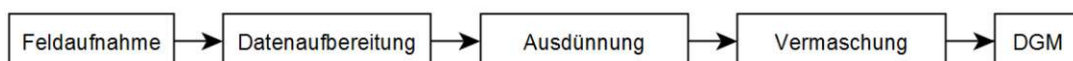


Abbildung 2-16: Prozessablauf bei der Erzeugung des digitalen Geländemodells

### *Datenaufbereitung*

Die im Feld mit einem Laserscanner oder einer Aufnahmekamera gewonnenen Daten müssen nachbearbeitet werden. Dabei werden die Punktwolken registriert und georeferenziert. Die durch einen Scanvorgang erhaltenen Punktwolken können zusätzlich mittels Kameraaufnahmen eingefärbt werden, wofür allerdings die Aufnahmen vom Scannerstandpunkt ausgemacht werden müssen. Dafür ist beispielsweise der Laserscanner Leica Scanstation gut geeignet, da dieser mit einer integrierten Kamera ausgerüstet ist. [5]

### *Ausdünnung*

In einem weiteren Schritt ist eine Bereinigung der Punktwolke von unerwünschten Objekten notwendig. Die Punkte müssen in einer konventionellen Infrastrukturplanungssoftware ausgedünnt werden, wobei der Grad der Ausdünnung von den Genauigkeitsanforderungen abhängt. Die Ausdünnung ist nötig, um die Punkteanzahl zu reduzieren und damit die Verwendung des Scanergebnisses im weiteren Planungsprozess zu gewährleisten. In Abbildung 2-17 ist das Prinzip der Ausdünnung mit dem Raumraster bezogenen Verfahren dargestellt. Dabei wird pro räumlichem Rasterwürfel jeweils nur ein Punkt als Repräsentant des jeweiligen Bereichs ausgewählt. [5]

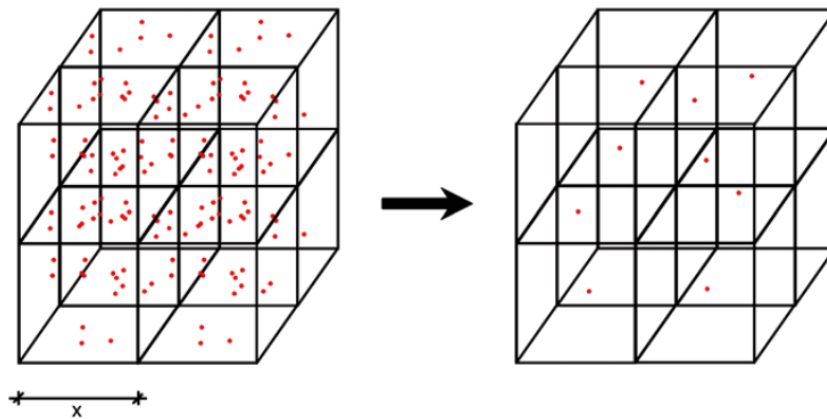


Abbildung 2-17: Ausdünnung der Punkte mit dem auf Raumraster bezogenen Verfahren [5]

Das Ziel für die Zukunft ist eine automatisierte Ausdünnung, welche die bedeutsamen Einzelpunkte eigenständig herausfiltern kann. Als Kriterium der Relevanz des Punktes kann zum Beispiel die räumliche Dichte der Punkte agieren. Andererseits kann die Ausdünnung in Abhängigkeit von der Flächenkrümmung erfolgen. Dabei werden die Dreiecke in der Ebene auf wenige Stücke reduziert, während die Dreiecke von Kurven erhalten bleiben. Die Ausdünnung kann bis zum Faktor 10.000 erfolgen. [4]

### *Vermaschung*

Nachdem die Punktwolken ausgedünnt wurden, wird aus den verbleibenden Punkten eine geschlossene Oberfläche aus Dreiecken konstruiert. Dieser Prozess wird als Vermaschung oder Meshing bezeichnet und erfolgt in einer Point Cloud-Verarbeitungssoftware. Ein Beispiel einer solchen Software ist *3DReshaper* von Leica Geosystems, welche über verschiedene Tools zum Meshing verfügt. Es sind nur wenige Parameter erforderlich, wodurch der Bearbeitungsprozess fast automatisch erfolgt. Nach der abgeschlossenen Vermaschung ist das digitale Geländemodell fertig

und für die weiteren Bearbeitungsschritte verwendbar. [37] [68] In Abbildungen 2-18 und 2-19 ist das gleiche Bauobjekt von einem Beispielprojekt vor und nach der Vermaschung dargestellt.



Abbildung 2-18: 3D-Punktwolke eines Beispielprojektes [36]

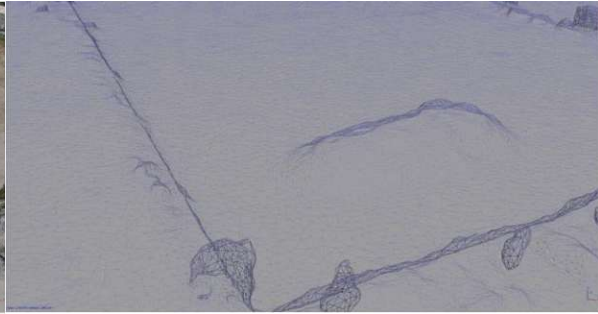


Abbildung 2-19: Digitales Geländemodell (Netz von Polygonen) eines Beispielprojektes [36]

### Einsatz des DGM für die Vergleichsanalyse

Eine große Bedeutung bietet die Möglichkeit der Gegenüberstellung von Schnitten zu unterschiedlichen Bauzuständen. In Abbildung 2-20 ist ersichtlich, dass der Boden im Einschnittbereich noch nicht vollständig ausgehoben wurde, was dem Zustand zum Zeitpunkt 1 entspricht. Das DGM befindet sich mit einem gewissen Abstand oberhalb vom Straßenmodell. Zwei Wochen später (Zeitpunkt 2) wurde eine erneute Geländeaufnahme durchgeführt, aus welcher ein neues aktuelles DGM erzeugt wurde. Nach der Verschneidung des neuen DGM mit dem räumlich richtig positionierten Straßenmodell ist ersichtlich, dass die räumliche Lage des neuhochgeladenen DGM mit der Lage der modellierten Straße zusammenfällt. Dies deutet auf den fertigen Bauzustand des Einschnitts hin und ist in Abbildung 2-21 erkennbar. Es sind allerdings noch einige Spitzen des Baugrunds zu erkennen, welche sich über das Straßenmodell erheben. Das sind die Baumaschinen und weiteren Fahrzeuge, welche sich während dem Aufnahmeprozess auf der Baustelle befanden und miterfasst wurden. Üblicherweise werden sie jedoch aus den Punktwolken entfernt. [5]

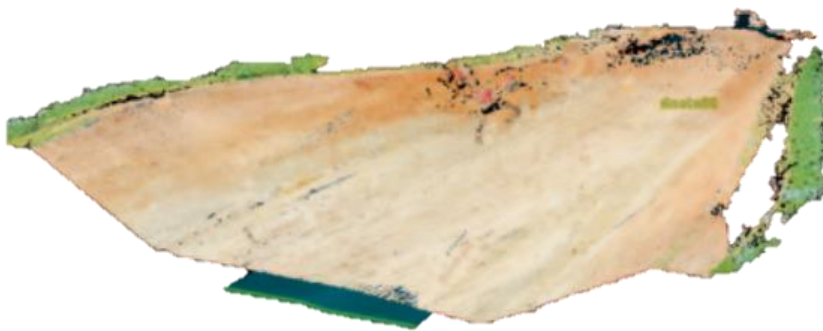


Abbildung 2-20: Überlagerung der modellierten Trasse mit dem Ist-DGM, Zeitpunkt 1 (mod. nach Baumgärtel T. et al. [5])

## 2.5 Technologische Grundlagen

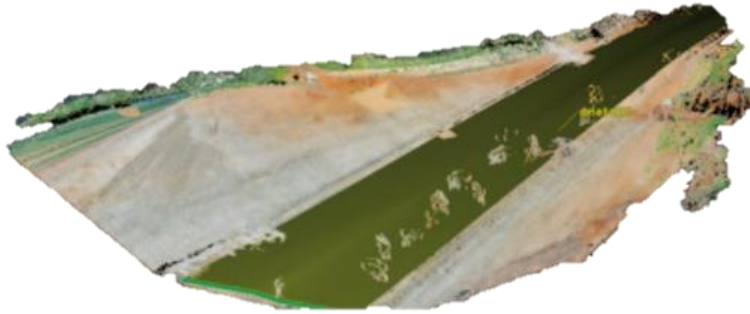


Abbildung 2-21: Überlagerung der modellierten Trasse mit dem Ist-DGM, Zeitpunkt 2 (mod. nach Baumgärtel T. et al. [5])

### Muster-Workflow

Für den ganzen Datenbearbeitungsprozess werden viele Schritte und mehrere Softwareprodukte eingesetzt. Ein beispielhafter Workflow ist in Abbildung 2-22 dargestellt. Auf der Sensorebene werden die Vermessungsdaten in Abhängigkeit von der Vermessungsart (Kamerasysteme oder Laserscanner) produziert, sensorspezifisch aufbereitet und ausgedünnt. Nach der Vermaschung der Punktwolken in Meshlab werden die 3D-Modelle aus den Dreiecksmaschen über die Software ScanBox gebildet. Die Modellierungsdaten werden intern in eigenen Formaten abgelegt und können extern an die CAD-Programme angebunden werden. [4]

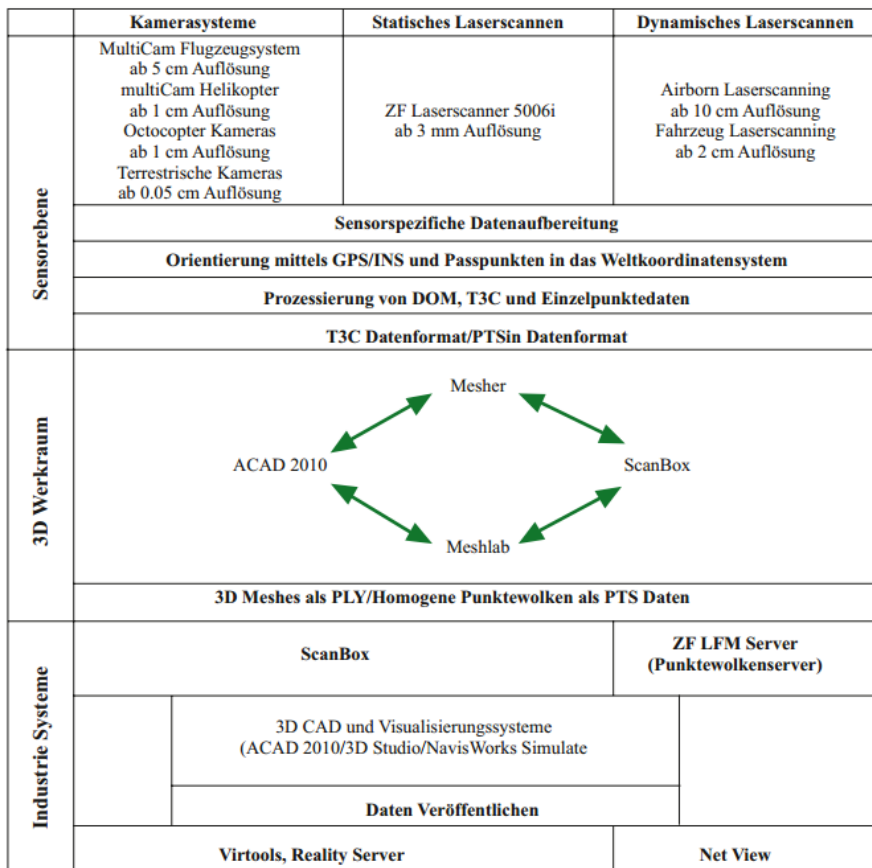


Abbildung 2-22: Beispielhafter Workflow bei der Erzeugung von 3D-Vermaschungsmodellen [4]

### 2.5.3 Baumaschinendaten

Jede Baustelle im Bereich des Verkehrswegebbaus benötigt eine Vielzahl von unterschiedlichen Baumaschinen, welche sich in den letzten Jahren zufolge der flächendeckenden Digitalisierung in der Maschinenbauparte von mechanischen Erzeugnissen zu hochintelligenten Computern verwandelt haben. Jede Maschine kann heutzutage nicht nur ihre elementaren Funktionen ausführen, sondern auch verschiedene Daten generieren, empfangen, bearbeiten und freigeben, welche in der BIM-Arbeitsweise in weiterer Folge für Ausführungsprozesse wie Leistungsmeldungen oder die modellbasierte Abrechnung verwendet werden können. Diesen Daten ist dieses Unterkapitel gewidmet.

#### Klassifikation der Baumaschinendaten

Generell können die Baumaschinendaten in zwei Gruppen unterteilt werden. Zur ersten Gruppe gehören die Daten, welche mit den unmittelbaren Funktionen der Baumaschinen und dem Bearbeitungsgegenstand zu tun haben, wie Geometrie des Geländes und Bauwerkes oder der Verdichtungsgrad. Diese Art von Daten wird mithilfe der Baumaschinensteuerungssysteme bearbeitet. Zur anderen Gruppe gehören hauptsächlich technische Betriebsdaten wie beispielsweise Dieselstand, Arbeitsleistung der Geräte, Öldruck und Kraftstoffverbrauch. Diese Daten werden mit den Baumaschinenüberwachungssystemen kontrolliert. Die Systematisierung dieser Datensysteme ist in Abbildung 2-23 dargestellt. [18]

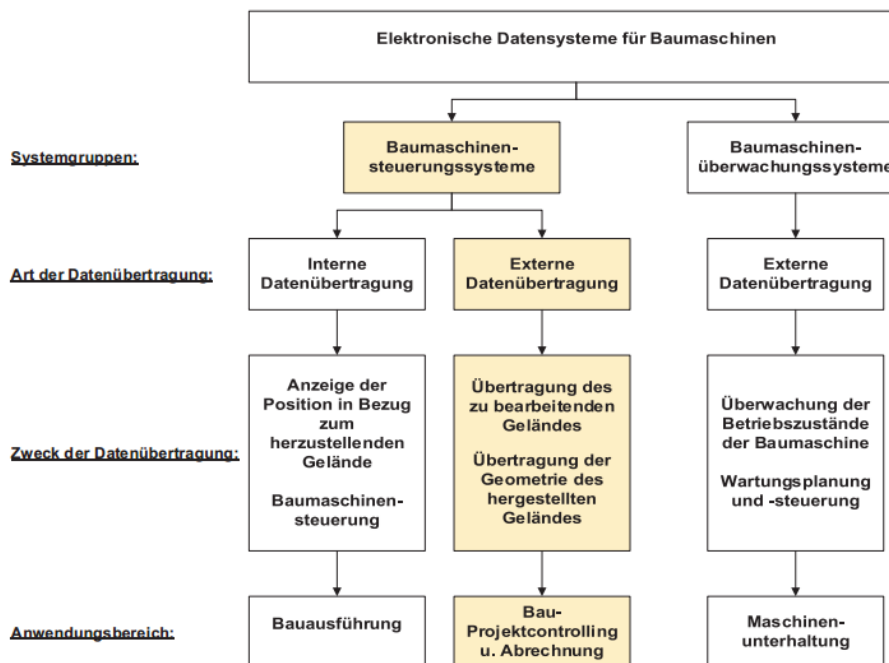


Abbildung 2-23: Systematisierung elektronischer Datensysteme für Baumaschinen laut M. Ferger [18]

In Abhängigkeit von der Maschinenart und seiner Hauptfunktion werden verschiedene Daten generiert. Allgemeine Straßenbau-Baumaschinen wie verschiedenartige Bagger, Radlader, Grader und Planiertraupen generieren die 3D-Lage der Maschine zu jedem beliebigen Zeitpunkt hauptsächlich mithilfe der GNSS-Antennen oder der Tachymeter. Aus diesen 3D-Lagen entsteht eine Punktwolkenaufnahme des Bestandsgeländes. Zusätzlich können die Masse des Schaufelinhaltes bei einem Hydraulikbagger und der Verdichtungsgrad bei einer Planiertraupe bestimmt werden.

## 2.5 Technologische Grundlagen

Außerdem können die Produktivität und Effizienz der Maschinen ermittelt werden. [51] Bei der Verwendung von Bohr- und Rammsystemen spielen außerdem die Daten der Bohr- bzw. Ramm-tiefe eine grundlegende Rolle.

Da zahlreiche Hersteller für verschiedene Baugeräte existieren, wäre es schwierig eine einheitliche Arbeitsweise einzuführen, bei der die aufgenommenen Daten von jedem Hersteller in einer standardisierten Weise erzeugt und in andere Systeme exportiert werden können. Aus diesem Grund ist für die Entziehung und die weiterfolgende Bearbeitung von diesen Daten ein universelles System notwendig, welches mit den gängigsten Baumaschinenherstellern kooperieren kann. In diesem Fall geht es um ein Baumaschinenüberwachungssystem oder ein Baumaschinensteuerungssystem. Mithilfe von letzterem können die notwendigen geometrischen Daten von dem Baugerät aufgenommen und in die Nachbearbeitungssoftware für die Erzeugung des Bestandsmodells übergeben werden. Auf solche Weise können die Baumaschinendaten dank dem Maschinensteuerungssystem von verschiedenen Geräten universal verarbeitet werden.

### *Rolle des Maschinensteuerungssystems*

Abgesehen von der Art der erfassten Maschinendaten weist ein Baumaschinensteuerungssystem einen weiteren Unterschied zum Bauüberwachungssystem auf. Erfasste Positionsdaten von den Maschinenwerkzeugen werden im Falle eines Baumaschinensteuerungssystems in den Steuerungsbereich des Baggerführers oder an die Maschinenhydraulik übertragen. Eine ständige Datenverbindung zu einer externen Stelle, zum Beispiel über Internet, ist dabei nicht erforderlich. Ein solches System kann somit autonom funktionieren. [18]

Das Maschinensteuerungssystem ist ein wichtiger Bestandteil des Workflows zur Integration der Baumaschinendaten in die nachfolgende Abrechnung. Das System dient in erster Linie der Steuerung der Maschinen. Die als Soll-Daten notwendigen Informationen werden in Form eines Trassenmodells oder digitalen Geländemodells erstellt und über den Maschinensteuerungscomputer dem Maschinisten freigegeben. Ein solches typisches System, welches in Abbildung 2-24 dargestellt ist, besteht normalerweise aus einem GNSS-Empfänger mit Antenne oder einem Steuerungstachymeter mit UTS-Target, einem Onboard-Computer und mehreren Sensoren, welche die 3D-Koordinaten des Arbeitswerkzeuges (Löffel, Schar, etc.) genau bestimmen. Mit der GNSS-Antenne oder dem Steuerungstachymeter wird die 3D-Lage des Baugerätes bestimmt und mit den Soll-Daten auf dem Bildschirm des Baggerführers verglichen. Zum Beispiel können damit die Informationen, wie tief noch gegraben werden kann, damit die Projekttiefe des Einschnitts nicht untergraben wird, überprüfbar werden. Die Arbeit der Maschine kann noch dazu mit der Steuerung der Hydraulikventile oder Elektrohydraulik automatisiert werden. Laut Trimble kann dies die Produktivität um bis zu 40% steigern. [59]

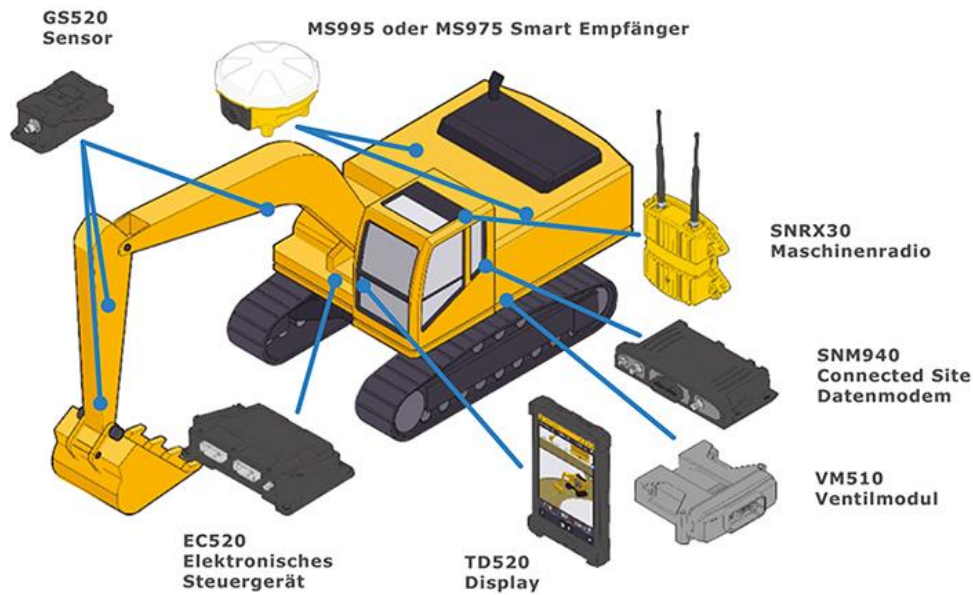


Abbildung 2-24: Beispiel eines Maschinensteuerungssystems von Trimble [80]

Wertvollen Daten können allerdings auch in rückwärtiger Richtung geliefert werden. Die Koordinaten des Instrumentes (zum Beispiel Löffels) werden in den sogenannten Festpunkten des Querschnitts in einem vordefinierten Zwischenabstand voneinander gesammelt und ins CAD-System übergeben. Mit diesen Daten kann ein bereits in Unterkapitel 2.5.2 vorgestelltes digitales Geländemodell erstellt werden, mit dem die modellbasierte Abrechnung sowie die modellbasierte Leistungsmeldung sich umsetzen lassen. Auf dem Markt sind gegenwärtig verschiedene Maschinensteuerungssysteme vorhanden. Zu den Marktführern können zum Beispiel Trimble GCS900, MOBA XSITE PRO 3D, Leica grade iGD4SP und Topcon 3D-MC gezählt werden, mit deren Hilfe die Datenerfassung von Geräten wie Baggern, Dozern, Gradern, Radladern, Bohr- und Rammgeräten sowie Roverstäben involviert werden können. Auf die Besonderheiten von diesen Systemen und Geräten wird in Unterkapitel 2.5.4 näher eingegangen.

### **Maschinensteuerung und BIM**

Die mit den Baumaschinen erfassten Ist-Geometriedaten, welche die baubetrieblichen Aufgaben unterstützen können, wurden bis vor kurzem in die Prozesse der Abrechnung und des Bauprojektcontrollings noch nicht integriert. Im Vergleich zu einer drohnenbasierten Bestandsaufnahme ist es noch ein neues Gebiet. Die Nutzung dieser Daten hat neue Möglichkeiten für die Mengenermittlung im Verkehrswegebau und insbesondere im Erdbau mit sich gebracht, ohne die eine modellbasierte Abrechnung schwierig vorstellbar wäre. Die Integration der Baumaschinen in den Prozess der modellbasierten Abrechnung und des modellbasierten Controllings ist dank der Verbindung von den Bereichen der Maschinensteuerung und Building Information Modeling möglich geworden. Für das Projektcontrolling ist eine zeitnahe Mengenermittlung als Informationsbasis für Entscheidungen besonders wichtig. [18]



## 2.5 Technologische Grundlagen

### 2.5.4 Beteiligte Geräte

In diesem Unterkapitel wird ein kurzer Überblick über gängige Geräte gegeben, welche im Zuge der zuvor vorgestellten Bauwerksvermessungsarten für die Leistungserfassung und modellbasierte Abrechnung eingesetzt werden. In Abhängigkeit von der gewählten Vermessungsmethode, wird für die Datenerfassung generell zwischen dem Laserscanner, Drohnen, verschiedenartigen Baumaschinen sowie dem Mobile Mapping unterschieden.

#### **Laserscanner**

Laserscanner sind spezialisierte Messinstrumente mit Messraten von bis zu 1 Million Punkten pro Sekunde. Die Laserscanner werden in der Regel mit einer vom Hersteller bereitgestellten Software zur Registrierung ausgestattet, die sich in Bezug auf die Handhabung und den Automatisierungsgrad unterscheiden. In Abbildung 2-25 ist ein Beispiel eines solchen Gerätes der Firma Leica dargestellt, welches mit einer Messrate von bis zu 2 Millionen Punkten pro Sekunde und einem erweiterten HDR Imaging System eine Erstellung von farbigen 3D-Punktwolken in weniger als zwei Minuten ermöglichen kann. Die neuesten Entwicklungen gehen aber in Richtung der Vereinigung der Funktionen eines Laserscanners mit jenen eines Tachymeters und einer Kamera. Es werden Totalstationen entwickelt, welche mit Scanfunktionen und integrierten Kameras ausgerüstet werden, zum Beispiel Leica Nova MS50 oder Trimble VX. [9] [10] [41]



Abbildung 2-25: Laserscanner Leica RTC360 im Einsatz [41]

Wesentliche Vorteile des Laserscanners sind die Schnelligkeit der Vermessung, BIM-Kompatibilität sowie die Einsatzmöglichkeit in für andere Geräte schwer zugänglichen Standorten. Für den Einsatz in der modellbasierten Abrechnung im Bereich des Verkehrswegebau besonders bei Großprojekten sind allerdings stationäre Laserscanner weniger gut geeignet wie Drohnen oder Mobile Mapping Systeme, da es bei langen Autobahnstrecken normalerweise um riesige Vermessungsflächen geht.

#### **Roverstab**

Ein Roverstab ist ein komplettes Satelliten-Positionierungssystem, welches aus drei Komponenten besteht: einer GNSS-Antenne, einem Feldrechner sowie einem Stativ, auf welchem diese montiert werden. Ein typisches System nutzt die amerikanischen GPS- und russischen GLONASS-Satelliten und kann in Echtzeit Korrektursignale über das Mobilfunknetz empfangen. Die Voraussetzung für eine präzise Arbeit ist ein freier Himmel sowie ein guter Mobilfunkempfang. In Gebieten mit schlechter Mobilfunkabdeckung kann lediglich mit den GNSS-Empfängern gearbeitet werden, welche eine Genauigkeit im Dezimeterbereich aufweisen. Mit Mobilfunk ist eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erreichbar. Das System ermöglicht eine direkte Kontrolle von Grenzen und

Einbauhöhen sowie eine schnelle Ermittlung von Flächen und Kubaturen. Punkte und Flächen können mithilfe des Systems auch ohne vorhandene Bezugspunkte abgesteckt werden, was wesentliche zeitliche Vorteile im Vergleich zu den klassischen Vermessungssystemen bringt. In Abbildung 2-26 ist ein kennzeichnendes Beispiel eines Roverstabs dargestellt: die Smart-Antenne *SPS585* von Trimble, welche speziell für Baustellenleiter zur Überprüfung des Baufortschritts und für geotechnische Dienstleister entwickelt wurde. [20] [33] [63]



Abbildung 2-26: Roverstab von Trimble, "SPS585 Smart-Antenne" [63]

### Drohnen

Die raschen Technologienfortschritte haben die Geräteeinsatzstruktur der luftgestützten Photogrammetrie und Laserscanning wesentlich beeinflusst. Wachsende preisliche Zugänglichkeit hat die UAV-Geräte, oder Drohnen, zu den Spitzenreitern von Vermessungsgeräten gemacht. Dank der Entwicklung der modernen Kamerasysteme ist die Genauigkeit bei dieser Art der Vermessung in den letzten Jahren wesentlich höher geworden. Ideales Einsatzgebiet für Drohnen sind größere Flächen, vor allem im schwierigen Gelände mit vielen Unebenheiten sowie sehr weitläufige Baustellen, was im Verkehrswegebau häufig der Fall ist. [38]

Alljährlich kommen eine Menge neuer Modelle mit unterschiedlichen Konfigurationen auf den Markt, die in der Bauvermessung eingesetzt werden. Ein Beispiel eines solchen UAV ist das Produkt von Leica Geosystems *AX20*, welches in Abbildung 2-27 abgebildet ist. Dieses Gerät hat eine Nutzlast von 4,3 kg und ist mit einer Sony 7RII Kamera für eine Flächendeckung von 10 ha ausgerüstet. Ein anderes Beispiel eines fertigen Systems ist der *RiCOPTER* von Riegl Laser Management Systems. Dieses Gerät ist mit einem Laserscanner ausgerüstet und hat eine Nutzlast von 6,5 kg. [13] [54]

Für die Datenerfassung mittels einer Drohne wird das Gerät selbst, die Kamera, eine Fernbedienung sowie ein ausgebildeter „Pilot“ benötigt. In der Praxis werden im Verkehrswegebau alle 200 m Passpunkte ausgelegt, die zur Georeferenzierung der von Drohnen erfassten Aufnahmen dienen. Wie bei den Totalstationen ist eine tägliche Justierung notwendig. Die Kosten für ein professionelles UAV mit entsprechender Konfiguration können im Bereich von mehreren tausend Euro liegen. In der Praxis kann eine Drohnenbefliegung für eine Straßenbaustelle in Österreich

## 2.5 Technologische Grundlagen

mit weiteren notwendigen Datenaufbereitungsschritten knapp unter 1.000 € pro Tag kosten. Darüber hinaus können Kosten für eine Flugplanungssoftware anfallen. Die Drohnenbefliegung einer 5-km-Strecke kann in einem Tag erledigt werden, zwei Tage werden für die nachfolgende photogrammetrische Auswertung benötigt, sowie zwei weitere Tage zur Ausdünnung der Punktwolken und weiteren Datenaufbereitung. Ebenso verändert sich die Rolle des Vermessers, da dieser bei einer derartigen Vermessung weniger Zeit im Feld verbringt und mehr Zeit der nachträglichen Datenverarbeitung im Büro widmet. Eine Bestandsdatenerfassung mittels Drohne liegt somit preislich in diesem Fall unter 5.000 €. [10]



Abbildung 2-27: Beispiel einer in der Bauvermessung eingesetzten Drohne (UAV flying plattform): Leica AX20 [38]

Während der Befliegung müssen unbedingt die gesetzlichen Vorschriften eingehalten werden, die sich von Land zum Land unterscheiden können. Im Wesentlichen gilt es jedoch folgendes zu beachten: die Flughöhe darf 100 m nicht überschreiten, in allen Fällen muss zum UAV eine freie Sichtverbindung gewährleistet werden und es sind keine Flüge über Straßen und Menschenmengen gestattet. [10]

Allerdings trotz vieler Vorteile sind Drohnen laut der Meinung der Experten noch nicht die idealen Einsatzgeräte für die modellbasierte Abrechnung. Das erste Problem ist die Datenverarbeitungsdauer. Die Rechnungen können erst eine Woche nach der Bestandsaufnahme gestellt werden, was nicht positiv auf die Liquidität des Unternehmens wirkt. Ein anderes Problem abrechnungstechnischen Charakters ist die ungleichmäßige Auslastung der Gerätekapazitäten. Die Abrechnung findet immer am Ende des Kalendermonats statt, woraus im Falle eines allgemeinen Einsatzes der Drohnen bei allen Baustellen eine übergroße Nachfrage für Drohnen entstehen kann. Diese Situation kann jedoch durch den Anschluss von anderen Geräten zur modellbasierten Bestandsaufnahme kompensiert werden.

### **Baugeräte**

Manchmal ist es nicht erforderlich, neue Geräte zu erfinden und diese einzusetzen, um ein Ziel mit einem innovativen Ansatz zu erreichen. Es reicht, sich nur umzusehen. Jede Verkehrswegebau-stelle strotzt von verschiedenartigen Baumaschinen, deren volles Potential nicht ganz entdeckt ist. In diesem Sinne geht es um den Einsatz der Maschinen nicht nur für ihre Hauptaufgaben, sondern auch für die Datenerfassung zur Ist-Modellierung, welche für die vollständige modellbasierte Abrechnung notwendig ist.

Im Zusammenspiel mit einem Maschinensteuerungssystem lassen sich viele Geräte zur Bestandsaufnahme anschließen. Von besonderem Interesse sind Hydraulikbagger, Radlader, Planierdraupe

und Grader. Ein Hydraulikbagger erfasst die Daten mithilfe der Spitze der Schaufel, das Verfahren ist in Abbildung 2-28 dargestellt. Im Falle einer Planierraupe ist für die Datenerfassung dementsprechend der Schild zuständig, welcher mit dafür notwendigen Antennen und Sensoren ausgerüstet wird.



Abbildung 2-28: Ein mit Trimble-Maschinensteuerungssystem GCSFlex ausgerüsteter Hydraulikbagger während der Bestandsaufnahme [82]

### Mobile Mapping

Mobile-Mapping-Systeme (auch CDS-Systeme - Car Driven Survey Systems) sind Vermessungssysteme, die eine Vermessung von straßennahen Bereichen über Scanner und Videosysteme vom fahrenden Fahrzeug aus ermöglichen. Ein System mit einem auf dem Dach eines Trägerfahrzeuges montierten Hochleistungsscanners ermöglicht die Datenerfassung auch bei fließendem Verkehr und einer hohen Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Die empfangenen Vermessungsdaten werden in das digitale Geländemodell umgewandelt, welches vor allem die für die modellbasierte Abrechnung notwendigen Massenberechnungen ermöglicht. Außerdem bietet Mobile Mapping virtuelle 360-Grad-Inspektionen an, welche zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit oder Lokalisierung von Rissen genutzt werden können. [4] [31] In Abbildung 2-29 kann das Mobile-Mapping-System gesehen werden, welches von Joanneum Research in Graz eingesetzt wurde.



Abbildung 2-29: Beispiel eines Mobile Mapping Systems „Pegasus: Two Ultimate Dualhead“ von Leica Geosystems, verwendet von Joanneum Research [77]

## 2.6 Konzepte der modellbasierten Abrechnung

In den letzten Jahren wurden vielfältige Systeme von verschiedenen Herstellern auf den Markt gebracht. Ein Beispiel ist der Trimble MX9, welcher mit zwei Lasern und einer effektiven Messrate von bis auf 2 MHz eine Scangeschwindigkeit bis zu 500 Scans pro Sekunde erreichen kann. Mobile Mapping Systeme zeichnen sich durch Kosteneffizienz und Robustheit bei der Erfassung der Informationen über hochdynamische Umgebungen wie Autobahnen und städtische Straßen aus, wo die Datenerfassung zuvor mühsam und sogar gefährlich für die Vermesser war. Die dynamischen Mobile Mapping Systeme könnten mit geringem Risiko für das Personal und geringerem Bedarf an Straßensperrungen auf das Gelände zugreifen. Im Bereich des Verkehrswegebbaus ermöglicht die Technologie eine durchgehende Vermessung, welche im Vergleich zum konventionellen terrestischen Laserscanner eine wesentliche Zeitersparnis bietet. Allerdings kann nicht ausschließlich mit Mobile Mapping gearbeitet werden, da für das System ein ständiger Durchgangsverkehr gewährleistet werden muss, was bautechnologisch bedingt nicht immer ermöglicht werden kann. [35] [73]

## 2.6 Konzepte der modellbasierten Abrechnung

Die modellbasierte Abrechnung repräsentiert in einfachen Worten eine Verbindung von den bereits eingeführten Themen: Abrechnung und Building Information Modeling. Wenn in einem Bauprojekt eine durchgängige BIM-basierte Planung erfolgt, können die Mengen und die Kosten der fertiggestellten Objekte aus dem BIM-Modell als modellbasierte Rechnung ausgegeben werden. [16] Dieses Konzept ist nicht nur eine Folge des Digitalisierungstrends, sondern auch eine zeitgemäße Lösung der aktuellen Abrechnungsprobleme, welche in Kapitel 2.2 kurz vorgestellt wurden. Das Konzept hat mehrere Ziele, zu denen vor allem die Zeitersparnis und die Qualitätssteigerung gehören. Mit der Personaloptimierung steigt der Aufwand pro Personaleinheit, was zu häufigen Verzögerungen der Rechnungsstellungen im Falle einer konventionellen Abrechnung führt. Als Folge kann die Liquidität des Unternehmens gefährdet werden. In einigen Fällen wird bei kleineren Mehrmengen wegen dem zu hohen Aufwand einer Neuberechnung seitens des Unternehmens auf Umsatz verzichtet. [15] Betreffend der Qualität, muss jede Abrechnung nachvollziehbar und prüfbar sein, was mit konventionellen Methoden in der gegenwärtigen Praxis nicht immer erreicht werden kann. Wegen der steigenden Projektkomplexitäten können in der Praxis bei manchen Projekten bis zu 14 % der Mengen in der Schlussabrechnung fehlen. Die Eliminierung dieser beiden Faktoren ist einer der grundlegenden Prioritäten der modellbasierten Abrechnung.

Die Idee der modellbasierten Abrechnung besteht unter anderem darin, dass nach jeder Abrechnungsperiode eine regelmäßige Aktualisierung des Modells erfolgt. Das heißt, es muss jeweils eine neue Vermessung, eine neue Auswertung der Daten und eine neue 3D-Modellierung sowie die Attribuierung durchgeführt werden. In der Regel muss es jeweils zum Ende des Monats erfolgen. Nach der jeweiligen Fertigstellung des neuen digitalen Geländemodells wird es mit dem 3D-Modell der vorherigen Periode verschnitten, woraus ein neues Modell entsteht, welches wiederum die relevanten Mengen von der letzten Abrechnungsperiode in hoher Genauigkeit liefert. Auf Basis dieser Mengen werden mittels der AVA-Software die entsprechenden EDV-Aufmaße erstellt und die Rechnungen gelegt. Das Verfahren hat trotz bedeutsamen Nachteilen bezogen auf die aufwendige und zeitintensive Datenbearbeitung bei der Modellerstellung ein enormes Einsatzpotential. Die Technologien entwickeln sich so schnell, dass der Übergang von der konventionellen zur

modellbasierten Abrechnung mit der Zeit noch lohnender werden muss. Dazu trägt sowohl der Einsatz von den im Bauwesen zuvor unbekanntem Produkten des Maschinenbaus wie Drohnen oder Laserscannern bei, als auch die Entdeckung des neuen Potenzials von den seit Jahren eingesetzten Baugeräten, welche für die Bestandsmodellierung eingesetzt werden können.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Methoden sind auf der eigenen Erfahrung in der modellbasierten Projektbearbeitung sowie auf mehreren Erfahrungsaustauschen mit Experten aus einem ausführenden Unternehmen basiert.

### 2.6.1 Abrechnung mit Querschnittsflächen und Einflusslängen

Ein Zwischenschritt von der konventionellen zur modellbasierten Abrechnung im Bereich des Verkehrswegebbaus ist die CAD-unterstützte Abrechnung oder Abrechnung mit Querschnittsflächen und Einflussbereichen. In CAD-Systemen wie AutoCAD oder BricsCAD werden die vom Auftraggeber bereitgestellten CAD-Querprofile monatlich mit den aktuellen Vermessungsdaten aktualisiert oder neuerstellt. Die Querschnittsflächen werden in jedem Querprofil als Polylinien gezeichnet und mithilfe von einem im CAD-Programmen integrierten Tool (LISP) ermittelt. Jedem Profil wird eine Einflusslänge zugeordnet, welche jedoch keine Krümmung der Gradienten berücksichtigt. Das Mengenermittlungsprinzip ist relativ einfach, die Querschnittsflächen der jeweiligen Schichten werden mit den entsprechenden Einflusslängen multipliziert und am Ende über alle Querprofile aufsummiert. Auf diese Weise ergeben sich die Gesamtmengen in Kubikmeter pro Schicht für die ganze Strecke. Alternativ kann die Abrechnung über einen Fertigstellungsgrad in Prozent laufen, damit die Querprofile jeden Monat nicht neuerstellt werden müssen. Der Prozess der Anwendung dieser Methode ist in Abbildung 2-30 zu sehen.

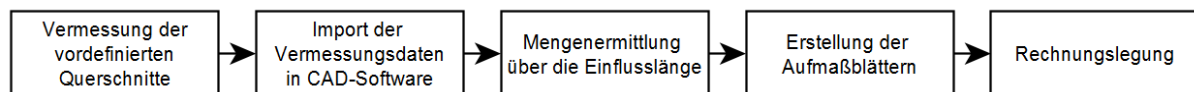


Abbildung 2-30: Allgemeiner Verlauf bei der "semi-modellbasierten Abrechnung" über die Querschnittsflächen und Einflusslängen

Der Vorteil dieser Methode liegt in der verhältnismäßigen Einfachheit. Es werden keine innovativen Vermessungsarten benötigt und sie verursacht keine hohen Investitions- sowie Schulungskosten, da in der Praxis fast jeder Bautechniker mit CAD-Systemen vertraut ist, welche normalerweise den meisten Mitarbeitern auch zur Verfügung stehen. Allerdings ist es noch keine modellbasierte Abrechnung, da kein Bauwerksmodell im Prozess eingesetzt wird und der Vermessungsaufwand bleibt trotzdem auf einem hohen Niveau. Aus diesem Grund generiert sich kein wesentlicher Mehrwert aus der Zeitersparnis, wonach das Konzept der modellbasierten Abrechnung unter anderem strebt.

Wenn die Querschnittsprofile nicht nur aus manuellen Feldaufmaßen oder 2D-Planungsunterlagen, sondern aus einem Bestandsmodell erzeugt werden und dieses Modell der jeweiligen Abrechnungszeitperiode entspricht, kann in diesem Fall die Abrechnung mit Querschnittsflächen und Einflusslängen doch als modellbasierte Abrechnung bezeichnet werden. Gemäß den Erfahrungen aus der Praxis, kann diese Art der Abrechnung in Schlussrechnungsqualität ausgeführt werden.

## 2.6 Konzepte der modellbasierten Abrechnung

### 2.6.2 Grundlegende Methode der modellbasierten Abrechnung

In den vorherigen Kapiteln wurde auf die Grundlagen von Building Information Modeling eingegangen, sowie die notwendigen Schritte von der Bestandsaufnahme bis zur Erstellung eines für die jeweilige Abrechnungsperiode aktuellen digitalen Geländemodells (DGM) dargestellt. In diesem Unterkapitel wird erläutert, wie ein Übergang von diesem DGM zu einem BIM-Modell stattfindet, welches unmittelbar für eine effiziente Mengendokumentation notwendig ist. Der Prozess dieser Methode ist in Abbildung 2-31 dargestellt.



Abbildung 2-31: Allgemeiner Verlauf bei der grundlegenden Methode der modellbasierten Abrechnung

Voraussetzung für eine erfolgreiche BIM-basierte Abrechnung ist ein konsistentes Planungsmodell. Das jeden Monat neu erstellte DGM wird in der Regel in die Software importiert, in welcher das Infrastrukturbauvorhaben in der Planungsphase modelliert wurde. Das importierte Geländemodell-Horizont wird mit dem Modell des geplanten Infrastrukturobjektes inkl. Böschungen verschnitten. Die Art der Erstellung des Abrechnungsmodells hängt davon ab, ob es um den ersten Abrechnungszeitraum geht, oder um einen darauffolgenden.

Wenn es um die erste Mengenermittlung für die erste Abrechnungsperiode geht, wird der importierte Geländemodell-Horizont mit dem vollständigen Bauwerksmodell verschnitten. Daraus entstehen 2 Modellkörper. Im Falle einer Anschüttung entspricht der untere Körper den Mengen, welche in entsprechendem Zeitraum abgerechnet werden (BZ 1, dargestellt mit roter Schraffur in der Abbildung 2-32), der obere Körper entspricht noch nicht gebautem Teil, welches in den nächsten Monaten abgerechnet wird. Im Falle eines Einschnittes ist es umgekehrt: der obere Körper entspricht den aktuell abzurechnenden Mengen, der untere den noch nicht gebauten Teilen. Nach der Verschneidung müssen beide Körper in Abhängigkeit von der AVA-Software entweder als vereinigtes Modell, oder als zwei verschiedene Modelle abgespeichert werden. [29]



Abbildung 2-32: Mengenermittlung für den ersten Leistungszeitraum bei der Anschüttung [29]

Die Mengenermittlung in weiteren Monaten funktioniert auf ähnliche Weise. Der importierte Geländemodell-Horizont wird statt mit dem originalen Planungsmodell mit dem Modell des letzten Leistungszeitraums verschnitten. Im Falle einer Anschüttung entspricht der untere Körper den Mengen, welche in diesem Zeitraum abgerechnet werden (BZ 2, dargestellt mit roter Schraffur in der Abbildung 2-33), der obere restliche Körper (M'2, dargestellt mit gelber Schraffur in der Abbildung 2-33), entspricht noch nicht gebautem Teil, welches in den nächsten Monaten abgerechnet wird. Der Modellkörper BZ 1 mit roter Schraffur aus der Abbildung 2-33 bezieht sich auf den vorherigen Leistungszeitraum und befindet sich außerhalb des aktuellen Verschneidungsmodells. Im Falle eines Einschnittes ist es umgekehrt: der obere Körper entspricht den aktuell abzurechnenden Mengen, der untere den noch nicht gebauten Teilen. [29]

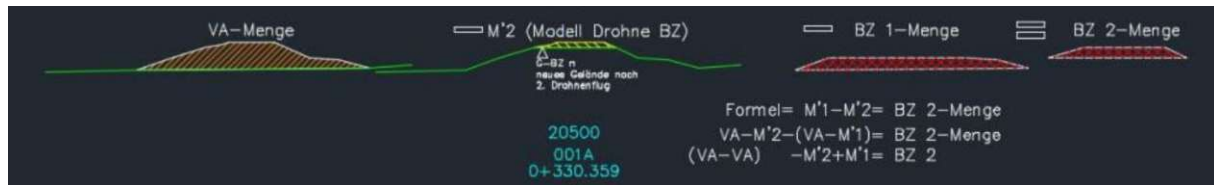


Abbildung 2-33: Mengenermittlung für den zweiten und weitere Leistungszeiträume bei der Anschüttung [29]

Auf diesem Prinzip stützt sich grundsätzlich das Konzept der Erstellung eines Abrechnungsmodells. Zum Ende von jedem Leistungszeitraum wird ein neues DGM erzeugt, hochgeladen und ein neuer 3D-Schnittvolumen-Körper erzeugt. Dieser 3D-Körper entspricht den Abrechnungsmengen pro Leistungszeitraum.

Das neuerzeugte BIM-Modell wird in weiterer Folge in die AVA-Software wie zum Beispiel iTWO hochgeladen, in welcher die Aufmaßblätter auf der Basis der ermittelten Mengen pro Leistungszeitraum erstellt werden. Mithilfe von den Aufmaßblättern können, wie bereits im Kapitel 2.3 beschrieben, Teilrechnungen an den AN gestellt werden. Während der ganzen Ausführungsphase werden auf diese Weise alle Abrechnungsmengen pro Leistungszeitraum für alle LV-Positionen von modellierten Objekten erfasst und mittels automatisch erzeugten Aufmaßblättern der AVA-Software in die Schlussrechnung übernommen. Eine detaillierte Ablaufbeschreibung folgt in Kapiteln 3 und 4.

### 2.6.3 Modellbasierte Abrechnung über Leistungswerte

Wenn aufgrund der Besonderheiten des Bauvorhabens eine monatliche Modellerzeugung nicht möglich oder dies nicht wirtschaftlich ist, kann die modellbasierte Abrechnung über die Leistungswerte durchgeführt werden. Durch die Anpassung der Leistungswerte des BIM-Modells ergeben sich die Ist-Zustände der fertiggestellten Objekte mit den zugehörigen Kosten und Mengen und können somit in die nachfolgende Abrechnung übernommen werden. [16] Der Prozess bei der Anwendung dieser Methode ist in Abbildung 2-34 abgebildet.

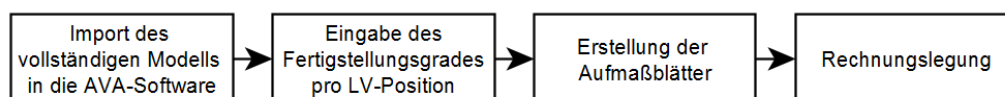


Abbildung 2-34: Allgemeiner Verlauf bei der modellbasierten Abrechnung über die Leistungswerte

Der Hauptunterschied zur „grundlegenden“ modellbasierten Abrechnung besteht darin, dass keine neuen digitalen Geländemodelle sowie keine neuen BIM-Modelle am Ende von jedem Leistungszeitraum, also monatlich, erstellt werden. Für diese Art der Abrechnung wird vor allem ein konsistentes 3D-Modell benötigt, welches bereits vor Anfang der Ausführung im Zuge der Ausführungsvorbereitung in die AVA-Software importiert werden kann. Nach der Verknüpfung mit dem Ausführungsterminplan und dem Leistungsverzeichnis wird somit ein 5D-Modell bereitgestellt, welches während der ganzen Ausführungsphase der Mengenermittlung für die Abrechnung dient. Nach der Bestimmung des prozentuellen Arbeitsfortschritts von den Vermessern und Bauleitern werden die Prozentsätze in der AVA-Software für alle LV-Positionen eingetragen, welche den modellierten Elementen entsprechen. Mit der Einwilligung seitens ÖBA und AG können die somit festgestellten Teilmengen in den Teilrechnungen monatlich abgerechnet werden.



## 3 Modellbasierte Abrechnung mit Drohnen

Dieses Kapitel ist dem Einsatz von UAV-Geräte, auch Drohnen genannt, in der modellbasierten Abrechnung im Verkehrswegebau gewidmet. Nach einer Einführung in das Thema wird der Ablauf dieses Verfahrens am Beispiel eines Pilotprojektes im Bereich Straßenbau ausführlich dargestellt, sowie seine Vorteile und Nachteile analysiert.

Mit der raschen Entwicklung des wissenschaftlichen und technologischen Fortschritts hat sich die modellbasierte Abrechnung mit dem Einsatz von Drohnen als effiziente Methode bewährt. In diesem Unterkapitel werden die prozessrelevanten Anwendungsfälle und das Ablaufkonzept vorgestellt sowie ein Überblick über den Systemaufbau gegeben.

### 3.1 Relevante BIM-Anwendungsfälle

Die modellbasierte Abrechnung mit Drohnen betrifft hauptsächlich drei Anwendungsfälle: AWF 1 Bestandserfassung, AWF 15 Baufortschrittskontrolle und AWF 17 Abrechnung von Bauleistungen.

Der Anwendungsfall Nr. 1 „Bestandserfassung“ ist die Erfassung der wesentlichen Aspekte des Bestandes mittels eines geeigneten Aufmaßes sowie deren Überführung in ein Bestandsmodell. Dafür werden Daten aus verschiedenen Quellen erfasst, zu denen bestehende Pläne, Geoinformationssysteme und geodätische Erfassungen wie Laserscanning und Photogrammetrie zählen. Im Falle einer Drohnenabrechnung ist die Datenquelle die UAV-Photogrammetrie. Dieser Anwendungsfall ist eine wichtige Voraussetzung für die Durchführung anderer Anwendungsfälle wie die Baufortschrittskontrolle oder die Abrechnung von Bauleistungen, da er dafür die digitalen Planungsgrundlagen liefert. [11]

Der Anwendungsfall Nr. 15 „Baufortschrittskontrolle“ beschreibt die Nutzung des Modells als Grundlage des Controllings. Durch die Umsetzung dieses Anwendungsfalles kann eine schnellere Dokumentation von Bereichen mit verzögerter Leistung bewerkstelligt sowie Terminüberschreitungen durch eine frühzeitige Entscheidung zu Gegenmaßnahmen reduziert werden. [11]

Anwendungsfall Nr. 17 „Abrechnung von Bauleistungen“ stellt die Nutzung des Modells zur Plausibilisierung der Bauleistungen und Abschlagsrechnungen dar. Durch die Umsetzung dieses Anwendungsfalles soll ein vereinfachtes und beschleunigtes Prüfverfahren ohne Medienbrüche für den Auftraggeber sowie ein verbesserter Zahlungsfluss für die Auftragnehmer gewährleistet werden. Als Grundlage für die Umsetzung dieses Anwendungsfalles kann die BIM-gestützte Baufortschrittskontrolle (AWF 15) herangezogen werden. [11]

### 3.2 Systemaufbau

Das zentrale Element der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen sind die Drohnen, oder UAV, deren Funktionalität im Unterkapitel 2.5.4 vorgestellt wurde. Es sind jedoch auch zusätzliche Systemelemente für den Prozess notwendig. Dazu gehören die Passpunkte, die der räumlichen Positionierung der erzeugten Punkte dienen sowie die Steuerungselemente der Drohnen, mit welchen

der Pilot die Befliegung überwacht. Außerdem ist das Vorhandensein geeigneter und miteinander kombinierbarer Software für alle Bearbeitungsphasen notwendig. Im ersten Schritt, auf welchen sich die Bestandserfassung bezieht, muss im Drohnensystem die Software zur Punktwolkenaufnahme vorhanden sein, während in der Phase der Datenauswertung die Software für die Punktwolkenauswertung und Modellerstellung notwendig ist. Zum Schluss muss die AVA-Software bereitgestellt werden, in der die Mengenermittlung stattfindet, auf deren Basis die Aufmaßblätter generiert werden, welche ihrerseits für die Rechnungslegung als abschließende Phase des Abrechnungsprozesses benötigt werden.

### 3.3 Allgemeine Beschreibung des Abrechnungsprozesses mit Drohnen

Das Konzept der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen impliziert eine Reihe von notwendigen Schritten, die zum Ende eines jeden Abrechnungszeitraums wiederholt werden müssen. Die Reihenfolge dieser Schritte, oder Phasen, ist in Abbildung 3-1 abgebildet. Dazu gehören die Bestandserfassung, die Modellerstellung, die Mengenauswertung, die Erstellung der Aufmaßblätter sowie die Rechnungslegung. Während sich die letzten vier Schritte von anderen Konzepten der modellbasierten Abrechnung kaum unterscheiden, ist die Bestandserfassung als erster Schritt des Ablaufs das spezifische Hauptmerkmal dieser modellbasierten Abrechnungsart.

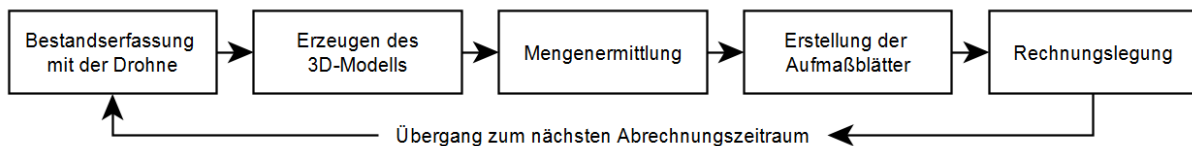


Abbildung 3-1: Ablauf der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen

Während der Bestandserfassung werden die Drohnenbefliegungen durchgeführt, welche die geometrischen Daten für jeden Abrechnungszeitraum liefern. Nach einer mehrstufigen Datenauswertung wird über ein DGM ein 3D-Abrechnungskörper erstellt. Die darauffolgende Mengenermittlung kann je nach Vereinbarung unter den Projektbeteiligten mit mehreren Programmen und unterschiedlichen Methoden durchgeführt werden. Die ermittelten Mengen werden im vierten Schritt für die Erstellung der Aufmaßblätter übernommen, ein Prozess, der in der AVA-Software stattfindet. Mit der Rechnungslegung für einen abgeschlossenen Abrechnungszeitraum findet der Abrechnungszyklus seinen Ausklang und zum Ende des nächsten Abrechnungszeitraums beginnt der gleiche Ablauf mit der neuen aktuellen Bestandserfassung.

Modellbasiert mit dem Drohneneinsatz abgerechnet werden im weiter vorgestellten Projekt nur die LV-Positionen, die zum Teilsystem Erdbau gehören. Die Vorteile der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen sind in der Praxis im Erdbau am meisten greifbar, da es sowohl das herstellungsbezogen zeitaufwendigste Teilsystem als auch das Teilsystem mit dem größten Volumen der abzurechnenden Mengen ist. Bei umfänglichen Baulosen wie beim Autobahnbau können sich die Erdbauarbeiten über mehrere Monate erstrecken. In solchen Fällen kann die modellbasierte Abrechnung mit dem Einsatz von Drohnen für den Auftragnehmer vorteilhaft sein.

#### 3.4 Erläuterung des Ablaufs anhand des Pilotprojekt A5 Umfahrung Drasenhofen

Mithilfe von BIM-Pilotprojekten werden neue Anwendungsfälle in der Praxis getestet. Die Pilotprojekte haben somit das Ziel, die gesamte Prozesskette zu erproben. [9] Eines der ersten Pilotprojekte mit dem Einsatz von Drohnen in der modellbasierten Abrechnung bei dem kooperierenden Unternehmen ist das Pilotprojekt A5 Umfahrung Drasenhofen. Auf Basis der im Rahmen des Projekts gesammelten Erfahrungen werden die Prinzipien der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen im Straßenbau vorgestellt.

##### 3.4.1 Projektvorstellung

Durch die EU-Erweiterung im Jahr 2004 hat die Süd-Nord-Verbindung durch den internationalen Grenzübergang Drasenhofen stark an Bedeutung gewonnen. Aus diesem Grund wurde von der ASFiNAG die Errichtung einer hochrangigen Straßenverbindung von Wien bis zur Staatsgrenze der Tschechischen Republik geplant. Über Drasenhofen verlaufen internationale Verkehrsverbindungen Richtung Tschechien und Polen. Die Umfahrung der Stadt Drasenhofen ist ein Bestandteil dieser Verkehrsverbindungen als Teil der Autobahn A5 und demzufolge Teil der Europastraße 461. Die neu gebaute Straße ist auf dem Satellitenbild in Abbildung 3-2 dargestellt. [26]

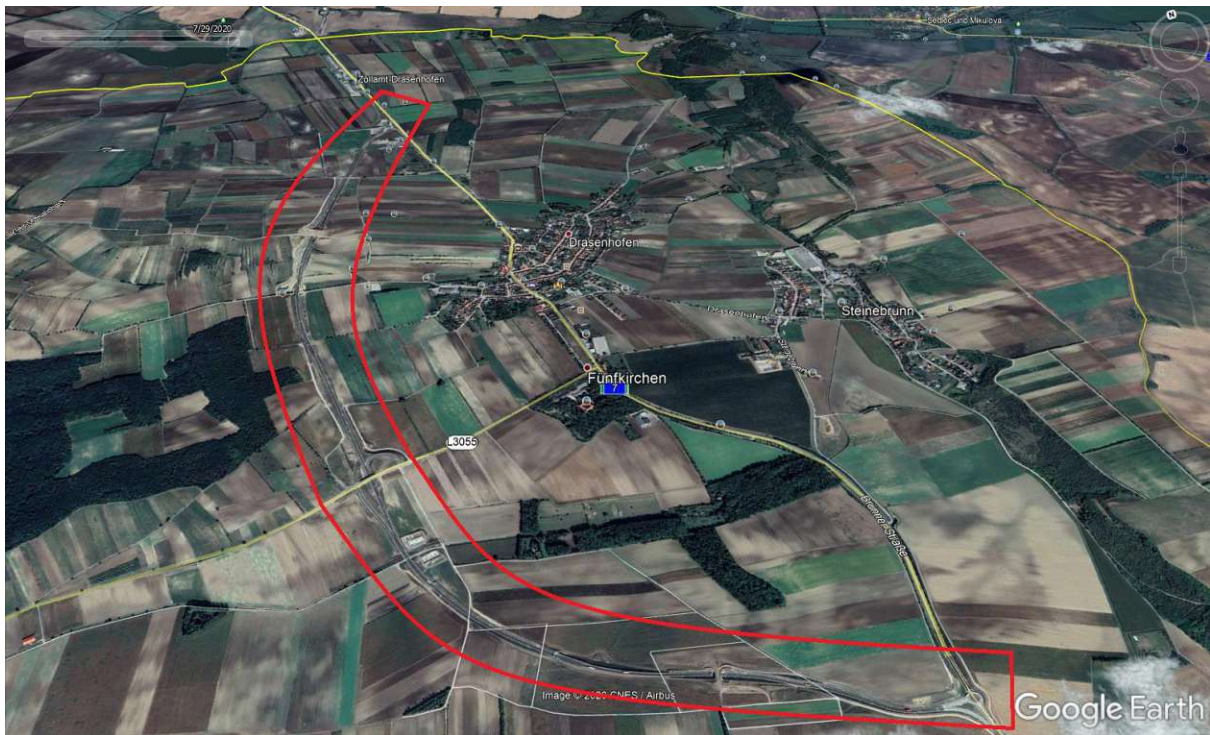


Abbildung 3-2: Satellitenbild des Projektgebietes von Google Earth [30] Das Projektbereich ist mit roter Linie umrandet.

Gegenstand dieses Projektes sind die Maßnahmen zur ersten Realisierungsstufe der Umfahrung von Drasenhofen. Im Rahmen des Auftrags wird die Umfahrung lediglich zweistreifig ausgeführt. Die Umsetzung des geplanten Vollausbau zu einer vollständigen Autobahn ist für einen späteren Zeitpunkt geplant. Die erbauten Ingenieurbauwerke berücksichtigen jedoch diesen Faktor bereits. Der Arbeitsumfang des Auftrags beträgt ca. 1,2 Mio m<sup>3</sup> der Erdbaumaßnahmen sowie 70.000 m<sup>2</sup> der Asphaltfläche. [28]

Zu den Zielen des Pilotprojektes gehören unter anderem die Stärkung der eigenen BIM-Kompetenz und die Überprüfung der Effizienz der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen. Im Rahmen der Ausführungsphase des Projektes wurde eine beträchtliche Anzahl der Anwendungsfälle betrachtet, zu denen die Planungsvariantenuntersuchung (AwF 2), die Visualisierung (AwF 3), die Terminplanung (AwF 12), die Logistikplanung (AwF 13), die Baufortschrittskontrolle (AwF 15), das Änderungsmanagement bei Planungsänderungen (AwF 16), die Abrechnung der Bauleistungen (AwF 17), die Bauwerksdokumentation (AwF 19) sowie die Maschinensteuerung (AwF 21) gehören. [26]

### 3.4.2 Angebotsphase

Das Projekt besteht aus einer ca. 5 km langer Straße, die nicht nur die Straßenbauarbeiten involviert, sondern auch Ingenieurbauwerke wie Brücken, Durchlässe und Grünbrücken. Die Bauwerke aus dem Bereich Ingenieurbau sowie die zum Straßenbau angrenzenden Bereiche wurden mit der Modellierungssoftware Civil 3D modelliert. In diesem Kapitel wird jedoch nur der Projektteil Straßenbau betrachtet, da der Bereich Ingenieurbau außerhalb des Rahmens dieser Diplomarbeit liegt.

In der Angebotsphase wurde das Modell der künftigen Straße in der Modellierungssoftware ProVI hergestellt. Diese Software wird speziell für die BIM-kompatible Planung von Infrastrukturobjekten eingesetzt. Die Basis für die Modellierung bildet ein digitales Modell, das aus den Daten der Drohnenbefliegungen entstanden ist. Weitere Grundlagen für die Modellierung des Projekts sind 2D-Planungsunterlagen des Planungsbüros, zu denen die Baubeschreibung und Ausführungspläne gehören. Das erstellte 3D-Modell bestand aus einer ca. 5-km-Trasse, sechs Landesstraßenanbindungen, zwei Auf- und Abfahrtsrampen, zwei Kreisverkehren, fünf Gewässerschutzanlagen und 22 Wirtschaftswegen. [28] [30]

### 3.4.3 Ausführungsphase

Der Baubeginn fand im April 2018 statt, die Verkehrsfreigabe im September 2019, die Gesamtfertigstellung inklusive Baustellenräumung erfolgte Ende Oktober 2019. Die Bauzeit betrug somit 19 Monate. Im Rahmen des Anwendungsfalls „Baufortschrittskontrolle“ wird das Modell für die Baufortschrittskontrolle als Grundlage des Controllings genutzt. Die Daten aus den Drohnenbefliegungen werden mit dem Modell und dem Bauzeitplan sowie mit den Daten aus der Logistik und dem Controlling abgeglichen. [26]

Zwischen Auftragnehmer, Auftraggeber und der ÖBA wurde vereinbart, die Abrechnung der LV-Positionen im Erdbau modellbasiert durchzuführen. Seitens der ÖBA wurde die Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit der Massen- und Mengenermittlung eingefordert. Im Rahmen des Anwendungsfalls „Abrechnung der Bauleistungen“ werden monatlich Drohnenbefliegungen organisiert, die der Erstellung von monatlichen Erdbaumodellen dienen. Aus diesen Modellen werden die Querschnittsprofile abgeleitet, die wiederum die Grundlagen der Abrechnung darstellen. Auf solche Weise konnten in Abstimmung mit konventionellen Abrechnungsmethoden die Erdbaupo-

### 3.5 Bestandserfassung

sitionen teilweise modellbasiert abgerechnet werden, was der Kombination aus in den Unterkapiteln 2.6.1 und 2.6.2 erläuterten Methoden entspricht. Eine vollständig volumenbasierte Leistungsmeldung über die AVA-Software wurde im Rahmen des Projektes nicht angewendet. [26]

Modellbasiert mit dem Drohneneinsatz abgerechnet werden im vorgestellten Projekt nur die LV-Positionen, die zum Teilsystem Erdbau gehören. Die Vorteile der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen sind in der Praxis im Erdbau am meisten greifbar, da es sowohl das herstellungsbezogen zeitaufwendigste Teilsystem als auch das Teilsystem mit dem größten Volumen der abzurechnenden Mengen ist. Bei umfänglichen Baulosen wie beim Autobahnbau können sich die Erdbauarbeiten über mehrere Monate erstrecken. In solchen Fällen kann die modellbasierte Abrechnung mit dem Einsatz von Drohnen für den Auftragnehmer vorteilhaft sein.

### 3.5 Bestandserfassung

Die Bestandserfassung mit dem Einsatz von Drohen besteht aus mehreren Phasen, die in Abbildung 3-3 dargestellt sind. Dazu gehören Flugplanung, Passpunktbestimmung, Befliegung sowie die nachfolgende Datenauswertung. Die Auslegung der Passpunkte sowie die Befliegung werden von den Vermessungstechnikern im Feld durchgeführt, wohingegen die Flugplanung und Datenauswertungsaktivitäten sich ins Büro dislozieren. Dadurch unterschieden sich die Vermessungsarbeiten bei der modellbasierten Abrechnung im Vergleich zur konventionellen, dass wenigstens die Hälfte der Aktivitäten im Büro durchgeführt wird.

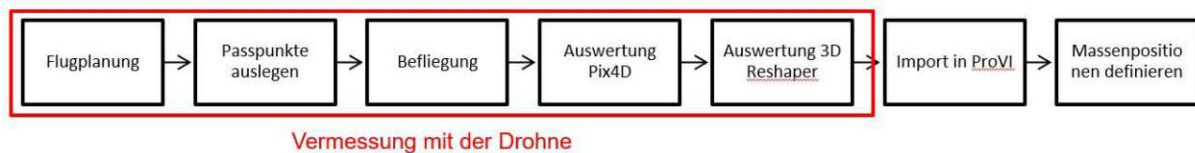


Abbildung 3-3: Ablauf der Bestandserfassung [30]

Nach einer vorläufigen Vorbesprechung zwischen den Projektbeteiligten folgt die Planung des Drohnenfluges. Dies beinhaltet die Ermittlung der luftfahrtrechtlichen Rahmenbedingungen im Befliegungsgebiet sowie die Einholung der entsprechenden Genehmigungen. Nach der Klärung der rechtlichen Fragen wird ein detaillierter Flugplan erstellt. Das Vermessungsgebiet wird in einem Raster überflogen, und in den vordefinierten Abständen werden hochauflösende Abbildungen erstellt. [67]

Vor jeder Befliegung müssen die Passpunkte bestimmt werden, damit die Lage und Höhengenaueigkeit der mit den Drohnen aufgenommenen Daten den Projektanforderungen entsprechen. Ein Beispiel eines Passpunktes ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Diese Punkte werden auf der zu vermessenden Geländeoberfläche markiert, die XYZ-Koordinaten mithilfe eines GNSS-Roverstabs mit der Genauigkeit von ca. 2 cm bestimmt und anschließend nach der Befliegung auf den Drohnenaufnahmen identifiziert. Die Voraussetzung dafür ist die Erkennbarkeit der Farbgebung und des Zentrums der Passpunkte in den Luftbildern. Auf solche Weise können die 3D-Messdaten genau georeferenziert und skaliert werden. [30] [67]



Abbildung 3-4: Passpunkt auf der zu vermessenden Geländeoberfläche [74]

Nachdem alle vorbereitenden Maßnahmen abgeschlossen sind, kann die Befliegung stattfinden. Die Befliegung erfolgt nach einer plangemäß festgelegten Route weitestgehend automatisiert und wird von dem Piloten überwacht. Die Flugdauer sowie die Wahl des Drohnenmodells sind von der Zielauflösung, der Gebietsgröße sowie dem Endprodukt abhängig. [67] Die Befliegung der gesamten Strecke des Bauwerks im Projekt Drasenhofen ist auf die Dauer eines Tages ausgelegt.

Für die Auswertung der aufgenommenen Daten wird wesentlich mehr Zeit benötigt als für die Befliegung selbst. Am Anfang werden die Passpunkte in der Analysesoftware eingelesen, aus einer Menge vieler Einzelfotos werden anschließend die 3D-Daten berechnet. Aus diesen 3D-Daten werden die Punktwolken mit den verorteten Punkten erzeugt, welche unter anderem in Formaten LAS oder ASCII-XYZ abgespeichert werden. Die Punkte besitzen einen Farbwert, wodurch sie die Eigenschaften der Geländeoberfläche realitätsnah wiedergeben. [67] Die Auswertung der Daten im Projekt Drasenhofen wurde in der Photogrammetrie-Software Pix4D durchgeführt, die darauffolgende Vermaschung in der Punktwolken-Verarbeitungssoftware 3DReshaper. Im Rahmen der Datenauswertung werden die Punktwolken von unerwünschten Objekten bereinigt. Die ausgewerteten Daten in Form von Punktwolken aus der letzten Befliegung nach der tatsächlichen Fertigstellung des Objektes können in Abbildung 3-5 gesehen werden. Die gesamte Datenauswertung nahm nach der jeweiligen Befliegung drei Tage im Anspruch. [30] Weitere Schritte sind die Erstellung eines digitalen Geländemodells und das Abschneiden eines 3D-Körpers aus diesem Modell. Die Besonderheiten dieser Prozesse sind in Unterkapiteln 2.5.2 und 2.6.3 beschrieben.



Abbildung 3-5: Beispiel der ausgewerteten Daten in Pix4D [30]

### 3.6 Abrechnungsmodellerstellung

Damit die erstellten digitalen Geländemodelle nicht von der Realität abweichen, ist ein ständiger Austausch der 3D-Vermessungstechniker mit den Abrechnungstechnikern notwendig. Während der Bereinigung der Punktwolken müssen die Abgrenzungen zwischen den verschiedenen Bereichen von dem Abrechnungstechniker kontrolliert werden. Die Nachbearbeitung der Drohnenaufnahme und ihre Transformation wird von den 3D-Vermessungstechnikern im Büro durchgeführt, aus diesem Grund sind die Informationeneinputs von der Baustelle über die Abrechnungstechniker von besonderer Wichtigkeit, damit die abzurechnenden Volumenkörper im nächsten Schritt von den Modellierern richtig erzeugt werden. Diese Inputs betreffen die Informationen zum Beispiel bzgl. den Mengen, die aufgenommen werden, jedoch erst später abzurechnen sind, zum Beispiel ein Materialzwischenlager, das sich im Bereich des Erdauftrags befindet. Die Maßnahmen sind notwendig, damit sich keine Lücken bzw. Überlappungen zwischen zwei Abrechnungsmodellen von zwei aufeinanderfolgenden Abrechnungszeiträumen herausbilden. Auf solche Weise muss die Konsistenzprüfung bereits in der Phase der Bestandserfassung stattfinden.

Da das Abrechnungsmodell den Zustand der Bauobjekte zum Ende des Monats darstellen muss, werden die Drohnenbefliegungen in der Regel am letzten Tag des Monats durchgeführt. Allerdings für die Teilrechnungen in den Abrechnungszeiträumen, die nur die Zwischenstände repräsentieren, könnten die Befliegungen auch einige Tage früher oder später als Ende des Monats durchgeführt werden, wenn es dafür benötigt wird, dass der Zwischenstand einer Schicht sich in einem definierten Zustand für die Abrechnung befindet. Am 31. August könnte sich zum Beispiel im Bereich des Erdauftrags wieder ein Materialzwischenlager befinden, das am 1. September abtransportiert werden soll. In diesem Fall könnte es sich lohnen, die Befliegung am 2. September durchzuführen, um somit den zusätzlichen Vermessungsdatenbearbeitungsaufwand zu verringern. Alternativ können die allgemeinen Drohnenbefliegungen doch am letzten Tag des Monats durchgeführt werden, wobei die Bereiche mit dem Datenmüllpotenzial einige Tage früher bzw. später mit einem Roverstab vermessen werden. Die Vermessungsdaten können mit den bereits bereinigten Vermessungsdaten von den Drohnen vereinigt werden und nach der Freigabe von dem Abrechnungstechniker in einem gemeinsamen DGM für die weiteren Bearbeitungsschritte freigegeben werden. Auf solche Weise wird außerdem ein wichtiger Schritt in Richtung der datenmüllfreien Projektbearbeitung gemacht.

### 3.6 Abrechnungsmodellerstellung

In Unterkapitel 2.6.2 wurde das Hauptkonzept vorgestellt, das zeigt, wie ein 3D-Modell aus dem DGM und einem original 3D-Ausführungsmodell so erzeugt wird, dass das neue 3D-Modell genau den Mengen entspricht, die für den aktuellen Abrechnungszeitraum passen. Dieses Konzept wird vollumfänglich im Rahmen des Projektes Drasenhofen für die Erstellung der 3D-Abrechnungsmodelle in der Modellierungssoftware ProVI angewendet. Nachdem das 3D-Modell der aktuellen Abrechnungsmengen mithilfe des aktuellen DGM erstellt wird, gibt es nun zwei Möglichkeiten, wie das erstellte 3D-Modell abgespeichert werden kann. Dies wird in Abbildung 3-6 ersichtlich.

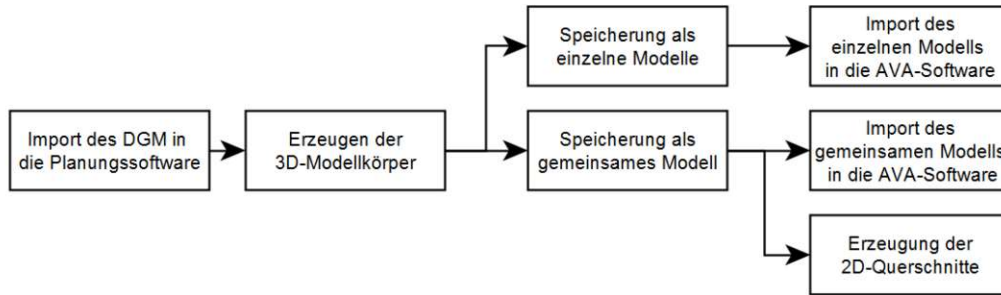


Abbildung 3-6: Mögliche Wege bei der Erstellung des Abrechnungsmodells

Aus Unterkapitel 2.6.2 lassen sich folgende Entwicklungen ableiten: Nach der Verschneidung des DGM mit dem original 3D-Ausführungsmodell bzw. dem Modell des vorherigen Leistungszeitraums entstehen zwei 3D-Modellkörper. Einer davon entspricht den Mengen der bereits ausgeführten Arbeiten, der Andere den noch nicht ausgeführten Mengen. Im einfachsten Fall werden beide 3D-Modellkörper als einzelne 3D-Modelle abgespeichert und nach jeder monatlichen Erzeugung in die AVA-Software einzeln hochgeladen. Diese Methode fordert aber eine erneute Element-LV-Verknüpfung in der AVA-Software, die bei Großprojekten sehr aufwendig ist.

Die zweite Möglichkeit ist ein monatliches Update des gesamten Modells in der AVA-Software, das aus dem Originalmodell stammt. Nachdem das aktuelle DGM jeweils monatlich in ProVI hochgeladen wird und demzufolge mit dem gesamten 3D-Modell verschnitten wird, werden beide erzeugten 3D-Modellkörper zusammen als ein gesamtes 3D-Modell in einer Datei abgespeichert. Die daraus entstandenen Teilelemente müssen jedoch nachattribuiert werden. Als zusätzliches Attribut kann den neuen Elementen der aktuelle Abrechnungszeitraum zugewiesen werden. Beim Import des aktualisierten Modells in die AVA-Software wird die Element-LV-Verknüpfung nicht zerstört, wodurch die richtigen Elemente mittels Filter in der AVA-Software unkompliziert den richtigen Aufmaßblättern zugewiesen werden können. Durch die ordentliche Attribuierung wird somit die Auffindbarkeit von relevanten Zwischenständen in weiteren Bearbeitungsschritten sichergestellt.

Wenn die Abrechnung über die Querschnittsprofile erfolgt, wie es im Projekt Drasenhofen der Fall ist, wird die zweite Variante bevorzugt, damit alle Schichten in den Querschnitten, die den Abrechnungszeiträumen entsprechen, einsehbar werden.

### 3.7 Mengenermittlung

Dieses Unterkapitel ist dem Schritt Mengenermittlung gewidmet. Nach einer Vorstellung verschiedener Varianten der Mengenermittlung wird auf die praktische Anwendung der Methoden eingegangen und der Ablauf in einer gängigen AVA-Software dargestellt.



## 3.7 Mengenermittlung

### 3.7.1 Varianten der Mengenermittlung

Die abzurechnenden Mengen können direkt in der Modellierungssoftware ermittelt, über eine Excel-Tabelle ausgegeben oder mittels einer AVA-Software bestimmt werden. Bei der Mengenermittlung in der Modellierungssoftware ProVI können die Mengen jedoch lediglich pro Element oder Elementtyp ermittelt werden, da noch keine Verknüpfung der LV-Positionen mit den entsprechenden Elementen in ProVI besteht und diese erst in der AVA-Software erfolgt. Eine andere Möglichkeit, die im Rahmen des Projektes Gebrauch gefunden hat, ist der Export einer Excel-Tabelle aus ProVI, in der die Flächen der Abtrags- bzw. Auftragsquerschnitte pro Querschnitt ausgegeben werden. Mit diesen Massen und der gegebenen Einflusslänge, die dem Abstand zwischen den Querschnitten entspricht, können die Abrechnungsmengen schichtweise und in Schlussrechnungsqualität ermittelt werden. Diese Varianten der Mengenermittlung sind in Abbildung 3-7 dargestellt.

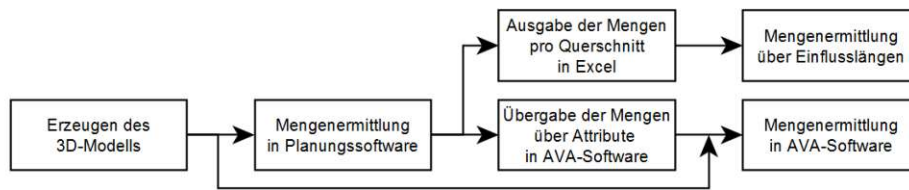


Abbildung 3-7: Varianten der Mengenermittlung

Eine genaue LV-positionsgerechte Mengenauswertung erfolgt jedoch erst in der AVA-Software. In den folgenden Abschnitten wird der Ablauf einer Mengenermittlung in iTWO vorgestellt. Da die Mengenermittlung in der Praxis in der Modellierungssoftware im Vergleich zur AVA-Software mit einer größeren Genauigkeit durchgeführt werden kann, können die Mengen der modellierten Elemente und Schichten in ProVI ermittelt und den Elementen als Attribute zugewiesen werden. Auf diese Weise können die Volumen- und Flächenwerte für alle Elemente weiterführend in iTWO über die Mengenabfrage aus den Attributen abgerufen werden. Die Vorteile der Mengenermittlung im Rahmen der modellbasierten Abrechnung mit Drohen gegenüber konventioneller Abrechnung bestehen in dem halbautomatisierten Ansatz, durch dem der Prozess ein großes Zeit- und Kostenoptimierungspotenzial bekommt.

### 3.7.2 Mengenermittlung im betrachteten Pilotprojekt

Ursprünglich sollte die Abrechnung der LV-Positionen mit den Bauleistungen aus dem Straßenbau mit konventionellen Methoden durchgeführt werden. Im Laufe der Projektbearbeitung entschieden die Projektbeteiligten jedoch, parallel zur konventionellen Abrechnung auch eine modellbasierte Abrechnung mit dem Einsatz von Drohen durchzuführen, um somit die Anwendbarkeit einer solchen Arbeitsweise in der Praxis zu testen. Daher werden im Rahmen dieses Projektes zwei erste Konzepte angewendet, die in den Unterkapiteln 2.6.1 und 2.6.2 vorgestellt wurden.

Insgesamt haben im Rahmen der Abrechnung der Erdmassen sieben Drohenflügen stattgefunden, sechs davon für die Abschlagsrechnungen und einer für die Schlussrechnung. Insgesamt er-

geben sich somit sechs Bezugszeiträume im Zeitraum von Juni bis Dezember 2018. Die letzte Befliegung im Rahmen der Abrechnung der Erdbauarbeiten fand im Februar 2019 statt und umfasst die restlichen Erdbaumengen für die Schlussrechnung.

Laut dem aktuellen ASFiNAG-Abrechnungsleitfaden kann eine 3D-Ist-Feststellung der Mengen durch Vermessung und Drohnenbeflug vorgenommen werden, wenn zur unabhängigen Plausibilisierung und einfachen Kontrolle die 2D-Querschnittsprofile aus dem Modell erzeugt werden. Die Anzahl und die Lage der Querschnittsprofile muss sinnvoll gewählt und gemeinsam zwischen Projektleiter, ÖBA und Auftragnehmer vorab abgestimmt werden. [12] Die Kontrolle im Projekt Drazenhofen wird auf folgende Weise durchgeführt: Nach jeder monatlichen Drohnenbefliegung sowie Erstellung der entsprechenden monatlichen 3D-Modelle in ProVI wurden im jeweiligen Monat die Querschnitte gemäß den vertragskonformen Abrechnungsplänen erstellt. In Abbildung 3-8 ist der orangefarbene 3D-Volumenkörper dargestellt, der der Abrechnungsmenge für einen Monat entspricht. In diesem Beispiel umfasst sie die Leistungen im Erdbau im Abrechnungszeitraum August 2018.

Auf jedem ausgegebenen Querschnitt des monatlichen 3D-Modells wurden zwei Linien abgebildet, wobei die erste der Höhe des Erdabtrags oder Erdauftrags der vorhergehenden Befliegung entsprach und die zweite der Höhe des Erdabtrags oder Erdauftrags der aktuellen Befliegung. Ein Beispiel für einen solchen Querschnitt ist in Abbildung 3-9 ersichtlich. Die Fläche, die zwischen diesen zwei Differenzlinien gezogen wurde, entspricht der Masse der letzten Abrechnungszeitperiode. Außerdem konnten die genauen Massen pro Querschnitt aus der Modellierungssoftware ausgegeben werden. Gemäß der Prozessbeschreibung in Unterkapitel 2.6.1 konnten aus den Schichtflächen in den Querschnitten die räumlichen Mengen pro Schicht ermittelt werden.

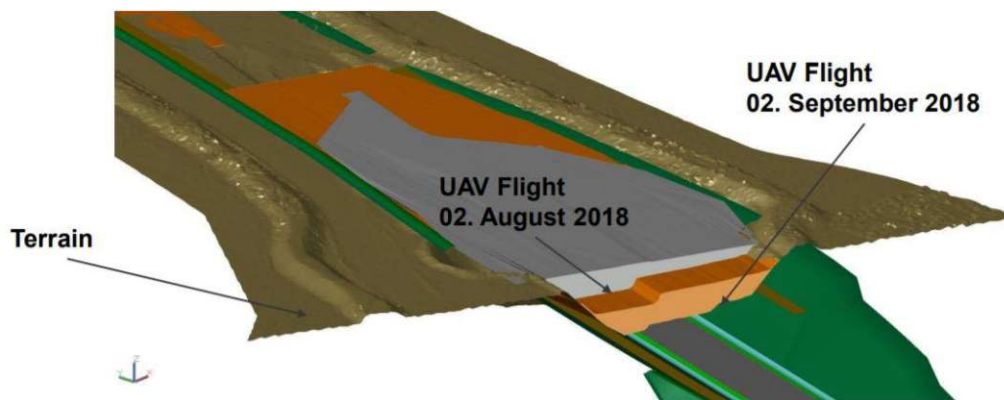


Abbildung 3-8: Erstellung des Einschnitts im Abrechnungszeitraum August, 3D-Ansicht [30]

### 3.8 Alternativer Ablauf in iTWO 2017

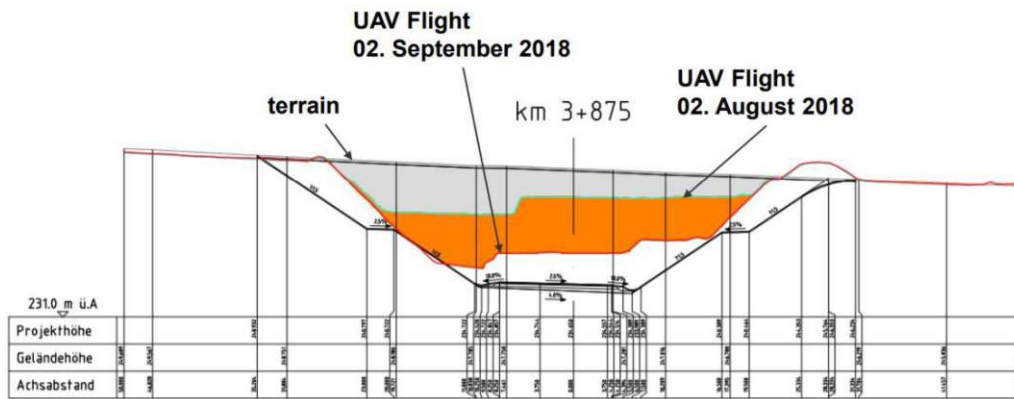


Abbildung 3-9: Erstellung des Einschnitts im Abrechnungszeitraum August, Querschnittsansicht [30]

### 3.8 Alternativer Ablauf in iTWO 2017

Neben der Auswertung der ausgegebenen Querschnittsprofile kann die Abrechnung direkt und vollständig über die AVA-Software iTWO durchgeführt werden. Der parallele Ablauf der Abrechnungsmengenauswertung zum bereits vorgestellten Ablauf wird am Beispiel eines Testprojekts in den untenliegenden Abschnitten vorgestellt.

#### 3.8.1 Vorbereitung des Projektes in der AVA-Software

Damit die modellbasierte Abrechnung inkl. der Mengenermittlung mit der AVA-Software iTWO 2017 durchgeführt werden kann, sind zunächst einige Schritte in der Angebotsphase notwendig. Dazu gehören die Erstellung eines 3D-Angebotsmodells des ganzen Bauvorhabens sowie die Transformation des Modells in ein 5D-Modell durch die Verknüpfung der Modellelemente mit Kosten und Terminen. Wenn iTWO erst in der Ausführungsphase im Projekt verwendet wird, übernimmt das 3D-Ausführungsmodell, das das gesamte Bauvorhaben abbildet und auf den Ausführungsunterlagen basiert, die Rolle des 3D-Angebotsmodells. In Abbildung 3-10 ist der musterhafte Ablauf dargestellt.

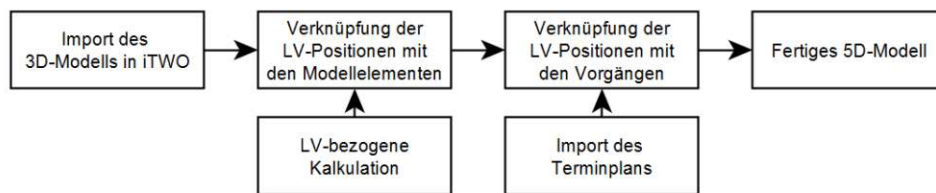


Abbildung 3-10: Vorbereitenden Maßnahmen aus der Angebotsphase in iTWO

Um eine modellbasierte Kalkulation zu ermöglichen sowie eine Basis für die Durchführung der modellbasierten Abrechnung zu schaffen, wird das fertiggestellte 3D-Angebotsmodell in iTWO hochgeladen. iTWO bietet die Möglichkeit, in der Angebotsphase nicht nur das Modell im ifc- oder cpxml-Format zu importieren, sondern auch das Leistungsverzeichnis und den provisorischen Terminplan hochzuladen sowie die vollständige Angebotskalkulation durchzuführen. Mit der Verbindung des 3D-Modells mit der verknüpften Kalkulation und dem verknüpften Terminplan be-

steht die Möglichkeit, bereits in der Angebotsphase eine 5D-Visualisierung des Bauablaufs zu gewinnen. Die zentralen Elemente bei der Verknüpfung der Modellelemente mit den Kalkulationspositionen sowie mit den Vorgängen im Terminplan in iTWO sind die LV-Positionen.

Die Identifizierung der Modellelemente kann über ein spezielles Kurzbezeichnungssystem erfolgen. Während der Modellerstellung in der Modellierungssoftware werden den Elementen spezielle Kurzbezeichnungen zugewiesen, welche den Zweck des Elementes berücksichtigen. Diese Kurzbezeichnungen werden für jedes Element des Volumenkörpers über ein definiertes Attribut zugewiesen, zum Beispiel über das Attribut „Bauteiltyp“. Für die Kurzbezeichnungen stehen mehrere Kurzbezeichnungssysteme zur Auswahl. Ein einsatzbereites Open-Source-System wurde von InfraBIM (Business Group von Building Smart Finland), die für die Weiterentwicklung des Einsatzes von Infrastrukturinformationsmodellierung in Finnland zuständig ist, entwickelt. Im Rahmen der Anwendung dieses Systems bekommt jedes Element ein Attribut mit einer 6-stelligen Nummer zugewiesen, wobei die ersten vier Ziffern dem Bauteiltyp und die letzten zwei Ziffern der Ordnungszahl des Elements vom gleichen Bauteiltyp entsprechen.

Eine andere einsatzbereite Möglichkeit ist die Verwendung von Drei-Buchstaben-Kurzbezeichnungen. Ein Element mit der Kurzbezeichnung EAB-3 entspricht zum Beispiel einem Erdabtrag, wobei ein Element mit der Kurzbezeichnung ATS-1, wie in Abbildung 3-11 dargestellt, einem Element der Asphalttragschicht entspricht. Auf diese Weise können die LV-Positionen über die Mengenabfrage-Formeln mit den entsprechenden Elementen verknüpft werden. Die Kurzbezeichnungen werden im Rahmen der Element-LV-Verknüpfung über die speziellen Objektauswahlgruppen-Formeln abgerufen, welche auf das Attribut mit den Kurzbezeichnungen des Modellierers zugreifen.

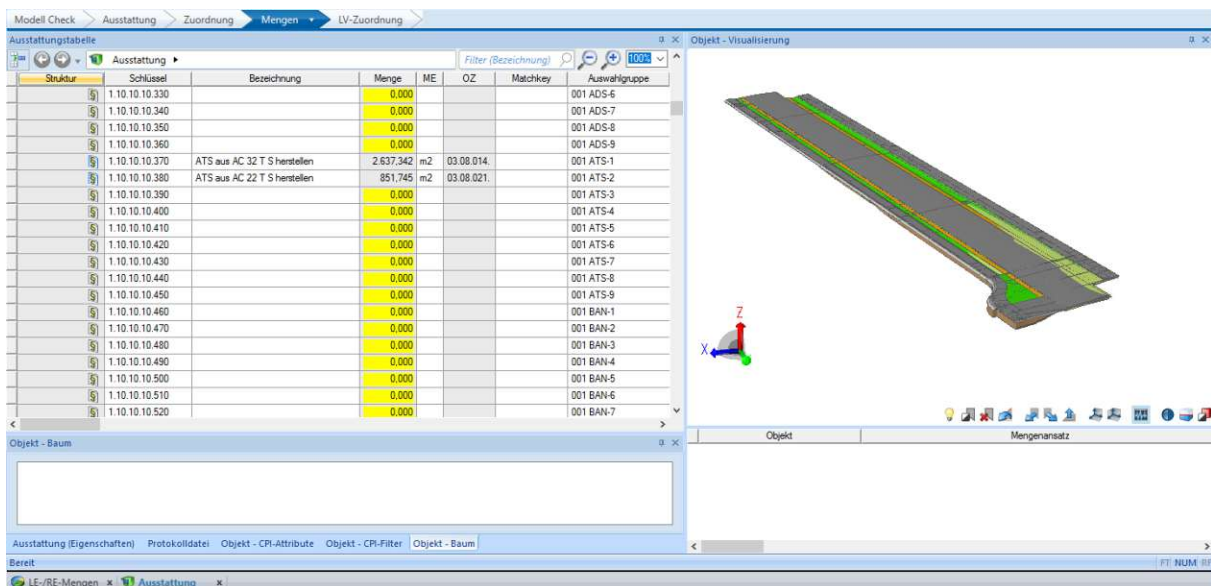


Abbildung 3-11: Modell und ausgewähltes Element mit den Kurzbezeichnungen (iTWO)

Nach dem Hochladen des 3D-Modells ins Programm, werden alle Modellelemente mit den entsprechenden LV-Positionen verknüpft. Da die Kalkulation auf den LV-Positionen basiert, wird eine Verbindung zwischen dem Modell und den Kosten geschaffen. Ein weiterer Schritt ist die Verknüpfung mit den im Terminplan erstellten Vorgängen. Einem Vorgang können mehrere LV-Positionen zugewiesen werden und eine LV-Position kann zwischen mehreren Vorgängen aufgeteilt

### 3.8 Alternativer Ablauf in iTWO 2017

werden. Wenn eine Element-LV-Verknüpfung zu diesem Zeitpunkt bereits stattgefunden hat, sind die Vorgänge mit den Elementen über die LV-Positionen verknüpft, wodurch eine Verbindung zwischen dem Modell und der Zeit geschaffen wird. In Abbildung 3-12 wird die LV-Position 03.04.001, die den Erdabtragsmassen entspricht, mit dem Vorgang „Erdabtrag“ verknüpft.

Wenn der Auftrag gewonnen wird, wird das iTWO-Projekt von einem Angebotsprojekt in ein Ausführungsprojekt umgewandelt. Dieses Ausführungsprojekt in iTWO mit den bereits verknüpften Modellelementen, den Kosten und den Plan-Terminen dient als Basis für die modellbasierte Abrechnung.

The screenshot displays the iTWO software interface. The top window shows a 'Vorgangsmo...' table with columns for 'Struktur', 'Schlüssel', 'Bezeichnung', 'Anfang', 'Dauer [Tag]', 'Ende', 'Objektaus...', and 'Positionsa...'. The table lists activities like 'Erdabtrag' and 'Erdauftrag' with their respective start and end dates. Below this is a 'Zugeordnete Teilleistungen' table with columns for 'Pos. Nr.', 'Kurztext', 'Teilmenge', 'Restmenge', 'Gesamtmenge', 'ME', and '%'. The bottom window shows a 'Zugeordnete Mengensplitt' table with columns for 'Objekte', 'Bezeichnung', 'Vorgang', 'Z...', and 'VA-Menge'. On the right, a 'Teilleistungs-Baum' tree shows a hierarchy of tasks, with '03.04.001. Boden profilgerecht oder nach Unterlagen' selected. A 3D visualization of a construction site is shown at the bottom right.

Abbildung 3-12: Vorgangsmo..., verknüpfter Termin und LV-Position (iTWO)

#### 3.8.2 Mengenermittlung in iTWO

In iTWO wird zwischen vier Mengentypen unterschieden: LV-, VA-, LE- und RE-Mengen. Die LV-Mengen sind die Leistungsverzeichnismengen, welche aus dem Leistungsverzeichnis übernommen werden und als Basis für die erste Kalkulation dienen. Die VA-Mengen sind die voraussichtlichen Abrechnungsmengen, die den modellierten Mengen einer LV-Position entsprechen und aus dem Modell gewonnen werden. Je höher das Level of Development und demzufolge die Genauigkeit des Modells ist, desto weniger weichen die VA-Mengen von den LV-Mengen ab. Die LE-Mengen sind die Leistungsmengen, während die RE-Mengen die Abrechnungsmengen sind. Diese beiden Mengentypen werden für die Abrechnung und das Controlling angewandt.

Nachdem das Ausführungsprojekt in iTWO erstellt wurde, ist es bereit für die Durchführung der abrechnungsbezogenen Prozesse. Das in der Modellierungssoftware ProVI erstellte und nachattributierte Modell, das einem Bezugszeitraum entspricht, wird in iTWO über das Programmmodul BIM-Qualifier in das Ausführungsprojekt im cpxml- oder ifc-Format importiert. Da sich die Kurzbezeichnungen der Elemente im neuen Teilmodell vom ursprünglichen Modell aus der Angebotsphase nicht unterscheiden, bleiben die Verknüpfungen der Elemente mit den LV-Positionen bestehen.

Wenn das Modell aus der Modellierungssoftware im ifc-Format ausgegeben wird, wird jedem Element des Volumenkörpers eine eigene einzigartige Nummer zugewiesen, die als Globally Unique Identifier (GUID) bezeichnet ist. Jedes Element im Modell bekommt somit eine strukturierte Identifikationsnummer (ID). Dieses Element-Identifikationssystem ist für die nachträgliche Bearbeitung des Modells im Rahmen der Erstellung von neuen Abrechnungsvolumenkörpern nach jedem Abrechnungszeitraum von besonderem Interesse. Die Frage ist, was mit der Elementen-ID passiert, wenn das Modell regelmäßig nach jedem Abrechnungszeitraum angepasst wird. Wenn beispielsweise ein großes Element, welches im originalen Ausführungsgesamtmodell dem Erdabtrag entspricht, zum Ende des ersten Abrechnungszeitraums laut dem im Unterkapitel 2.6.2 vorgestellten Verfahren in zwei Teile geschnitten wird dann entstehen zwei neue Modellelemente. Wird das neue Modell anschließend in die AVA-Software importiert, dann besitzen diese zwei neuen Modellelemente bereits eigene GUID-Nummern, die mit der GUID-Nummer des ursprünglichen Elements (in diesem Beispiel des Erdabtrags) nicht übereinstimmen. Wenn die Verknüpfung des Modells mit dem Leistungsverzeichnis statt der Anwendung des Kurzbezeichnungssystems über die Element-Identifikationsnummer erfolgt führt dies zu einem Problem. Ein möglicher Lösungsweg ist eine Diskretisierung der Elemente im ursprünglichen Ausführungsmodell auf kleinere Elemente mit bestimmten vergleichbaren Abmessungen, zum Beispiel könnte eine Erdabtragschicht so modelliert werden, dass die Schicht aus mehreren Würfeln mit der Kantenlänge von 10 cm besteht. Jeder Würfel erhält somit von Anfang an seine eigene GUID, die im Laufe der nachträglichen monatlichen Modellanpassungen nicht mehr geändert wird. Die Anpassung der Elemente erfolgt dabei durch das nachattribuieren der kleinen Würfelemente durch den Modellierer entsprechend dem jeweiligen Abrechnungszeitraum. Da in diesem Fall keine neuen Elemente erzeugt werden, bleibt die GUID der Kleinelemente unberührt. Auf diese Weise kann die Element-LV-Verknüpfung theoretisch auch über die GUID-Identifikationsnummer der Elemente erfolgen.

Damit die abzurechnenden Mengen zum Ende von jedem Abrechnungszeitraum möglichst genau bestimmt werden können, lohnt es sich aus Sicht des Autors die Elemente über das vorgestellte Kurzbezeichnungssystem und nicht über die GUID-Identifikationsnummer zu verknüpfen. Dank der Tatsache, dass die Kurzbezeichnungen über die Attribute der Elemente gespeichert werden, auf die über verschiedene Softwareprodukte zugegriffen werden kann, ist eine ganzheitliche Bearbeitung mit dem Open BIM Ansatz denkbar. Der Vorteil von der Verwendung des Kurzbezeichnungssystems besteht außerdem darin, dass die Modelle nicht unbedingt im ifc-Format ausgegeben werden müssen, sondern auch zum Beispiel im cpixml-Format ausgegeben werden können und ohne Vorhandensein eines strukturierten Element-Identifikationssystems trotzdem mit dem Leistungsverzeichnis für die weitere Generierung der Aufmaßblätter verknüpft werden.

Nach dem Hochladen des monatlichen Abrechnungsmodell in iTWO, werden die voraussichtlichen Abrechnungsmengen (VA), die aus den Attributen der modellierten Elemente stammen, überschrieben. Diese Überschreibung erfolgt durch eine neue Mengenberechnung mit dem neuen 3D-Modell und den bestehenden LV-Verknüpfungen. Die neuen VA-Mengen entsprechen ab diesem Moment jenen Mengen, die in der letzten Abrechnungszeitperiode ermittelt wurden. Diesen Mengen entspricht beispielsweise für den Abrechnungszeitraum August 2018 der orangefarbene 3D-Körper in Abbildung 3-8.

### 3.9 Erstellung der elektronischen Aufmaßblätter

In Tabelle 3-1 sind alle Arten der in iTWO 2017 verwendeten Mengen übersichtlich dargestellt. Im Programmmodul „LE-/RE-Mengen“, das in Abbildung 3-13 dargestellt ist, werden die VA-Mengen in die LE- und RE-Mengen übernommen, indem diese dem richtigen Berichtszeitraum zugewiesen werden. Nachdem die LE- und RE-Mengen abgespeichert sind, müssen die ursprünglichen VA-Mengen wiederhergestellt werden. Somit sind unter dem Punkt „LV-Mengen“ im Programm, weiterhin die Mengen aus dem ursprünglichen LV zu finden, während in den „VA-Mengen“ die Mengen aus dem originalen ganzheitlichen Modell zu finden sind, welche den Mengen der gesamten Bauzeitperiode entsprechen. In den „LE-/RE-Mengen“ werden jedoch genau die Mengen gespeichert, die dem aktuellen Abrechnungszeitraum entsprechen.

Tabelle 3-1: Arten der Mengen in iTWO 2017 und ihre Speicherorte

Programmmodul	Art der gespeicherten Mengen	Zeitbezug
„LV-Mengen“	Mengen aus dem Leistungsverzeichnis	Ganze Bauzeitperiode
„VA-Mengen“	Mengen aus dem ganzheitlichen Modell	Ganze Bauzeitperiode
„LE-/RE-Mengen“	Mengen aus dem aktuellen monatlichen Abrechnungsmodell	Aktueller Abrechnungszeitraum

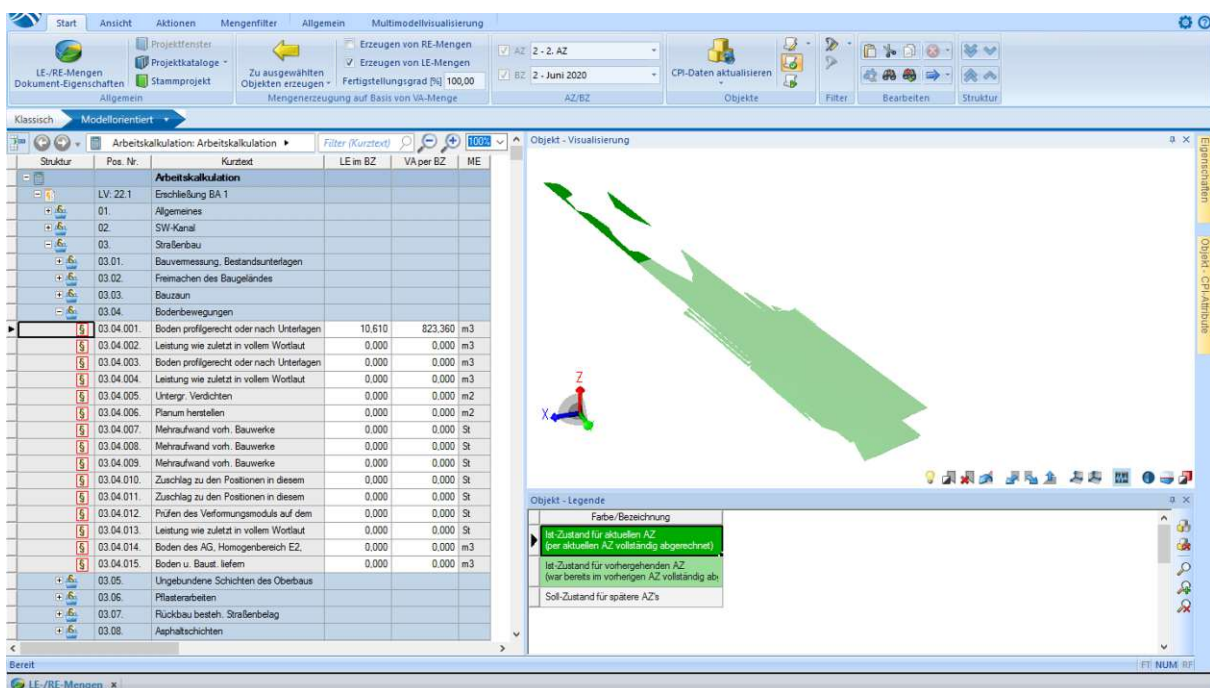


Abbildung 3-13: Modul LE-/RE-Mengen (iTWO)

### 3.9 Erstellung der elektronischen Aufmaßblätter

Nach der Ermittlung der Abrechnungsmengen müssen die elektronischen Aufmaßblätter für den aktuellen Abrechnungszeitraum erstellt werden. Unabhängig davon, ob die Mengenauswertung über das LE-/RE-Mengen-Modul in iTWO oder die aus dem Modell ausgegebenen Querschnitte erfolgte, kann die Erstellung der Aufmaßblätter wieder in iTWO erfolgen.

In einem Aufmaßblatt werden die zusammengehörenden Leistungen abgerechnet. [17] Wenn die Mengenauswertung in iTWO durchgeführt wurde, werden die Leistungen im Programmmodul „Aufmaß“, das in Abbildung 3-14 dargestellt ist, automatisch über die ausgewählten LV-Positionen mit den entsprechenden LE- oder RE-Mengen der Objekte den Aufmaßblättern hinzugefügt. Wenn die Auswertung über die Querschnittsflächen durchgeführt wurde, wie im Falle des betrachteten Pilotprojektes, werden die Leistungen manuell bzw. über die eingefügten Formeln in den Mengenzeilen berechnet.

Pos. Nr.	Kurztex	K	FN	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	5. Wert	Ergebnis	ME	Summe	RE/AZ	KT	PP ruckw	Blatt	Zeile
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	1.259=						1,259	m3		✓	1		1	000050
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0,001=						0,001	m3		✓	1		1	000100
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	78.123=						78,123	m3		✓	1		1	000150
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	-0,003=						-0,003	m3		✓	1		1	000200
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	449.02=						449,020	m3		✓	1		1	000250
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0.162=						0,162	m3		✓	1		1	000300
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	-0,002=						-0,002	m3		✓	1		1	000350
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0.646=						0,646	m3		✓	1		1	000400
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0.004=						0,004	m3		✓	1		1	000450
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	11.625=						11,625	m3		✓	1		1	000500
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0.005=						0,005	m3		✓	1		1	000550
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0.443=						0,443	m3		✓	1		1	000600
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	-0,003=						-0,003	m3		✓	1		1	000650
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0.86=						0,860	m3		✓	1		1	000700
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	41.272=						41,272	m3		✓	1		1	000750
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	-0,002=						-0,002	m3		✓	1		1	000800
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0.042=						0,042	m3		✓	1		1	000850
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	-0,002=						-0,002	m3		✓	1		1	000900
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0.469=						0,469	m3		✓	1		1	000950
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0.001=						0,001	m3		✓	1		1	001000
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	3.533=						3,533	m3		✓	1		1	001050
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	-0,003=						-0,003	m3		✓	1		1	001100
03.04.001.	Boden profiligerecht oder nach Unterlag	0	0.062=						0,062	m3		✓	1		1	001150

Abbildung 3-14: Modul "Aufmaß": hier werden alle zugewiesenen Mengen mit den LV-Positionen angezeigt (iTWO)

Mit dem Programmmodul „Abrechnung“ können die Aufmaßblätter mit den richtig sortierten Mengen gedruckt sowie die Abschlagsrechnungen und die Teilschluss- und Schlussrechnungen pro entsprechende Abrechnungszeitperiode erstellt werden. Ein Beispiel eines fertigen Aufmaßblattes für den ersten Abrechnungszeitraum des Projektes ist in Abbildung 3-15 zu sehen.

Der gesamte vorgestellte Ablauf von der Drohnenbefliegung bis zum Ausdruck der elektronischen Aufmaßblätter muss für jeden Abrechnungszeitraum wiederholt werden. Da die ÖNORM die Dauer eines Abrechnungszeitraums von einem Monat voraussetzt, wird dieser Prozess jeden Monat zum Monatsende wiederholt. Im Projekt Umfahrung Drasenhofen sollte er somit insgesamt sechs Mal wiederholt werden, wenn die Abrechnung des ersten Abrechnungszeitraums Juni über iTWO modellbasiert durchgeführt worden wäre.

Ein wichtiger Punkt ist die Möglichkeit der nachträglichen Anpassung der Mengen, nachdem diese bereits abgerechnet wurden. Wenn im Rahmen des nächsten Abrechnungszyklus vom Abrechnungstechniker festgestellt wird, dass für einzelne Positionen mehr oder weniger Mengen im vorherigen Abrechnungszeitraum abgerechnet wurden als abgerechnet werden sollten, können diese nachträglich angepasst werden. Die fehlenden bzw. überflüssigen Mengen werden somit im nächsten Abrechnungszeitraum ergänzt. Die erste Anpassungsmöglichkeit wäre die manuelle Eingabe der zusätzlichen Zeilen in das Aufmaßblatt. Im Fall der Anwendung von iTWO werden die



### 3.10 Prozessdiagramm

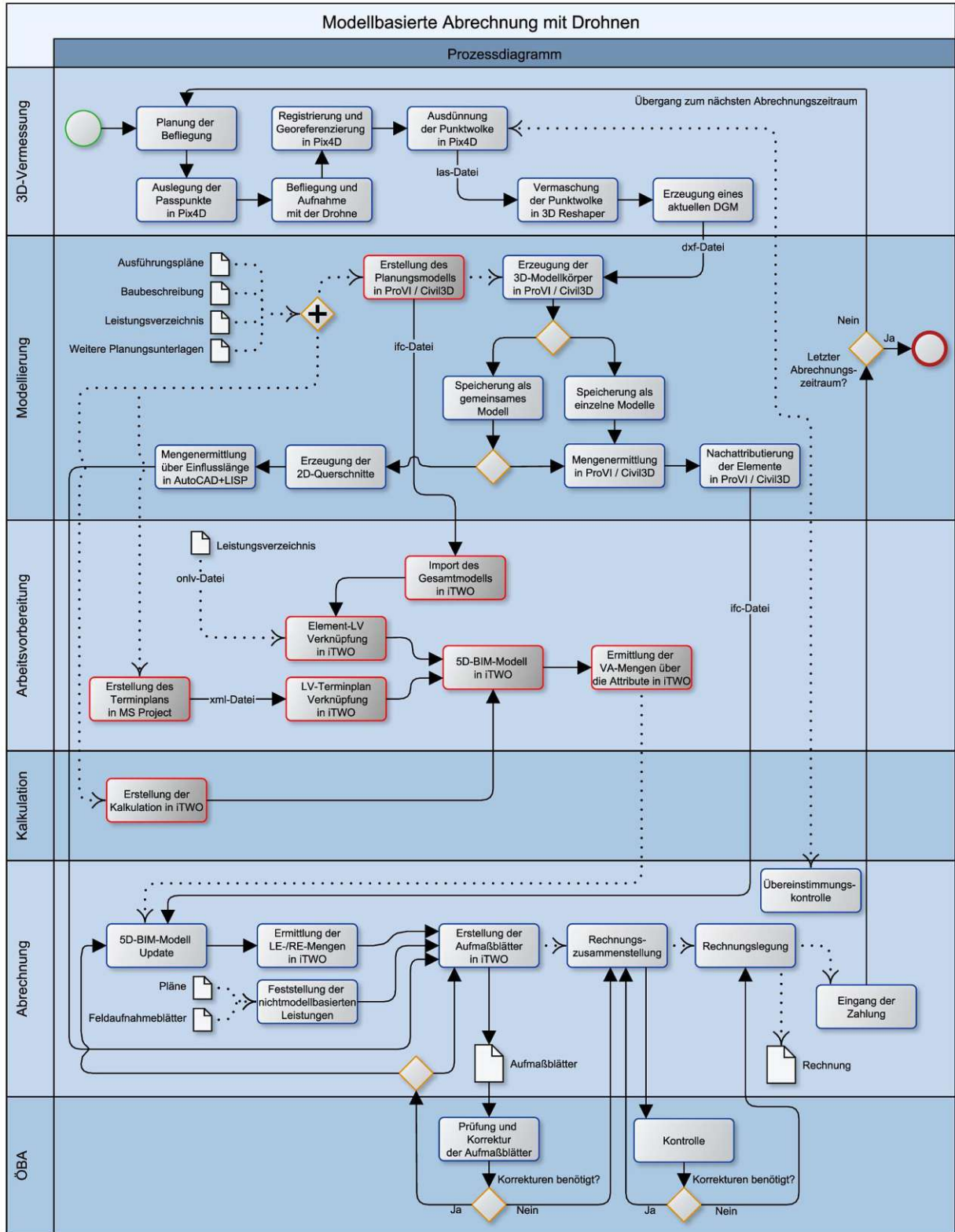
Mengen im Modul „Aufmaß“ zusätzlich im nächsten Abrechnungszeitraum hinzugefügt bzw. abgezogen. Die zweite Möglichkeit ist die entsprechend richtige Attribuierung der fehlenden bzw. überflüssigen Volumenkörper durch den Modellierer, bevor das neue Abrechnungsmodell in die AVA-Software hochgeladen wird. Wenn es zum Beispiel um ein fehlendes Volumen in der Erdauftragsschicht im zweiten Abrechnungszeitraum geht, könnte der Wert des Attributes „Abrechnungszeitraum“ für den zusätzlichen Modellkörper, dessen Mengen im zweiten Abrechnungszeitraum nicht abgerechnet wurden, beispielsweise „AZ2v2“ sein. Das würde bedeuten, dass sich der Modellkörper zwar im Abrechnungsmodell des dritten Abrechnungszeitraums befinden würde, aber sich zu dem zweiten Abrechnungszeitraum zählt. Für alle anderen neuen Modellkörper, die zum dritten Abrechnungszeitraum zählen, wäre der Wert dieses Attributes als „AZ3“ einzugeben. Dank einer klaren und eindeutigen Attribuierung der Elemente können somit die möglichen Unstimmigkeiten beseitigt werden.

<b>AUFMASSBLATT mit RE-Mengen</b>										
Prj.Nr. / Prj.Bez.:		200530 / Standardprozess Modellverknüpfung						Aufmaßblatt:		1
LV-Name / LV-Bez.:		22.1 / Erschließung BA 1				AZ: 1. AZ		Geprüft:		
Aufmaßblattname:		Ort: 3.1.2.27				Kostenträger:				
Pos.Nr. Zeilen-Nr.	KZ	FN	Formelbezeichnung Rechenansatz	PP	Hilfswert	Ergebnis	EH			
<b>03.04.001.</b>			<b>Boden profilgerecht oder nach Unterlagen</b>							
000050			1.259=			1,259	m3			
000100			0,001=			0,001	m3			
000150			78.123=			78,123	m3			
000200			-0,003=			-0,003	m3			
000250			449.02=			449,020	m3			
000300			0.162=			0,162	m3			
000350			-0,002=			-0,002	m3			
000400			0.646=			0,646	m3			

Abbildung 3-15: elektronisches Aufmaßblatt, wessen Werte auf den RE-Mengen basieren (iTWO)

### 3.10 Prozessdiagramm

Um die Zuordnungen der bereits vorgestellten Abrechnungsprozesse den Projektbeteiligten strukturiert darstellen zu können, werden diese in einem Prozessdiagramm abgebildet. In Abbildung 3-16 ist das Prozessdiagramm der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen ersichtlich. Die Prozessteile werden in den Rechtecken abgebildet und mit den Pfeilen verbunden, die der Richtung des Datenflusses entsprechen. Die Umrandungsfarbe spiegelt dabei die Zyklizität wider: die rote Farbe bezeichnet die Einmaligkeit der Prozessteile, während die blaue Farbe den sich wiederholenden Abrechnungsprozessteilen entspricht.



- Legende:
- Aktivität** (Red box): Einmalige Prozesse, die vor oder während dem ersten Abrechnungszeitraum stattfinden
  - Aktivität** (Blue box): Zyklische Prozesse, die sich in jedem Abrechnungszeitraum wiederholen
  - Sequence Flow**: Solid arrow
  - Message Flow**: Dashed arrow with fishhook symbol

Abbildung 3-16: Prozessdiagramm zur modellbasierten Abrechnung mit Drohnen

### 3.11 Zusammenfassung

Der Einsatz von Drohnen ist eines der wichtigsten digitalen Instrumente zur Erfassung des Baufortschritts für eine modellbasierte Abrechnung im Verkehrswegebau. Die Analyse der aktuellen und vor kurzem abgeschlossenen Pilotprojekte beim kooperierenden Bauunternehmen ergab, dass sich die meisten angewandten Konzepte der modellbasierten und semi-modellbasierten Abrechnung auf drohnenunterstützte Bestandsdatenerfassungen stützen.

Der BIM-Anwendungsfall „Abrechnung von Bauleistungen“ befindet sich in der Entwicklungsphase. Dies hat unter anderem den Grund, dass der Einsatz vollständig modellbasierter Abrechnungen nicht nur von den Kapazitäten des Bauunternehmens abhängt, sondern auch von äußeren Faktoren wie den Wünschen des Auftraggebers, dem Stand der aktuellen Normen und Richtlinien sowie weiteren gesetzlichen Regelungen. All dies hat einen direkten Einfluss auf den Einsatz von Drohnen im Bauablauf. Da die aktuellen Normen, die in Unterkapitel 2.2.4 vorgestellt wurden, sowie die Richtlinien des Auftraggebers eine Abrechnungskontrolle über die aus dem Modell ausgegebenen 2D-Querschnitte anordnen, konnten im Rahmen der Projektanalyse lediglich die Vor- und Nachteile dieser Art der modellbasierten Abrechnung analysiert werden. Eine vollständig modellbasierte Abrechnung, die die Erzeugung von 2D-Elementen eliminiert und durchgehend dreidimensional in allen Schritten durchgeführt wird, konnte unter den aktuellen Rahmenbedingungen nicht stattfinden. Aus diesem Grund kann derzeit lediglich eine Abschätzung bezüglich der zukünftigen Anwendbarkeit der getesteten Methoden auf Basis der gesammelten Erfahrungen von Seiten der Projektbeteiligten vorgenommen werden.

Die aus dem Modell ermittelten Querschnittsmengen wurden mit den Mengen verglichen, die mithilfe der konventionellen Abrechnungsmethoden ermittelt wurden. Es wurde am Beispiel von zwei Abrechnungszeiträumen festgestellt, dass die Abweichung der einzelnen Positionen zwischen 4 % und 35 % liegt. Die Abrechnung des Erdauftrags konnte jedoch im Vergleich zu den Bereichen des Erdabtrags genauer erfolgen, welche bei 4 % bis 8 % Abweichung lagen. Der Grund dieser Abweichungen liegt in der Verwendung ungefilterter Drohnenaufnahmen, nicht herausgefilterten Bewuchses sowie der technisch bedingten Verschiebung des Leistungszeitraums zum Beispiel aufgrund der Updates der Cloudsoftware. Mit der Eliminierung dieser Störfaktoren konnte die Abweichung der ermittelten Mengen des Erdabtrags im 2. Monat von 35 % auf 15 % reduziert werden.

Das Unterscheidungsmerkmal der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen befindet sich im Schritt der Bestandsaufnahme, der die meiste Zeit in Anspruch nimmt und somit auch die meisten Kosten verursacht. Aus diesem Grund wird die Rolle der Art der Mengenermittlung minimiert. Sowohl die vollständig modellbasierte Abrechnung mit einer dreidimensionalen Mengenermittlung als auch die im Projekt angewendete teilweise modellbasierte Abrechnung mit der Mengenermittlung über die Querschnittsprofile kann die Abrechnungsmengen in Schlussrechnungsqualität liefern. Der Vorteil einer vollständig modellbasierten Abrechnung über die AVA-Software besteht jedoch in der möglichen Zeitersparnis, da die elektronischen Aufmaßblätter die Mengen direkt aus dem Modell übernehmen können. Wie viel Zeit dabei tatsächlich gespart werden kann, bleibt jedoch eine Frage, die erst in Zukunft beantwortet werden kann, da dies auch davon abhängt, inwiefern äußere Rahmenbedingungen wie zum Beispiel zeitgemäße Standards diese Art der Abrechnung in der Realität zulassen werden.

Allerdings ist laut den Expertenmeinungen bereits heute bekannt, dass mit der modellbasierten Abrechnung die Ersparnispotenziale sowie die Mehrkosten den Bereichen expliziter zugeordnet werden können. Dies ist damit verbunden, dass die Leistungsstände einfacher abrufbar sind sowie die Beschreibungen von Abläufen besser dargestellt werden können. Der Mehrwert der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen besteht laut den Experten nicht nur in der Zeit- und Geldersparnis, sondern auch in der Möglichkeit der eindeutigen Zuordnung der Leistungen und demnach einer transparenteren Kommunikation mit anderen Projektparteien.

Zusammenfassend lohnt es sich, die konkreten Vor- und Nachteile der Methode im Vergleich zu einer konventionellen Abrechnung zu erläutern, welche in Tabelle 3-2 zusammengefasst sind. Bezüglich der Nachteile können die hohen Kosten sowie die lange Dauer des Prozesses genannt werden. Ein Abrechnungszyklus von der Bestandserfassung bis zur Aufmaßblätterstellung mit der Gesamtdauer von fünf Tagen kann Kosten von mehreren Tausend Euro für ein Projekt vergleichbarer Dimension verursachen, was die Kosten einer konventionellen Abrechnung in vielen Fällen übersteigt. Zu den Vorteilen der Methode gehört jedoch die Verringerung der Vermessungsarbeiten im Feld, da der Schwerpunkt der Bestandsaufnahme bei drohnenunterstützten Prozessen ins Büro verschoben wird. Als weiterer Vorteil gilt die Zufriedenheit aller Parteien (AN, AG und der ÖBA) im betrachteten Pilotprojekt mit der Vollständigkeit und der Transparenz der Abrechnungsergebnisse. Die nachfolgende Weiterentwicklung der Datenstrukturen und der Prozesse in Richtung klarerer Rahmenbedingungen sowie die Eliminierung technischer Fehlerquellen kann in Zukunft zu einer Standardisierung der drohnen-gestützten modellbasierten Abrechnung beitragen.

*Tabelle 3-2: Entdeckte Vorteile und Nachteile der Modellbasierten Abrechnung mit Drohnen*

Vorteile	Nachteile
Verringerung der Vermessungsarbeiten im Feld	Kosten der Bestandsaufnahmen
Genauigkeit der Bestandsaufnahmen	Dauer des Prozesses
Zufriedenheit der Projektparteien mit Transparenz und Ergebnissen	Ungleichmäßige Auslastung der Gerätekapazitäten

## 4 Integration der Maschinendaten in die modellbasierte Abrechnung

Dieses Kapitel ist den Baumaschinendaten und ihrer Anwendung in der modellbasierten Abrechnung gewidmet. Nach einer kurzen Einführung in das Thema werden die Möglichkeiten und Funktionen der Baumaschinensteuerungssysteme analysiert, welche eine Schlüsselrolle im Verfahren haben. Trotz der Ähnlichkeiten im Ablauf wird das Datenintegrationspotential auf Basis zweier verschiedener Gerätearten untersucht, damit wichtige Einzelheiten bei jeder Geräteart berücksichtigt werden können. In diesem Fall handelt es sich um eine Planierraupe und einen Hydraulikbagger. Besondere Aufmerksamkeit wird den Cloud-Kollaborationsplattformen zukommen, die der Ordnung im Datenaustausch dienen.

Im Bereich des Verkehrswegebbaus weist die Mengenermittlung für die Abrechnung wesentliche Unterschiede zu jener im Hochbau auf. Die Erdbaustrukturen betreffen oftmals große Geländeflächen. Erdbaumaßnahmen sind oft an komplexe Geländestrukturen gebunden, die eine große Anzahl an Messpunkten erfordern. Die zu erfassenden Ausführungsorte bei den Erdbaubaustellen sind nicht selten weit voneinander sowie vom Baubüro entfernt. Mit konventionellen Vermessungsmethoden ist eine Mengenermittlung somit nicht selten sehr aufwendig und auf den Einsatz von Baumaschinen (Baugeräte) kann in diesem Feld große Hoffnungen gesetzt werden. [18]

Im dritten Kapitel dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die modellbasierte Abrechnung mit Drohnen zum heutigen Stand eine konsistente und zuverlässige Art der Abrechnung im Bereich des Verkehrswegebbaus darstellt. Die Luftaufnahme ermöglicht es, beliebig große Baustellen abzudecken. Wenige positive Erfahrungen dürfen aber nicht ausreichen, wenn die Frage global im Rahmen der Perspektive eines flächendeckenden Einsatzes betrachtet werden soll. In einem solchen Fall wird das im Unterkapitel 2.5.4 erläuterte Problem der Nachfragesprünge für die Drohnenbestandsaufnahme zum Ende des Monats besonders aktuell. Nicht zu vernachlässigen ist zudem die Kostenfrage solcher Bestandsaufnahmen, die für Infrastrukturprojekte mit eher kleinerem Budget kritisch sein kann. Um diese potenziellen Unbequemlichkeiten auszugleichen, ist es notwendig, nach innovativen Alternativlösungen zu suchen. An dieser Stelle setzen Baumaschinen an, die zur Bestandsaufnahme für die Abrechnung Drohnen teilweise entlasten oder in einigen Baulosen sogar vollständig ersetzen können.

### 4.1 Grundlegende Ideen und Überlegungen

Die Bestandsaufnahme muss in erster Linie aufzeigen, dass die abgeschlossenen Arbeiten den Plänen und Qualitätsanforderungen entsprechen. Eine Bestandsaufnahme mit dem Einsatz der Maschinensteuerung ist zur Vermessung der Position oder eines Qualitätsfaktors einer fertigen Struktur oder Ausrüstung eines Systems bzw. einer technischen Struktur während der Arbeit geeignet. [14] Die Art der Bestandsaufnahme mit der Vermessung der Position wird wiederum nach der Art des Projektes in drei grundsätzliche Herangehensweisen unterschieden. Für lineare axiale Projekte wie im Straßen- oder Dammbau eignet sich die zweite Idee, die Vermessung von Querschnittsbruchpunkten am besten. Die dritte Idee, die Vermessung mittels Raster, findet bei flächigen Projekten wie dem Filteranlage- oder dem Flughafenbau Gebrauch.

#### 4.1.1 Idee 1: Wägesystem

Die erste Idee besteht darin, das Werkzeug der Baumaschine mit einer Waage auszurüsten, mithilfe derer das Gewicht des Schaufelinhaltens stetig und mit großer Genauigkeit erfasst wird. Dieses System findet seine Anwendung vor allem bei Baggern. Die Mengenermittlung wird direkt auf dem Baugerät durchgeführt und die abgetragenen oder zugelieferten Erdmassen werden über ein Wägesystem abgerechnet. Dabei wird jedoch lediglich das Gewicht der beladenen Erdmasse erfasst, nicht aber die Geometrie des Geländes. [51] Aus diesem Grund findet der Ansatz trotz seiner Innovativität und Besonderheit keine Anwendung in der modellbasierten Abrechnung, da letztere eine 3D-Geometrie-Erfassung voraussetzt. Ein anderes Problem ist mit der Logistik gebunden, da der richtige Zielort der Ausladung nicht immer zur Verfügung steht. In diesem Fall müsste das Material von dem Baugerät mehrfach transportiert werden, was die zusätzlichen Kosten verursacht.

#### 4.1.2 Idee 2: Querschnittsbruchpunkte

Die zweite Idee findet ihre Anwendung in erster Linie in Bereichen mit linearen Bauprojekten wie im Straßenbau oder Dammbau, in denen das Bauvorhaben als Achse mit veränderlichem Querschnitt betrachtet werden kann, wie zum Beispiel die Strecke einer Schnellstraße oder ein Lärmschutzdamm. Das Konzept besteht darin, dass die räumlichen XYZ-Koordinaten aller maßgebenden Querschnittsbruchpunkte des Baukörpers mit dem Werkzeug des Baugeräts erfasst werden. Unter Querschnittsbruchpunkten werden Punkte verstanden, an denen sich die Neigung ändert. Diese Punkte sind in Abbildung 4-1 mit Pfeilen markiert. Die Abmessungen an den Querschnittsbruchpunkten werden entlang der Trasse in Abständen von mindestens 20 m durchgeführt. Am einfachsten kann dieses Konzept mit einem Hydraulikbagger realisiert werden, da dank dem Aufbau des Hydraulikbaggers sein Werkzeug (Schaufel) einwandfrei mehrere relevante Punkte des Querschnitts erreichen kann. [14] Die damit erfasste Punktmenge mit den genauen räumlichen Koordinaten können mittels einer Nachbearbeitungssoftware in ein digitales Geländemodell (DGM) umgewandelt werden. Somit entsteht gemeinsam mit den Konzepten aus Unterkapitel 2.6 ein sich monatlich wiederholender Ablauf für die modellbasierte Abrechnung.

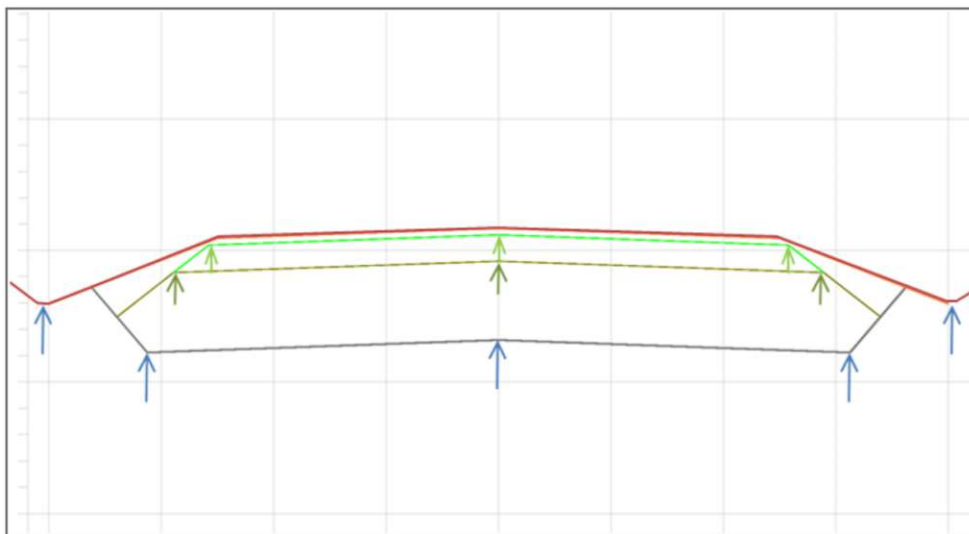


Abbildung 4-1: Querschnittsbruchpunkte der Struktur, die mit den Baumaschinen aufgenommen werden müssen. [14]

## 4.2 Relevante BIM-Anwendungsfälle

### 4.1.3 Idee 3: Raster

Laut dem dritten Konzept werden nicht nur die wichtigsten Querschnittsbruchpunkte erfasst werden, sondern alle Punkte der Bauobjektoberfläche, die mit dem Werkzeug des Baugerätes erreicht werden können. Während der Vermessung muss das Baugerät entlang einer geplanten Route fahren, damit sein Werkzeug alle Punkte der Oberfläche überfährt und somit deren XYZ-Koordinaten dank dem auf der Baumaschine aufgestellten GNSS-Empfänger erfasst. Am einfachsten lässt sich ein solches System mit einer Planierdraupe umsetzen. Dank der Breite des Schilde werden gleichzeitig mehrere Punkte entlang der Unterkante erfasst. Analog zum zweiten Konzept wird aus den Punkten monatlich ein DGM erzeugt, welches laut dem in Unterkapitel 2.6 vorgestellten Verlauf in die Abrechnung übernommen wird. Dieses Konzept kann Anwendung in Projekten mit flächigen Bauvorhaben wie dem Flughafenbau finden, in dem die Punkte nach einem im Voraus bestimmten Raster aufgenommen werden.

## 4.2 Relevante BIM-Anwendungsfälle

Zu den bereits im Unterkapitel 3.1.1 vorgestellten Anwendungsfällen Bestandserfassung, Baufortschrittskontrolle und Abrechnung von Bauleistungen tritt hier ein zusätzlicher Anwendungsfall AWF 21 „Maschinensteuerung“ ein, der der Überführung von Daten aus dem 3D-Modell in Formate der Maschinensteuerung gewidmet ist. Die Liste der Eingangsdaten für den grundlegenden Anwendungsfall Bestandserfassung wird um eine zusätzliche Position erweitert. Die Daten werden zusätzlich von den Baumaschinensteuerungssystemen erfasst. Die Funktionen des Anwendungsfalles Abrechnung von Bauleistungen weisen keine wesentliche Veränderung im Vergleich zur modellbasierten Abrechnung mit Drohnen auf.

## 4.3 Maschinensteuerungssysteme

In diesem Unterkapitel wird der Aufbau der Baumaschinensteuerungssysteme vorgestellt, deren Rolle in Unterkapitel 2.5.3 bereits kurz erläutert wurde. Diese Systeme sind für das Konzept der Integration von Maschinendaten in modellbasierte AVA-Prozesse ausschlaggebend, weshalb ihnen ein eigenes Unterkapitel gewidmet ist.

### 4.3.1 Systemaufbau

Die wichtigsten technologischen Komponenten eines Maschinensteuerungssystems sind das Geopositionierungssystem, eine eigene Software, das Datenkommunikationssystem und der Internetzugang. Das System muss außerdem mit physischen Komponenten (einer Hardware) ausgestattet werden. Zum minimalen Ausstattungspaket des Systems gehören ein Positionierungsdatenempfänger, ein Funkgerät, ein Onboard-Computer und verschiedenartige Sensoren, die nach der Art des Baugerätes ausgewählt werden. [53] Die Sensoren, die sich in einem robusten Stahl-schutzgehäuse befinden, werden an das Hydrauliksystem des Baugerätes angeschlossen und

übergeben an das System Signale über die relativen Winkel zwischen den Bestandteilen des Baugerätes, wie zum Beispiel den Winkel zwischen dem Ausleger und dem Löffelstiel bei einem Bagger. [51] [59]

Ein Maschinensteuerungssystem kann in zwei- und dreidimensionale Systeme unterteilt werden. Die 2D-Systeme dienen hauptsächlich der Überwachung einzelner Baugeräte und können keine 3D-Punktwolken erzeugen. Die 3D-Systeme arbeiten hingegen mit Oberflächenmodellen und haben eine erweiterte Funktionalität, weshalb im Rahmen dieser Arbeit weiterführend nur die dreidimensionalen Systeme in Betracht gezogen werden. Da die Systeme auf einer ähnlichen Hardware basieren, kann ein 2D-System einwandfrei auf ein 3D-System upgegradet werden. [53] [59]

Ein Maschinensteuerungssystem kann nach der Art der Steuerung klassifiziert werden. Die zwei am meisten verbreiteten Steuerungsarten sind die GNSS-Steuerung und die Tachymeter-Steuerung.

In einem System mit GNSS-Steuerung ist der Positionierungsdatenempfänger eine GNSS-Antenne. Zusätzlich wird eine Basisstation eingesetzt, die als Referenzstation für alle GNSS-Messungen dient. Während der gesamten Bauzeit darf diese Station nicht bewegt werden, da deren GNSS-Daten als Korrekturwerte bei jeder Messung verwendet werden. Es gibt jedoch eine andere Möglichkeit, die GNSS-Korrekturdaten zu liefern: ein virtuelles Referenzstationsnetz. Mit den gesendeten Näherungswerten des GNSS-Empfängers kann über das virtuelle Referenzstationsnetz eine virtuelle Basisstation berechnet werden. Somit können die Referenzdaten ohne Basisstation mit gleicher Genauigkeit bestimmt werden. Wichtig ist dabei, dass ein ständiger Datenempfang gewährleistet werden kann. [53]

In einem System mit Tachymeter-Steuerung übernimmt ein UTS-Target (UTS – universal total station) die Rolle des Positionierungsdatenempfängers. Ein UTS-Target kann die Positionierungssignale eines nebenstehenden Tachymeters übernehmen. Das UTS-Target wird auf dem Gehäuse der Baumaschine installiert. Der Tachymeter bestimmt die Position des Baggers mit großer Genauigkeit und übermittelt die Daten per Funk an den Onboard-Computer. [59]

### 4.3.2 Anwendungskonzept

Die modellbasierte Mengenermittlung mittels Maschinensteuerungssystem richtet sich nach den Methoden der Tachymetrie mit einer Totalstation oder GNSS-Vermessung mit einem Roverstab. Diese Vermessungsmethoden können ebenfalls in der modellbasierten Mengenermittlung eingesetzt werden. Da sie oft in der Praxis als Ergänzung oder Kontrollinstanz zur maschinengesteuerten Vermessung verwendet werden, wird deren Arbeitsweise kurz vorgestellt.

Mit dem in Unterkapitel 2.5.4 vorgestellten Roverstab werden die Koordinaten der Punkte, die das Gelände widerspiegeln, über Satellitensignale aufgenommen. Wenn eine große Fläche aufgenommen wird, muss die Aufnahme in einem bestimmten Raster erfolgen, damit alle maßgebenden Punkte erfasst werden. Die aufgenommenen Punkte werden in weiterer Folge in einer Bearbeitungssoftware vermascht, indem die Punkte zu Bruchkanten verbunden werden. Auf solche Weise entsteht ein digitales Geländemodell. Der Unterschied zu dem in Unterkapitel 2.5.2 vorgestellten Ablauf der DGM-Erstellung besteht darin, dass ein GNSS-Roverstab weniger Punkte liefert, wie die



## 4.3 Maschinensteuerungssysteme

Punktwolke einer photogrammetrischen Aufnahme. Eine tachymetrische Aufnahme erfolgt nach dem gleichen Prinzip, aber mit dem Unterschied in der Genauigkeit, welche bei der Tachymetrie höher als bei den GNSS-Vermessungen ist. In der Höhe können die Abweichungen bei einer GNSS-Vermessung bis zu 4 cm betragen. Für die Bestandsaufnahmen im Erdbau ist diese Genauigkeit ausreichend. [57] [59]

Eine maschinengesteuerte Mengenermittlung unterscheidet sich dadurch, dass der GNSS-Empfänger nicht manuell umgestellt werden muss, sondern auf der Baumaschine montiert wird und die notwendigen Vermessungen während der unmittelbaren Erfüllung der Hauptfunktionen der Maschinen durchgeführt werden können. Mithilfe von zusätzlich angeordneten Sensoren und GNSS-Antennen bzw. Tachymeter-Signalempfängern wird das Gelände während dem Fahrprozess vom Werkzeug der Baumaschine aufgenommen und die absoluten XYZ-Koordinaten aller erfassten Punkte in einer Punktwolke gesammelt. Diese werden vom Steuerungssystem an die Bearbeitungseinheit weitergegeben. Aus der Punktwolke entsteht in einer speziellen Software nach dem bereits bekannten Szenario ein digitales Geländemodell, welches laut der Ablaufbeschreibung in Unterkapitel 2.6 für die Erstellung eines Abrechnungsmodells benötigt wird.

### 4.3.3 Einsatzgebiet

Die Bestandsaufnahmen mit Maschinensteuerungssystemen werden an Schnitten, Erdböschungen von Straßen sowie an Druckrohren, Kabelschutzrohren, Kabeln und Lichtmastfundamenten durchgeführt. Außerdem können die Bestandsaufnahmen an Bodenstrukturen wie Bettungen und Hinterfüllungen von Wasserbehältern, Schächten, Freispiegelleitungen, Gruppen von Kabelschutzrohren und ähnlichen Anlagen über die Maschinensteuerung durchgeführt werden. Diese Bestandsaufnahmen können außerdem in Tragschichten, Schotterbettschichten im Eisenbahnbau und Oberbauschichten durchgeführt werden, wenn nachgewiesen werden kann, dass die Genauigkeit des Maschinensteuerungssystems die Genauigkeitsanforderungen erfüllt. [14]

### 4.3.4 Zuständigkeiten

Die Maschinisten werden vor der Arbeit in Orientierungssitzungen sowie während der Arbeit angeleitet, damit sie die Vermessungen richtig durchführen. Die Maschinisten erhalten eine Anweisungskarte oder ein Bild, das in die Kabine mitgenommen wird. Diese zeigen die Vermessungsorte der Baumaschine. Die Bauleitung und die für die Maschinensteuerung verantwortliche Person überwachen die Bestandsvermessungen. Die Prozessleitung fällt in den Verantwortungsbereich des BIM-Koordinators vor Ort. [14]

### 4.3.5 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherungsprüfungen der Maschinen werden durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Positionierungsgenauigkeit des Maschinenwerkzeuges im Koordinatensystem der Baustelle den elementspezifischen Genauigkeitsanforderungen entspricht. Diese Prüfungen sind mindestens einmal pro Woche mit einer Totalstation oder einem GNSS-Empfänger durchzuführen, wobei die Ergebnisse zu dokumentieren sind. Wenn eine Qualitätssicherungsprüfung ergibt, dass die Ge-

naugigkeit nicht innerhalb der festgelegten Toleranz liegt, wird die Kalibrierung des Maschinensteuerungssystems benötigt. Sobald die Genauigkeitsanforderungen erfüllt sind, kann die Arbeit fortgesetzt werden. Die Prozessleitung fällt in die Verantwortung des BIM-Koordinators vor Ort. [14]

Die Genauigkeit der Maschinensteuerungssysteme ist immer zu überprüfen, wenn die Maschine erstmalig auf der Baustelle eingesetzt wird. Für Baumaschinen, welche beim Bodenaushub und bei der Erstellung von Schüttungen, Drainageschichten und Sauberkeitsschichten eingesetzt werden, werden die Prüfungen einmal in der Woche durchgeführt. Zu diesen Geräten gehören Bagger, Radlader, Planiertrauen und Walzen. Die Baumaschinen hingegen, die Tragschichten, Schotterbettschichten sowie Bahnkörper im Eisenbahnbau fertigstellen, sind täglich zu kontrollieren. Dazu gehören Grader, Radlader sowie Fertiger. [14]

Das Ergebnis der Prüfung ergibt sich aus einem Vergleich zwischen den Positionswerten des Maschinensteuerungssystems mit den Testpunktkoordinaten oder mit Koordinaten, die mit Vermessungsgeräten bestimmt wurden. Zusätzlich wird die Qualität eines fertigen Elements durch stichprobenartige Kontrollen mit einer Totalstation oder einem GNSS-Roverstab geprüft. [14]

Die Prüfung wird vom Vermesser in Zusammenarbeit mit den Maschinisten der Geräte durchgeführt. Die Bauleitung muss die Ergebnisse der Prüfung erhalten. Der gesamte Prozess fällt in die Verantwortung des BIM-Koordinators vor Ort. [14]

### 4.3.6 Produktanalyse

Aus mehreren Maschinensteuerungssystemen können vier Entwickler als Marktführer im Bereich der Maschinensteuerung bezeichnet werden: Trimble, Leica Geosystems, MOBA Automation und Topcon. Auf diese Systemhersteller und ihre relevanten Produkte wird in diesem Unterkapitel ausführlicher eingegangen.

Trimble ist ein Hersteller für geodätische Messinstrumente sowie fertige Systemlösungen zur Maschinensteuerung und Bauvermessung, welche Positionierungstechnik, Mobilfunkkommunikation und Software kombinieren. [70] Über eine intensive Kooperation mit den führenden Baumaschinenherstellern sind neuproduzierte Maschinen für eine vernetzte Baustelle einsatzbereit, da die notwendigen Sensoren und Hydraulikkomponenten bereits in der Produktionsphase in die Maschinen eingebaut werden. Als relevante Lösungskombinationen für die modellbasierte Abrechnung über die Maschinensteuerung können die Systeme GCS900 und Earthworks betrachtet werden.

Ein weiterer Hersteller ist die Leica Geosystems AG mit dem Sitz in Heerbrugg, Schweiz. Leica Geosystems gehört zu den Pionieren der Vermessungsindustrie und stellt eine breite Palette von Produktlösungen von optischen, mechanischen, elektronischen und elektrooptischen Geräten bis hin zu unterschiedlichen innovativen Vermessungssystemen wie Maschinensteuerung, Mobile Mapping oder Ein-Knopf-Bildscanner dar. Dabei bleiben die ebenfalls hergestellten vermessungsbegleitenden Softwarelösungen unerwähnt. [42] Als geeignete Lösungskombination für die modellbasierte Abrechnung über die Maschinensteuerung können die Systeme iCON grade 42, iCON iXE3 und iCON grade iGD4SP betrachtet werden.

## 4.3 Maschinensteuerungssysteme

MOBA Automation AG ist ein weiterer Entwickler der Maschinensteuerungssysteme mit Hauptsitz in Limburg, Deutschland. Zum Unterschied von den Mitbewerbern ist MOBA Automation grundsätzlich seit der Firmengründung vor 40 Jahren auf den Bereich der Automatisierungstechnik konzentriert. Sie entwickeln Systeme und produzieren Komponenten für die Mobilelektronik, die Identifikationstechnik und die mobile Wägetechnik. Dazu gehören unter anderem Maschinensteuerungssysteme, unter denen das System XSITE PRO 3D von besonderem Interesse für die modellbasierte Abrechnung ist. Neben den allgemeinen Funktionen kann das System für die Bestandsaufnahme eingesetzt werden und ist mit der Software von Drittanbietern wie BIM-Cloud-Anbietern kompatibel. Zudem können verschiedene openBIM-Datenformate ohne Konvertierungs- oder Kompatibilitätsprobleme verwendet werden. [43]

Der vierte Marktführer ist die Firma Topcon mit Sitz in Tokio, Japan. 1994 ist das Unternehmen auf den Markt der Baumaschinensteuerung gekommen und weist seitdem eine bedeutsame Marktpräsenz auf. Von besonderem Interesse ist die Plattform 3D-MC, die in Kombination mit dem Pocket 3D Gerät die für modellbasierte Abrechnung angestrebten Bestandsaufnahmen und Volumenmengen verschiedener Geräte erzeugen kann. [69]

### 4.3.7 Maschinesteuerungssystem Trimble GCS900 und die Begleitkomponenten

In diesem Abschnitt wird ausführlicher auf die Funktionalität und den Softwareaufbau des Maschinensteuerungssystems Trimble GCS900 eingegangen, welches unter anderem bei dem in Unterkapitel 4.5 betrachteten Pilotprojekt eingesetzt wird. Trimble GCS900 ist ein Maschinensteuerungssystem für Bagger, Planiertrauben, Grader, Radlader und Kompaktmaschinen wie Kompaktlader und Kompaktrauben, die speziell für Erdbewegungen entwickelt wurden. [57] Das 3D-Kontrollsystem kann die Informationen bezüglich Soll-Oberflächen, Neigungen und Kurvenbändern vom PC direkt in das Führerhaus übertragen. Für den Maschinisten werden unter anderem die Draufsicht, das Quer- und Längsprofil angezeigt. Mit der Einrichtung von Trimble GCS900 kann ein Baugerät nicht nur positioniert und automatisch gesteuert, sondern auch eine Geländeaufnahme durchgeführt werden. Genau diese Funktion ist für die Durchführung des Konzeptes der modellbasierten Abrechnung mit Baumaschinendaten notwendig. Mittels Positionierungssystem kann die genaue Position des Werkzeuges des Baugeräts mehrmals pro Sekunde unabhängig von der Stellung des Oberwagens ermittelt werden. Die GNSS-Smart-Antennen liefern dabei die Position und die Arbeitsrichtung der Maschine im dreidimensionalen Raum. Das 3D-System ist laut Herstellerangaben für den Massenaushub und die Erstellung komplexer Geländegeometrien wie im Staudammbau, Geländeauffüllungen sowie Böschungen, Dämme, Gräben und Baugruben gut geeignet. [59]

Im Unterkapitel 4.3.1 wurden die Hardware-Bestandteile eines Maschinensteuerungssystems bereits vorgestellt. Als GNSS-Antenne tritt in diesem Fall die Smart-Antenne MS992 mit einer speziellen Schwingungsdämpfung auf, die die Funktionen einer Antenne und eines GNSS-Empfängers in einem Gehäuse kombiniert und Signale von drei globalen Satellitensystemen empfangen kann: vom amerikanischen GPS, dem russischen GLONASS und dem europäischen Galileo. Das Modell der im System eingesetzten Sensoren ist das AS 450, das des UTS-Targets MT 900 und das des Funkgeräts SNR 410. [59] Ein Trimble GCS900 für einen Hydraulikbagger kann in drei Paketen bereitgestellt werden: ein Ein-Mast-System mit GNSS-Steuerung, ein Ein-Mast-System mit UTS-

Tachymetersteuerung und ein Zwei-Mast-System mit GNSS-Steuerung. Die Systeme für Planier-  
raupen, Grader und weitere Geräte haben ähnliche Ausstattungen. Der Unterschied zwischen den  
Ausstattungs Paketen für einen Bagger ist in der Abbildung 4-2 erkennbar. [59]



Abbildung 4-2: Systemaufbau GCS900 für den Bagger [59]

### VisionLink

VisionLink ist eine multifunktionale Software, die sowohl für das Flotten- und Ressourcenma-  
nagement als auch für die Projektüberwachung sowie die Datenauswertung eingesetzt wird. Das

## 4.3 Maschinensteuerungssysteme

Programm liefert den Status jeder Maschine in Echtzeit und steht zur Problembehebung bereit. Somit können Aktivitätsmodi, Fehlercodes und andere Indikatoren des Maschinenzustandes überwacht und verschiedenartige Produktivitätsberichte erstellt werden. Mithilfe der Integration von Google Maps können die Projektbeteiligten den aktuellen Standort der Maschinen beobachten. Wenn eine Verbindung zu einem LKW oder Kipper besteht, können zusätzlich die Belade- und Zykluszeiten des LKW erfasst werden. [57] Im Rahmen der Projektüberwachung können 3D-Oberflächenmodelle sowie Höhen-, Auf- und Abtragkarten in Echtzeit erstellt werden. Außerdem können alle geleisteten Arbeiten inklusive Mehraushub, Verfüllung, Überfüllung und Nachsetzarbeiten erfasst werden. [66]

### *Trimble Connected Community (TCC)*

Die Trimble Connected Community ist eine internetbasierte Cloud-Lösung, die das Büro, die Feldrechner und die Baumaschinen in einem webbasierten Portal miteinander verbindet. Alle Vermesser und Projektpartner mit Internetanschluss sowie alle 3D-Maschinensteuerungen für jene Baugeräte, die automatisch mit einem Modem SNM941-Connected Site-Gateway ausgerüstet sind, können auf das Portal zugreifen. [65]

Die TCC ermöglicht eine Zwei-Wege-Kommunikation zwischen den Baugeräten und dem Büro, indem drahtloses Hoch- und Herunterladen von Daten gewährleistet wird. Zusätzlich kann eine automatische Datensynchronisierung aktiviert werden, damit die Daten von den Baugeräten automatisch ins Büro übertragen werden können. Mit der TCC können Entwurfsdateien aus dem Trimble Business Center und Informationen zur Anlagenverwaltung aus VisionLink vom Büro und von der Baustelle aus abgerufen werden. Eine zusätzliche, nützliche Funktion der TCC ist das Internet Base Station Service, das die Reichweite der Basisstation auf einen Radius von bis zu 30 Kilometer erweitern kann. [65]

### *Trimble Business Center*

Das Trimble Business Center ist ein Werkzeug zur Erstellung von 3D-Modellen für Baustellen und Trassen mit einer breiten Funktionspalette. Es kann jene Oberflächenmodelle erstellen und bearbeiten, die zur Steuerung der Baumaschinen dienen, sowie Berechnungen zu Volumen und Flächen durchführen und Übersichten über den Auf- und Abtrag erstellen. Neben den Basisfunktionen dient das Programm zur Umformatierung der Dateien mit digitalen Geländemodellen von Trimble-Oberflächendateiformaten in die Formate der Modellierungssoftware. Das Programm umfasst Werkzeuge zur Baustellenmodellierung und kann außerdem mangelhafte CAD-Daten in korrekte 3D-Daten konvertieren, welche zur REB-konformen (REB – Regelungen für die Elektronische Bauabrechnung) Abrechnung verwendet werden können. [64]

## 4.3.8 Maschinesteuerungssysteme Leica iCON grade iGD4SP und iCON grade 42

### *Leica iCON grade iGD4SP*

iCON grade iGD4SP ist ein Maschinensteuerungssystem von Leica Geosystems mit zwei GNSS-Masten für Planiertraupen mit einem Sechswegeschild. Durch dieses System wird ein schnelleres Ansprechen der Hydraulik im Vergleich zu den Vorgängerversionen erreicht sowie eine stabile

Arbeit bei schlechtem Satellitenempfang dank der SP-Technologie gewährleistet. Die modernen iCON-Maschinensteuerungssysteme unterstützen Standarddateiformate wie LandXML und DXF, wodurch der Datenbearbeitungsworkflow wesentlich vereinfacht wird, da kein zusätzliches Softwarepaket für die Konvertierungen benötigt wird. [39]

### *Leica iCON grade 42*

Leica iCON grade 32/42 ist der Vorgänger der moderneren Systeme iCON grade iGD3 und iCON grade iGD4SP. Das System lässt, ebenso wie Trimble GCS900, eine Fahrt im Automatikmodus nach einem hochgeladenen Soll-Modell zu. Außerdem bietet es die Möglichkeit einer direkten Mengenauswertung im System. Zwischen den ausgewählten Modellen können die Mengen automatisch und direkt auf dem iCP42-Rechner ausgerechnet und ausgegeben werden. Viel wichtiger für die modellbasierte Abrechnung ist jedoch die integrierte Möglichkeit einer Bestandsaufnahme, damit ein 3D-Abrechnungsmodell auf monatlicher Basis erstellt werden kann. [57]

### *Leica iCON Office*

Die Leica iCON Software ist eine Datenvorbereitungssoftware, die der Datensteuerung für Oberflächenprüfungen, der Vermessung, der Absteckung sowie der Vorbereitung der Standortdaten bei der Verwendung von Maschinensteuerungssystemen dient. [40] Im Rahmen des analysierten Projektes wird das System für die Erzeugung von Rastermodellen und die Konvertierung von Dateien angewendet.

### *Leica iCON telematics*

Die Software Leica iCON telematics ermöglicht den Fernzugriff auf alle Baumaschinen, welche mit dem System ausgerüstet sind. Die technische Voraussetzung für deren Benutzung ist das Vorhandensein eines Modems in der Maschine sowie eine stabile Internetverbindung. Die Verbindung zwischen dem Büro und den Baumaschinen erfolgt über einen Server. Nachdem die Daten auf den Server hochgeladen sind, erscheinen sie nach einer Synchronisierung auf dem Bordcomputer des Maschinisten. Das Programm bietet zudem eine Remote-Funktion, mit der der Bildschirm einer Maschine ins Büro übertragen wird sowie gegebenenfalls ein notwendiges Softwareupdate installiert werden kann. [57]

## 4.4 Maschinendaten von Planiertraupen

Die Planiertraupe ist eines der im Verkehrswegebau am häufigsten eingesetzten Geräte, weshalb die Möglichkeit des Einsatzes von Planiertraupen in der Datenerfassung für die darauffolgende modellbasierte Abrechnung von besonderem Interesse ist. Die nachfolgend vorgestellte Analyse der Mengenermittlung wurde in der Bachelorarbeit von Bernd Seichter [57] durchgeführt, in der zum Vergleich zwei verschiedene Maschinensteuerungssysteme auf einer Planiertraupe eingesetzt wurden: das Trimble GCS900 und das Leica iCON grade 42.

## 4.4 Maschinendaten von Planierraupen

### 4.4.1 Systemaufbau und Funktionsweise

In einem Maschinensteuerungssystem für die Planierraupe werden die gleichen Systemkomponenten eingesetzt, die bereits im Unterkapitel 4.2.1 vorgestellt wurden: Positionierungsdatenempfänger, Funkgerät, Onboard-Computer und Sensoren. Die Maschine kann über einen GNSS-Mast, über zwei GNSS-Masten oder über ein Tachymeter gesteuert werden. In den Steuerungssystemen mit GNSS werden die Masten direkt auf das Werkzeug des Gerätes montiert, im Falle der Planierraupe auf das Schild.

In einem Ein-Mast-System erfolgt die Regelung der erforderlichen Schildneigung automatisch über einen an der Rückseite des Schildes montierten Querneigungssensor, der in Abbildung 4-3 zu sehen ist. Die Querneigung wird durch diesen Sensor an der Hinterkante des Schildes erfasst und an die Bedieneinheit der Maschine weitergegeben. [57] Die Hebe- und Senkbewegungen des Schildes werden durch Berechnungen des GNSS-Empfängers gesteuert. Für die optimale Genauigkeit besteht die Möglichkeit, einen Drehsensor, der ins System eingebunden wird, beim eingeschwenkten Sechswegschild zu montieren. [60]

In Abbildung 4-4 ist eine Planierraupe mit einem Zwei-Mast-System zu sehen, welches links und rechts knapp über den Schildaußenkanten montiert wird. Die Regelung der Schildhöhe sowie der Neigung erfolgt über die beiden GNSS-Empfänger, wodurch auf den Einsatz eines Querneigungssensors verzichtet werden kann. Dadurch kann eine höhere Fahrgeschwindigkeit der Raupe erzielt werden, da die Berechnung der zutreffenden Querneigung mit dieser Systemkonfiguration schneller erfolgt als mit dem Querneigungssensor. [60]



Abbildung 4-3: Querneigungssensor AS 400 von Trimble [60]



Abbildung 4-4: Planierraupe ausgerüstet mit Trimble GCS900 Dual GNSS [81]

### 4.4.2 Einsatzkonzept

Im Rahmen des in der Bachelorarbeit betrachteten Experimentes wird eine Planierraupe mit einem Sechswegschild, das in drei Ebenen verstellt werden kann, analysiert. Neben den allgemeinen Bewegungen auf beiden Seiten nach hinten und vorne sowie nach oben und unten kann auch nur eine Seite nach hinten bzw. vorne bewegt werden, um die Erdmassen zu bewegen. Ebenso

kann auch eine Seite des Schildes getrennt nach oben bzw. unten bewegt werden, damit eine Querneigung gebildet werden kann. Der Querneigungswinkel wird durch den Querneigungssensor an der Hinterkante des Schildes ermittelt. [57]

Während der Punkteaufnahme werden die Koordinaten der unteren Ecken des Schildes aufgenommen. Wenn die Planierraupe mit einem Ein-Mast-System ausgerüstet ist, werden die Eckkoordinaten mittels einer aufgebauten GNSS-Antenne im Zentrums des Schildes sowie die eingegebene Schildbreite, den erfassten Querneigungswinkel und den festgesetzten Höhenunterschied zwischen der Antenne und der Schildunterkante ermittelt. Wenn die gesamte Unterkante des Schildes den Mittelpunkt des Rasters überfährt, wird das entsprechende Rasterelement aufgenommen. Dieser Algorithmus wird in Abbildung 4-5 in Form eines Musterrasters dargestellt, über den eine Planierraupe in willkürlicher Richtung fährt. Die Rasterflächen sind von den Einstellungen im Maschinensteuerungssystem abhängig und in der Praxis feiner als in Abbildung 4-5 dargestellt. [57]

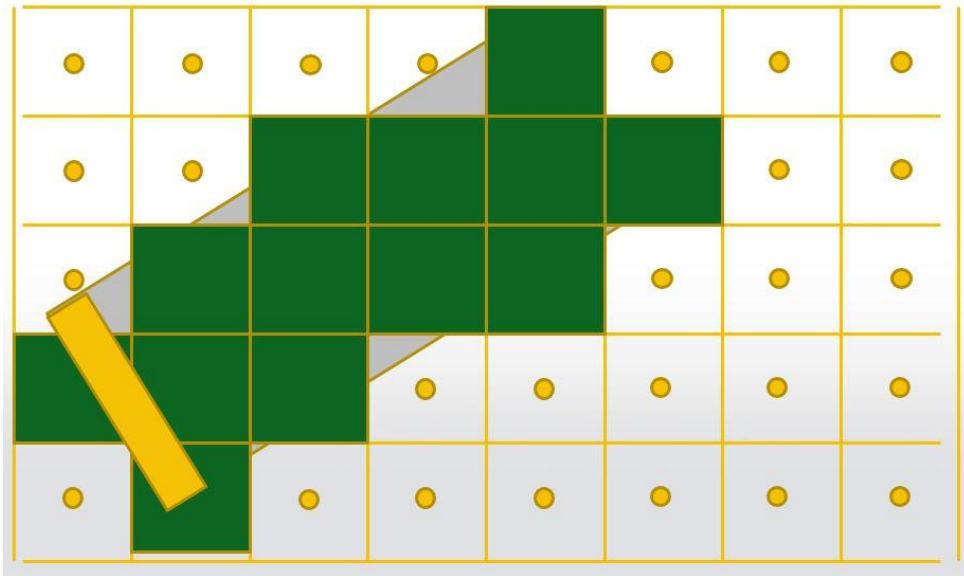


Abbildung 4-5: Geländeaufnahme mittels des Rasters. Die grünen Flächen werden vom System aufgenommen [72]

Die aufgenommenen Punkte werden in weiteren Schritten mittels spezieller Datenbearbeitungssoftware in Abhängigkeit von den Abrechnungsparametern sortiert und in ein digitales Geländemodell umgewandelt, das für die Erstellung eines Abrechnungsmodells benötigt wird. Die Abrechnung erfolgt in der AVA-Software, in der das für die Abrechnungsperiode relevante Abrechnungsmodell hochgeladen wird.

#### 4.4.3 Experimentvorstellung

Die Planierraupe wurde in der Bachelorarbeit von Seichter [57] bei zwei verschiedenen Baustellen eingesetzt: bei einer Dammschüttung, welche zur Errichtung eines Lärmschutzdammes für eine deutsche Autobahn benötigt wurde und über Trimble GCS900 aufgenommen wurde, und bei einem Baugrubenaushub, welcher über Leica iCON 40 aufgenommen wurde. Auf diese Weise können zusätzlich noch die Vor- und Nachteile einer Bestandsaufnahme mit der Planierraupe in Ab-



## 4.4 Maschinendaten von Planierraupen

hängigkeit vom Baustellentyp untersucht werden. Mit den auf der Planierraupe montierten Systemkomponenten des Maschinensteuerungssystems werden die Koordinaten der relevanten Punkte auf der Oberfläche des Geländes erfasst, aus dem ein digitales Geländemodell erstellt wird.

Für die Mengenauswertung, die in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt wird, werden zwei Systeme von Trimble und Leica eingesetzt, ebenso wie ein GNSS-Roverstab, der als Kontrollinstanz fungiert. Dafür wurde ein Roverstab Rover R8 mit angeschlossenem Feldrechner TSC3 von Trimble verwendet. Als Feldrechnersoftware wurde Trimble Access eingesetzt. Mit dem Roverstab wurden bei der Dämmschüttung ca. alle 10 Meter Querschnittsbruchpunkte sowie ein Punkt in der Oberfläche aufgenommen, um eine größere Genauigkeit in der Geometrie zu gewährleisten. Bei der Baugrube wurden die Böschungen sowie die Unter- und Oberkanten der Podeste aufgenommen, auf denen der Bagger für den Erdabtrag stand. Die nachfolgende Auswertung der aufgenommenen Punkte im Rahmen des Experiments wurde in Vestra Seven Civil 3D durchgeführt. Alle Messungen wurden nach Arbeitsschluss durchgeführt, um den Bauablauf nicht zu beeinträchtigen. Die Aufnahmen wurden nur in jenen Bereichen der beiden Baustellen durchgeführt, in denen tägliche Veränderungen stattfanden. [57]

### 4.4.4 Mengenermittlung mit Trimble GCS900

#### *Datenimport*

Damit eine Baumaschine die Bestandsaufnahmen durchführen kann, müssen zuerst die Soll-Daten an den Onboard-Computer der Maschine gesendet werden. Im Falle des Systems GCS900 werden eine Achse mit Horizont, eine Gradienten- und ein DGM aus der allgemeinen Modellierungssoftware im XML-Format exportiert und in das Trimble Business Center importiert, wo die Daten in für die Maschinen systemkompatible Formate umgewandelt werden. [57]

#### *Datenerfassung*

Im Rahmen der Mengenermittlung mit Trimble GCS900 wird die Planierraupe mit den entsprechenden Hardwarekomponenten ausgerüstet. Zu diesen gehören ein Onboard-Computer Trimble-Kontrollbox CB460, ein GNSS-Mast sowie weitere im Unterkapitel 4.3.7 beschriebene notwendige Komponenten. Das System kann dem Maschinisten die Möglichkeit einräumen, im Automatikmodus zu fahren, wenn das Soll-Modell bereits im Onboard-Computer verfügbar ist. Das Schild wird während der Fahrt auf die Soll-Höhe und die Soll-Neigung gestellt, indem das Steuerungssystem über Steuerventile auf die Hydraulikzylinder wirkt. Auf diese Weise kann das Schild der Planierraupe automatisch bewegt werden. [57]

Die Durchführung der Geländeaufnahme kann mit dem Trimble GCS900 auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Es kann manuell, automatisch, im Blade-On-Ground-Detection Modus oder im Modus der dauerhaften Aufzeichnung aufgezeichnet werden. Während der manuellen Aufzeichnung (Kartierung) wird eine Rasteransicht am Bordcomputer angezeigt, mit der für den Maschinisten einsehbar wird, welche Fläche des Rasters bereits überfahren wurde. Der Prozess der manuellen Aufzeichnung ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Im Automatikmodus wird das Gelände in einem parallelen Höhenversatz zum Soll-Modell aufgenommen. Bei der Verwendung der Blade-On-

Ground-Detection auf einer Planierraupe muss ein zusätzlicher Sensor an der Maschine montiert werden, welcher jene die Koordinaten der Punkte misst, wenn sich das Schild auf der Höhe der Ketten befindet. Bei dieser Kartierungsart werden Fehler minimiert, die wegen einer Überhöhung des Schildes über dem Boden ergeben können. Wenn das Schild unter diese Höhe gesenkt wird, wird dieser Abschnitt des Geländes in der Aufnahme miterfasst. [57, 61]

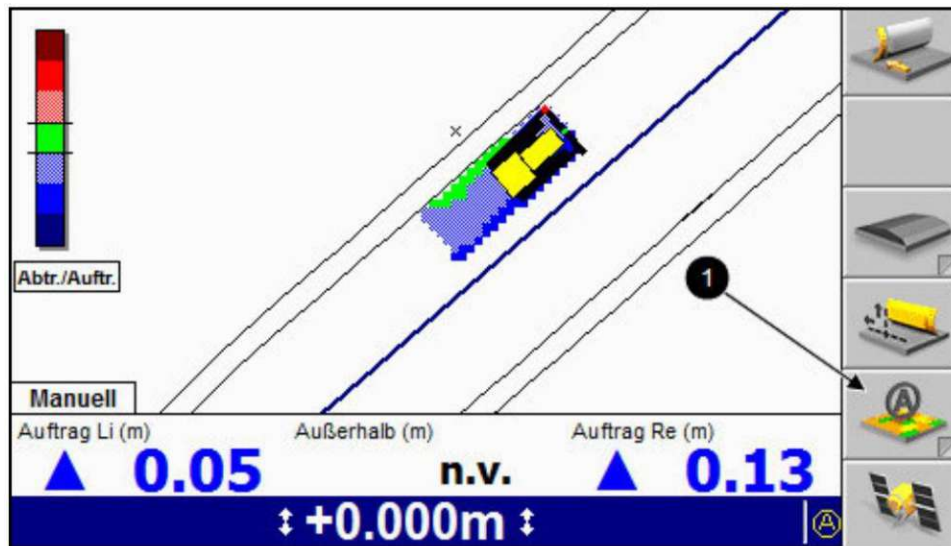


Abbildung 4-6: Manuelle Geländeaufnahme (Kartierung) über Trimble GCS900 mit der Planierraupe [61]

Im betrachteten Beispiel wurde die Geländeaufnahme täglich im Modus der dauerhaften Aufzeichnung durchgeführt, da die anderen Aufzeichnungsmodi aus technischen Gründen nicht betrachtet werden konnten. Eine Aufzeichnung im Blade-On-Ground-Detection Modus konnte wegen des fehlenden Sensors nicht erfolgen, der manuelle Modus konnte aufgrund der unzureichenden Absprache zwischen den Parteien nicht angewendet werden. Eine Erfassung im automatischen Modus war nicht möglich, da das Gelände nicht so eben wie das Soll-Modell war. [57]

Die Geländeaufnahme wird über die Rasterflächen durchgeführt, die in Unterkapitel 4.4.2 vorgestellt wurden. Für die Visualisierung auf dem Onboard-Computer wird in Trimble GCS900 eine quadratische Rasterfläche von 34 cm benutzt. Die Positionsdaten werden bis zu fünf Mal pro Sekunde abgespeichert, was eine genaue Auflösung der Aufnahme ermöglicht. Die aufgenommenen Daten werden mit anderen Daten im tag-Format abgespeichert, zu denen neben den Koordinaten unter anderem die Uhrzeit, die Soll-Modellbezeichnung und der Aufzeichnungsmodus gehören. Die Daten können vom Onboard-Computer an die weitere Bearbeitungsstelle (z.B. VisionLink) entweder – falls es keinen Internet-Anschluss auf der Baustelle gibt – über einen USB-Stick oder über die Trimble Connected Community (TCC) übergeben werden (siehe Abschnitt 4.3.7). [57] [72]

Im Rahmen des von Seichter [57] betrachteten Beispiels (Lärmschutzdammbau) wurde die TCC eingesetzt, welche eine Echtzeit-Datensynchronisation zwischen den Baustellen und dem Bearbeitungszentrum gewährleistet. Da alle Geräte, die zu einem 3D-Maschinensteuerungssystem von Trimble angeschlossen werden über ein Modem verfügen, können diese zur TCC zugeschaltet werden. Es können sowohl die Soll-Modelle vom Büro auf den Onboard-Computer, als auch die Dateien mit den Bestandsaufnahmen zurück ins Büro gesendet werden. Letztere Daten werden

#### 4.4 Maschinendaten von Planierraupen

im tag-Format abgespeichert. Somit kann der Einsatz von Vermessern in manuellen Datenaustauschmaßnahmen entfallen. Als weiteren Vorteil können die Standzeiten der Baumaschinen minimiert werden, welche sonst aus den Verzögerungen durch die manuellen Datenlieferungen oder aufgrund von Fehlerbehebungen entstehen können. [57]

##### *Datenauswertung und Datenexport*

Die Auswertung der aufgenommenen Oberflächen kann über die Online-Ergänzungssoftware VisionLink durchgeführt werden. Nach dem Import der von den Baumaschinen generierten tag-Dateien werden die einzelnen Flächen des Rasters gefiltert. Neben der Möglichkeit, nach Datum und Uhrzeit zu filtern, können die Flächen nach der Höhe gefiltert werden. Dabei kann zwischen der untersten und der obersten Überfahrt der Planierraupe ausgewählt werden. Für die Modellerzeugung ist die unterste Überfahrt von besonderer Relevanz, da sie weniger fehleranfällig ist. Außerdem können die aufgenommenen Punkte nach der ersten und der letzten Überfahrt gefiltert werden. [57] [72] Bei der Auswertung im betrachteten Anwendungsbeispiel (Lärmschutzdammbau) wurden die Punkte nach dem Parameter „Unterste Überfahrt“ sortiert. So konnten die Sprünge im Gelände eliminiert werden, welche durch das Anheben des Schildes beim Rückwärtsfahren der Planierraupe entstanden sind. Diese Sprünge könnten betrachtet werden, wenn man die Punkte nach dem Parameter „letzte Überfahrt“ filtert. Ein zusätzlich angewendeter Filter ist die Uhrzeit (ab 17 Uhr), ab der am jeweiligen Tag keine Bauarbeiten mehr stattgefunden haben. [57]

Wenn im Programm eine Mengenauswertung erwünscht ist, können außerdem die Referenzflächen importiert und aus der Differenz der Referenzflächen und den aufgenommenen Oberflächen das Volumen des Abtrags und Auftrags in Kubikmetern bestimmt werden. Damit dieses mit der maximalen Genauigkeit ermittelt wird, müssen die untereinanderliegenden Oberflächen an verschiedenen Tagen so deckungsgleich wie möglich sein. Unter der Deckungsgleichheit wird das Zusammenfallen der Umrise der jeweiligen täglichen Geländeaufnahmen verstanden. Im betrachteten Beispiel waren die Aufnahmen aus verschiedenen Tagen nicht in allen Fällen deckungsgleich, wodurch sie von VisionLink orthogonal vermascht wurden, wie in Abbildung 4-7 ersichtlich wird. Die Massen außerhalb der orthogonalen Linien können vernachlässigt werden und finden keinen Eingang in die Volumenberechnung. [57]

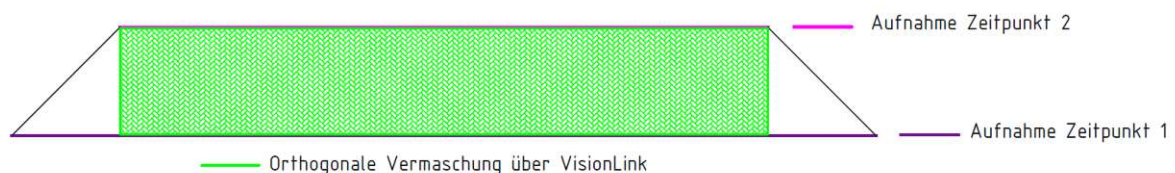


Abbildung 4-7: Vermaschung der nicht deckungsgleichen Oberflächenaufnahmen von verschiedenen Tagen

Eine zusätzliche Funktion dieser Software ist die Maschinenüberwachung. Alle im System registrierten Baumaschinen werden über die Integration eines Online-Kartendienstes auf der Karte angezeigt. Neben der geographischen Lage können noch weitere relevante Parameter wie Kraftstoffverbrauch, Reifendruck oder die Leistungsstunden über die Software abgerufen werden. Auf

diese Weise können die Bauleiter und Poliere eine allgemeine Übersicht über die Flotte gewinnen und somit wichtige Maschinenparameter kontrollieren. [57]

Die mit einem GNSS-Rover aufgenommenen Punkte werden in einer Modellierungssoftware nachbearbeitet. Im betrachteten Beispiel erfolgte die Nachbearbeitung der Punkte in Vestra. Um die Ergebnisse mit den Aufnahmen der Planierraupe vergleichen zu können, muss die aus Vestra exportierte xml-Datei mithilfe der im Unterkapitel 4.3.7 vorgestellten Software Trimble Business Center in eine ttm-Datei umformatiert und in VisionLink importiert werden. Dieser Lösungsweg kann hilfreich sein, wenn ein gemeinsames DGM der Aufnahmen aus dem GNSS-Roverstab und den Baumaschinenaufnahmen erstellt werden muss. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn mit unterschiedlichen Geräten verschiedene Bereiche des Geländes aufgenommen wurden. Nach dem erfolgreichen Importvorgang konnten die beiden DGM von der Planierraupe und aus dem GNSS-Rover miteinander verglichen werden. Wenn ein Vergleich der Aufnahmen von unterschiedlichen Geräten notwendig ist, kann zusätzlich noch eine dxf-Datei mit dem entsprechenden Umriss in VisionLink importiert werden. [57]

### 4.4.5 Mengenermittlung mit Leica iCON grade 42

Neben dem bereits vorgestellten System GCS900 von Trimble kann eine Planierraupe mit dem installierten Maschinensteuerungssystem iCON grade 42 von Leica wertvolle Bestandsaufnahme machen. Obwohl der Einsatz derselben Baumaschine betrachtet wird, gibt es einige Unterschiede im Workflow, weshalb der Einsatz dieses Systems einzeln betrachtet wird.

#### *Datenimport*

Damit eine Baumaschine die Bestandsaufnahmen durchführen kann, müssen vor allem die Soll-Daten an den Onboard-Computer der Maschine gesendet werden. Im Falle des Systems iCON grade 42 werden das digitale Geländemodell sowie eine Achse aus der Modellierungssoftware exportiert und direkt an die Bedieneinheit der Baumaschine geliefert. Die Formatumwandlung erfolgt dabei automatisch.

#### *Datenerfassung*

Das Soll-Modell kann jedoch auch auf eine andere Weise ins System gelangen. Über das Programm iCON Office kann aus dem original 3D-Soll-Modell im xml-Format eine trm-Datei oder eine gdm-Datei erstellt werden. Das trm-Format ist das firmeninterne Format von Leica für die Oberflächendateien. Mit den Dateien im gdm-Format werden die Rastermodelle erzeugt. Das Rastermodell im System iCON grade 42 ist nicht nur die Basis für die Arbeit des Maschinisten, sondern auch die Basis für die Geländeaufnahme. Für die Erstellung des Rastermodells kann die Rastergröße selbstständig ausgewählt werden, empfohlen wird jedoch eine Rastergröße mit der Zellenbreite von 1 m. Nachdem die Rasterflächen vom Baugerät während dessen Bewegungen aufgenommen werden, werden diese in Abhängigkeit von der Ist-Höhe in unterschiedlichen Farben dargestellt. Das auf diese Weise eingefärbte Pixelmodell mit den hoch- und heruntergezogenen Rasterflächen wird nach der abgeschlossenen Bestandsaufnahme als Änderungsmodell abgespeichert und aus dem System exportiert. [57]

#### 4.4 Maschinendaten von Planiertrauben

Für die betrachtete Baustelle (Baugrube) wurde ein Raster mit der Seitengröße 1 m ausgewählt. In der Baugrube befand sich ein Podest, das zusammen mit seiner Umgebung aufgenommen werden sollte. Beim Befahren des Podests mit der Planiertraube musste besonders darauf geachtet werden, dass die außenliegenden Punkte durch eine unabsichtliche Auskrugung des Schildes mitaufgenommen wurden. [57]

##### *Datenbearbeitung*

Nach der fertigen Bestandsaufnahme kann die gdm-Datei in eine Punktwolkendatei umgewandelt werden, indem die Mittelpunkte der Rasterzellen miteinander verbunden werden. Die Punkte können außerdem ausgedünnt werden, indem zum Beispiel nur jeder zweite Punkt in einen Koordinatenpunkt der zukünftigen Punktwolke umgewandelt wird. [57]

Im Rahmen des Beispiels wurden die Rastermodelle durch iCON Office in eine Punktwolke transformiert und mit unterschiedlicher Ausdünnung abgespeichert, um einen passenden Ausdünnungsgrad zu finden. Danach konnten die Punktwolken in die Modellierungssoftware Vestra importiert und ein digitales Geländemodell erstellt werden. [57]

Um die Mengen pro Abrechnungsperiode mit diesem System zu ermitteln, bietet sich das im Folgenden näher beschriebene Verfahren an. Nachdem die erste Zeitperiode verstrichen ist, wird die Datei mit den aufgenommenen Punkten als Rastermodell aus dem System heruntergeladen, umbenannt und als Referenzmodell wieder ins System geladen. Nach dem Ende der zweiten Periode wird das zweite Rastermodell heruntergeladen. [57] Dieses Modell enthält nur die Differenzmengen, die in der zweiten Periode erfasst wurden, wodurch es der Abrechnung für die zweite Periode dienen kann. Auf diese Weise wird in den folgenden Abrechnungsperioden fortgefahren, bis die Abrechnungsmengen aller Zeitperioden erfasst wurden.

#### 4.4.6 Mengenermittlung Fazit

Die von Seichter [57] durchgeführten Experimente mit den verschiedenen Maschinensteuerungssystemen haben aufgezeigt, dass der Erfolg der Messungen nicht nur vom eingesetzten Maschinensteuerungssystem, sondern auch vom Baustellentyp selbst abhängig ist. Während des Einsatzes in der Baugrube sind einige Probleme im Bereich der Grenzlinie zwischen den Böschungen und Ebenen entstanden. Wenn die Planiertraube die Böschung in diesem angrenzenden Bereich der Länge nach aufnimmt und sich ein Teil des Schildes teilweise in der Luft befindet, werden somit die Punkte der angrenzenden Ebene teilweise mitaufgenommen, und zwar mit einer Höhe, die nicht der Realität entspricht. Ein Beispiel eines solchen Punktes ist in Abbildung 4-8 dargestellt. Dieser unabsichtlich mitaufgenommene Bereich kann jedoch richtig aufgenommen werden, indem die Traube die Aufnahme der Ebene so nah wie möglich an der Grenzlinie durchführt. Damit die Punkte nicht doppelt berücksichtigt werden, können sie in VisionLink durch die Auswahl „Unterste Überfahrt“ herausgefiltert werden. [57]

Das Problem der doppelten Aufnahme kann aber aus technologischen Gründen nicht vollständig ausgeschlossen werden. Daher ist der Einsatz von Planiertrauben für Bestandsaufnahmen bei Geländen mit unregelmäßiger Oberfläche wie Baugruben mit Böschungen eher ungeeignet. In die-

sem Fall wäre es sinnvoll, alternative Baugeräte wie zum Beispiel Hydraulikbagger für diese Aufgabe einzusetzen. Im Falle des Einsatzes der Planierraupe im Lärmschutzdammbau haben derartige Probleme technologischer Art nicht stattgefunden, weshalb die Bestandsaufnahmen von Lärmschutzwänden und anderen flachen Geometrien mit der Planierraupe durchaus durchgeführt werden können. [57]

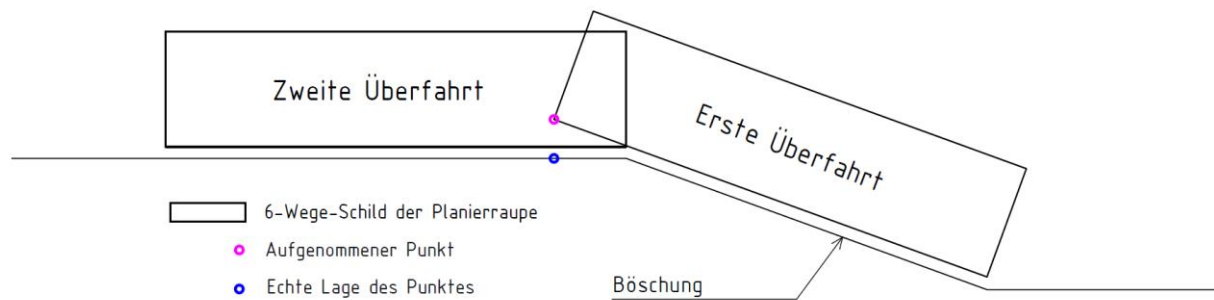


Abbildung 4-8: Möglicher Fehler bei der Geländeaufnahme im Bereich der Böschungen

Die Analyse der in Seichter [57] durchgeführten Bestandsaufnahmen zeigte auf, dass bei der Geländeaufzeichnung eines Lärmschutzdamms mit dem GCS900 System im Vergleich zur Aufnahme mit einem GNSS-Roverstab ein mittlerer Höhenunterschied von ca. 7,5 cm nachgewiesen wurde. Das bedeutet, dass pro 1.000 m<sup>2</sup> Geländefläche 75 m<sup>3</sup> Erdmassen weniger abgerechnet werden konnte. Bei der Geländeaufzeichnung der Baugrube mit dem iCON grade 42 System wurde ein größerer mittlerer Höhenunterschied ca. 11 cm im Vergleich zur manuellen Geländeaufnahme festgestellt. Dies bedeutet, dass pro 1.000 m<sup>2</sup> Geländefläche 110 m<sup>3</sup> Erdmassen weniger abgerechnet werden konnten. Allerdings wären diese Abweichungen nicht entstanden, wenn die Planierraupe im Rahmen der Experimente mit Abstandssensoren ausgerüstet gewesen wäre, wodurch zum Beispiel der Blade-On-Ground-Detection Modus aktiviert werden könnte. [57]

Da diese Abweichungswerte von Tag zu Tag relativ konstant waren, kann für eine höhere Genauigkeit der folgende Workflow vorgeschlagen werden: Vor Beginn der maschinengesteuerten Bestandsaufnahme wird der Abweichungswert für alle Baumaschinen mittels einer Mustervermessung eines kleinen Bereiches mit den Maschinen und dem GNSS-Roverstab bestimmt. Weiter können die Bestandsaufnahmen vollständig von den Baumaschinen übernommen werden, jedoch unter der Bedingung, dass der ermittelte Abweichungswert am Ende in der jeweiligen Mengenauswertung berücksichtigt wird oder, dass das DGM bzw. das Abrechnungsmodell durch Berücksichtigung der Abweichungswerte angepasst wird, bevor es an die Abrechnungssoftware geliefert wird.

Der Einsatz der Planierraupe auf den betrachteten Baustellen brachte trotz einigen technischen Schwierigkeiten einen wirtschaftlichen Vorteil mit sich, der hauptsächlich aus einer beträchtlichen Zeitersparnis resultierte. Diese konnte insbesondere dadurch gewonnen werden, dass die Baumaschinen sich bereits auf der Baustelle befanden und nicht wie der Vermesser mit Ausrüstung im Falle einer manuellen Aufnahme transportiert werden mussten. Weitere 10 bis 20 Minuten konnten durch eine schnellere Datenauswertung im Vergleich zur manuellen Aufnahme gespart werden. Unter der Berücksichtigung der Treibstoffkosten und der Zeitersparnisse wurde in

## 4.5 Maschinendaten von Hydraulikbaggern

der Arbeit von Seichter [57] festgestellt, dass eine Bestandsaufnahme mit der Planierraupe auf den Beispielstrecken um 36 % (mit Trimble GCS900) bis 43 % (mit Leica iCON grade 42) kostengünstiger war als eine manuelle Vermessung. [57] Trotz der komplizierteren Bestandsaufnahmeart kann somit die Mengenermittlung mit der Planierraupe im Rahmen der modellbasierten Abrechnung in einer effizienteren Weise im Vergleich zur konventionellen Abrechnung durchgeführt werden.

## 4.5 Maschinendaten von Hydraulikbaggern

Eines der potenzialreichsten Baugeräte in der Datenerfassung für die nachfolgende modellbasierte Abrechnung ist der Hydraulikbagger. Dank seiner mechanischen Flexibilität kann er als Bestandsaufnahmegerät für die modellbasierte Abrechnung nicht nur auf Baustellen mit relativ ebenen Flächen wie zukünftige Autobahnen oder Schnellstraßen eingesetzt werden, sondern auch im Leitungsbau, dem Filterbeckenbau und auf vielen weiteren Baustellen mit unregelmäßigen Querschnitten. Der Bagger kann punktweise Objekte mit rauer sich verändernder Oberfläche aufnehmen und somit die Daten der Planierraupe gegebenenfalls ergänzen oder ersetzen.

### 4.5.1 Systemaufbau und Funktionsweise

Im Baumaschinensteuerungssystem für den Hydraulikbagger werden wie bereits vorgestellt Positionierungsdatenempfänger, Funkgerät, Onboard-Computer und Sensoren verwendet. Im Vergleich zum Maschinensteuerungssystem für die Planierraupe werden die Systembestandteile jedoch auf andere Weise auf dem Gerät montiert. Da dem Werkzeug des Baggers eine Handlungsflexibilität vorausgeht, können die GNSS-Empfänger nicht direkt auf der Schaufel montiert werden, da sonst dessen Hauptfunktion „Schöpfen“ behindert wäre. Aus diesem Grund werden die GNSS-Empfängermasten beziehungsweise die UTS-Signalmasten auf dem Dach der Fahrerkabine montiert. [59]

Ein wichtiger Bestandteil des Systems sind die Positionierungssensoren, die unabhängig von der Stellung des Auslegers und des Oberwagens die genaue Position der Schaufelschneide ermitteln können. Die Sensoren können in Winkelsensoren und Zwei-Achs-Sensoren unterteilt werden. Die Zwei-Achs-Sensoren werden auf dem Fahrgestellrahmen montiert und können die Längs- und Querneigung der Maschine bestimmen, wodurch eine größere Genauigkeit der Vermessung gewährleistet wird. Dieser Winkel wird in Abbildung 4-9 als  $\theta_{boom}$  bezeichnet. Dies findet zum Beispiel bei einem Geräteeinsatz an steilen Hängen Anwendung, wenn die Geräteachse des Baggers von der Vertikalen abweicht. [51] [59]

Die Winkelsensoren können ständig ein Pulsweitenmoduliertes Signal (PWM) ausgeben, welches dem relativen Winkel zwischen zwei Baumaschinenteilen entspricht. Diese Sensoren werden mindestens an drei Stellen angebracht. Der erste Winkelsensor ist am Schwenkpunkt des Auslegers am Oberwagen montiert, mit dem der Winkel  $\theta_{boom}$  zwischen dem Ausleger und der Oberwagenvertikalachse gemessen wird. Der zweite Sensor misst den Winkel zwischen dem Ausleger und dem Löffelstiel, welcher in Abbildung 4-9 als  $\theta_{stick}$  bezeichnet wird. Der dritte Winkelsensor misst den relativen Winkel  $\theta_{bucket}$  zwischen dem Löffelstiel und der Schaufel. [51]

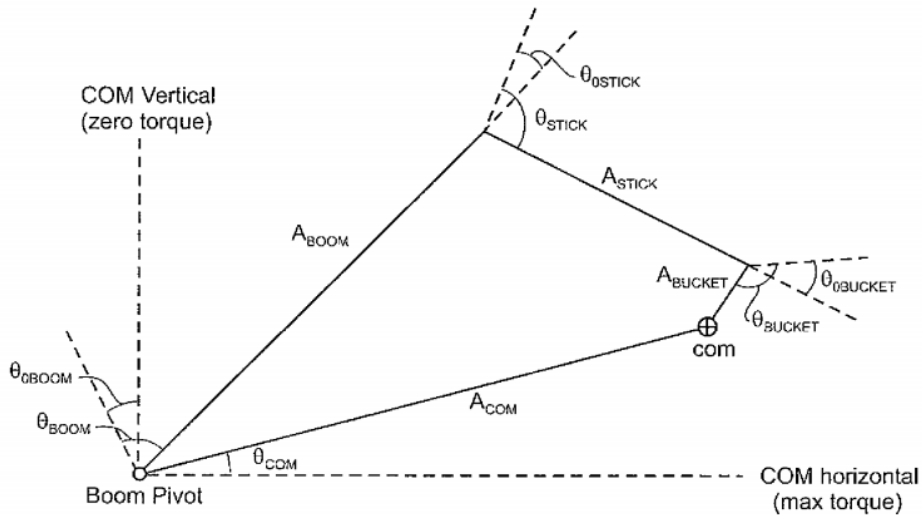


Abbildung 4-9: Parameter, welche für die Lagebestimmung der Schaufel benötigt werden [51]

Die Maschine kann über einen GNSS-Mast, über zwei GNSS-Masten oder über ein Tachymeter gesteuert werden. Der Unterschied in den Bestandteilen ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Mithilfe der vorgestellten Winkelsensoren und den gegebenen Zwischenabständen können die Koordinaten des Punktes auf dem Oberwagen, auf dem der GNSS-Mast montiert ist, schnell in die Koordinaten der Schaufelsschneide umgerechnet werden.

Es gibt jedoch einen Unterschied in der Bestimmung des Neigungswinkels der vertikalen Baggerachse. In einem Ein-Mast-System erfolgt die Berechnung über die Zwei-Achs-Sensoren, welche auf dem Fahrgestellrahmen montiert sind. Ohne diese Sensoren kann das System lediglich Lage und Neigung der Schaufelschneide bestimmen. Ein Zwei-Mast-System, für das Trimble das Patentrecht besitzt und das in Abbildung 4-10 dargestellt ist, unterscheidet sich vom Ein-Mast-System dadurch, dass es außer der Lage- und der Neigungsmessung der Schaufelschneide auch die Querneigung der Schaufel messen kann. Dies kommt zum Beispiel zum Einsatz, wenn das Gerät an steilen Hängen oder anderen komplexen Geländeoberflächen arbeitet. [58] Aus den genau ermittelten XYZ-Koordinaten zweier Ränder des Oberwagens kann der Höhenunterschied zwischen den Kanten ermittelt werden. Zusammen mit dem gegebenen Abstand zwischen den zwei Masten lässt sich der Querneigungswinkel unkompliziert berechnen. [59]

#### 4.5.2 Einsatzkonzept

Die Geländeaufnahme mit dem Bagger funktioniert auf eine ähnliche Weise wie mit der Planieraupe. Dank den im vorhergehenden Unterkapitel beschriebenen Sensoren sowie GNSS-Empfänger können die Koordinaten der Ecken der Löffelspitze des Baggers ermittelt werden. Die Zellen des Rasters, welche sich zwischen den Ecken des Löffels befinden, können während des Fahrens im Automatikmodus aufgenommen werden. Außerdem besteht für den Bagger die Möglichkeit einer Punktaufzeichnung. Mit dieser Kartierungsfunktion können die 3D-Koordinaten eines einzelnen Punktes aufgezeichnet werden, wodurch wahlweise maßgebende Punkte in die Bestandserfassung mitgenommen werden können, damit unter anderem die Vermessungsergebnisse mit anderen Bestandserfassungsmitteln (wie z.B. Roverstab) zur Kontrolle verglichen werden können.





Abbildung 4-10: Hydraulikbagger ausgerüstet mit Trimble GCS900 Dual GNSS [59]

Vor der Vermessung muss nachgewiesen werden, dass die Schaufel des Baggers kalibriert ist, dass das GNSS-Positionierungssystem jene Verfahren verwendet, die die Präzision verbessern (befindet sich im RTK-FIX-Modus und empfängt das RTK-Korrektursignal) sowie dass der zu vermessende Baukörper aktiv ist oder der Code des betreffenden Baukörpers ausgewählt wird. Der Tiefpunkt der Schaufel wird vorsichtig gegen den Boden an den zu messenden Punkt gesenkt, wobei der tatsächliche Positionsmesspunkt der Schaufel mitberücksichtigt wird. Die Vermessung wird mit einer entsprechenden Steuerungssystemfunktion vorgenommen. [14]

### 4.5.3 Pilotprojektvorstellung

Ein Vorreiter im Bereich der Baumaschinendaten ist beim kooperierenden Unternehmen das BIM-Pilotprojekt Sandfilteranlage Lupburg. Dieses Projekt gehört zu den ersten Projekten im Bereich des Verkehrswegebau, bei dem Baumaschinen für die modellbasierte Abrechnung sowie die Baufortschrittskontrolle eingesetzt werden. In Abbildung 4-11 ist der Grundriss der geplanten Sandfilteranlage einsehbar.

Im Frühling und Sommer 2020 ist der Neubau der Sandfilterbecken in Markt Lupburg geplant, welche sich in der Nähe von Regensburg in Ostbayern befindet. Es werden insgesamt drei Sandfilteranlagen mit einer Sickerfläche von ca. 2.400 m<sup>2</sup> gebaut. Die Becken werden mit einer Kunststoffdichtbahn aus PE-HD ausgekleidet, auf der in weiterer Folge die Filterschichten aufgebracht werden. Zudem müssen ein Tosbecken und ein Anbau an das bestehende Regenüberlaufbauwerk in Ort betonbauweise erbaut werden. Zum Verschluss der Abläufe des bestehenden Regenüberlaufbauwerks müssen Dammbalken eingebaut werden. Die Schieberschächte und Verteilerrinnen werden als Fertigteilbauwerke geliefert. [27]

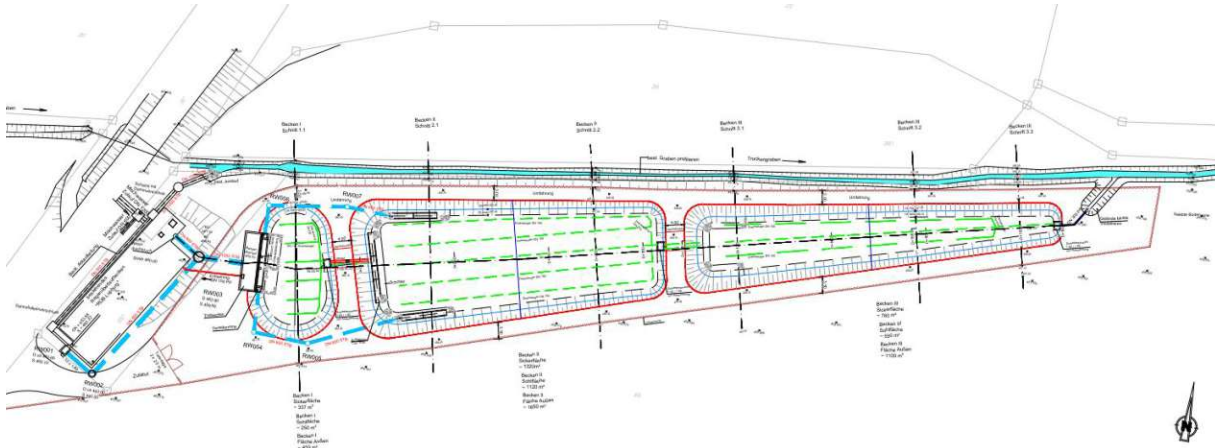


Abbildung 4-11: Grundriss der geplanten Sandfilteranlage [27]

Zu den Zielen des Projektes gehört die Stärkung der eigenen BIM-Kompetenz und unter anderem die Überprüfung der Effizienz der modellbasierten Abrechnung über Baumaschinendaten. Im Rahmen der Ausführungsphase werden die BIM-Anwendungsfälle Planungsvariantenuntersuchung (AWF 2), Baufortschrittskontrolle (AWF 15), Abrechnung der Bauleistungen (AWF 17) und Maschinensteuerung (AWF 21) betrachtet. [27]

Damit das Projekt in der Ausführungsphase mit BIM bearbeitet werden kann, müssen die BIM-Daten aus der Angebotsphase zur Verfügung stehen. Da die BIM-Bearbeitung des Projektes erst später begonnen hat, als das Projekt bereits beauftragt wurde, wurde die Angebotsphase simuliert und unter zeitlichen Realbedingungen durchgeführt. [27]

### Angebotsphase

In der simulierten Angebotsphase wurde das Modell des künftigen Bauvorhabens in der Modellierungssoftware ProVI erstellt. Diese Software wird speziell für die BIM-kompatible Planung von Infrastrukturobjekten eingesetzt. Die Basis für die Modellierung ist ein digitales Modell, das aus tachymetrischen Geländeaufnahmen entstanden ist. Weitere Grundlagen für die Modellierung im Projekt sind 2D-Planungsunterlagen des Planungsbüros, zu denen die Baubeschreibung und Ausführungspläne gehören. [27]

Damit der Modellierungsaufwand im Verhältnis zum Nutzen stand, wurden nicht alle LV-Positionen modelliert, sondern nur die maßgebenden. Nicht modelliert wurden unter anderem Verfüllungen, Schieberschächte und Drainagesammler. Die Verknüpfung der LV-Positionen mit den Modellelementen für die darauffolgende modellbasierte Kalkulation sowie Visualisierung des Bauablaufs erfolgte in der AVA-Software iTWO 2017. Das erzeugte 5D-Modell dient der Basis für die Baufortschrittskontrolle sowie der modellbasierten Abrechnung in der Ausführungsphase. [27]

### Ausführungsphase

Im Rahmen des Anwendungsfalls Baufortschrittskontrolle wird getestet, ob verwertbare Daten aus dem Maschinensteuerungssystem (Trimble GCS900) in Verbindung mit der Plattform Vision-Link gewonnen werden können. Als Kontrollinstanz wird ein Roverstab eingesetzt. Die Daten aus

## 4.5 Maschinendaten von Hydraulikbaggern

beiden Bestandsaufnahmearten müssen in das Modell übertragen und die Leistungsmengen in die AVA-Software iTWO importiert werden. [27]

Im Rahmen des Anwendungsfalls Abrechnung der Bauleistungen wird das Modell als Grundlage zur Abrechnung der Bauleistungen benutzt. Die Erdbewegungen werden über die Maschinensteuerungsdaten und den Roverstab dokumentiert. Mit dem Roverstab werden außerdem Homogenbereichsgrenzen dokumentiert und ins Modell überführt. Die Massen werden in der Planungssoftware ProVI bestimmt und an die AVA-Software iTWO übergeben. [27]

### 4.5.4 Mengenermittlung

Für die Erstellung des monatlichen Abrechnungsmodells sowie für die Mengenermittlung wurde im Rahmen des Projektes ein, mit dem bereits bekannten System GCS900 von Trimble ausgerüsteter, Hydraulikbagger eingesetzt, da dieses System den Datenverkehr in beide Richtungen gestattet. Dies ist für das Konzept der modellbasierten Abrechnung mit Baumaschinendaten eine Voraussetzung.

#### *Technische Voraussetzungen*

Mit dem Einsatz des Systems Trimble GCS900, welches im Pilotprojekt eingesetzt wird, sowie der dazugehörigen Komponenten müssen einige technische Voraussetzungen erfüllt werden. Vor allem muss der Zugang der Maschine zum VisionLink Server und dem Trimble Connected Community (TCC) Portal gewährleistet werden. Daher muss das Modem SNM940 sowie die SIM-Karte und der Onboard-Computer CB430 beziehungsweise CB460 an die Maschine angeschlossen werden. Letztere müssen mit einer entsprechenden Software ab der Version 11.40 ausgestattet sein. Zudem muss die CAD-Software für die Auswertung freigegeben werden. [27]

#### *Datenimport*

Damit die Mengenermittlung mit Trimble GCS900 auf einem Hydraulikbagger durchgeführt werden kann, muss der Onboard-Computer des Baggers sowohl auf die Positionsdaten als auch auf die Entwurfsdatei mit den Soll-Daten Zugriff haben. Das digitale Geländemodell, das die Soll-Daten repräsentiert, kann wie im Falle der Planierraupe über das Trimble Business Center importiert und in die für den Onboard-Computer auf der Maschine systemkompatiblen Formate umgewandelt werden. Der Datenfluss ist skizzenhaft in Abbildung 4-12 dargestellt.

#### *Datenerfassung*

Im Rahmen der Mengenermittlung mit dem Trimble GCS900 wird der Bagger mit den systementsprechenden Hardwarekomponenten ausgerüstet, zu denen der Onboard-Computer Trimble-Kontrollbox CB460, ein GNSS-Mast, Sensoren und weitere im Unterkapitel 4.3.7 beschriebene notwendige Komponenten gehören. Die Durchführung der Geländeaufnahme kann mit dem Trimble GCS900 auf verschiedene Weisen erfolgen. Die Aufzeichnung kann im Automatikmodus, im Modus der minimalen Höhenkartierung sowie im Modus der Punktaufzeichnung durchgeführt werden. Im Automatikmodus können alle überfahrenen Punkte unter ausgewählten Kriterien (z.B. während der Vorwärtsbewegung) aufgezeichnet werden. Diese Art der Kartierung ist in Abbildung 4-

13 dargestellt. Der Modus der minimalen Höhenkartierung unterscheidet sich dadurch, dass der aktuell gemessene Rasterwert nur dann gespeichert wird, wenn er tiefer liegt als die Werte der vorherigen Durchgänge. Auf diese Weise kann verhindert werden, dass unkorrekte Daten angezeigt werden, wenn ein Abtragen auf der Entwurfsfläche stattfindet. Im Modus der Punktaufzeichnung können die 3D-Koordinaten eines einzeln ausgewählten Punktes aufgenommen werden. [62]

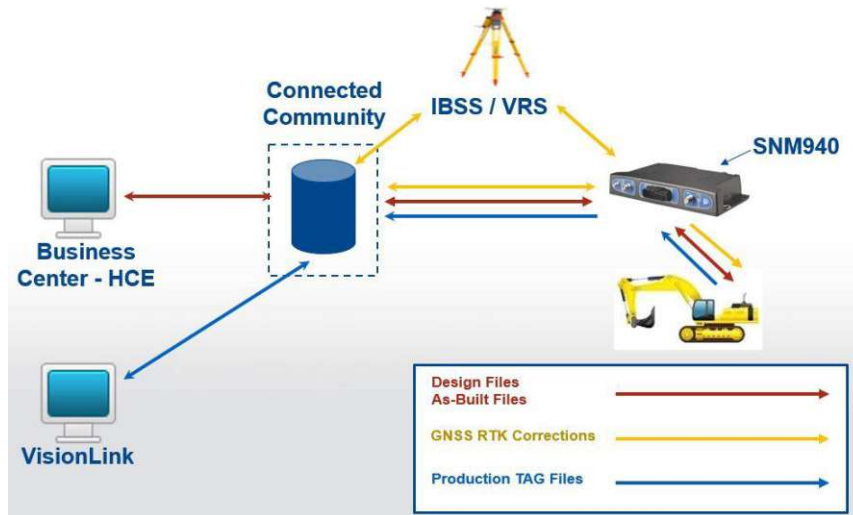


Abbildung 4-12: Interaktion der Systemelemente [72]

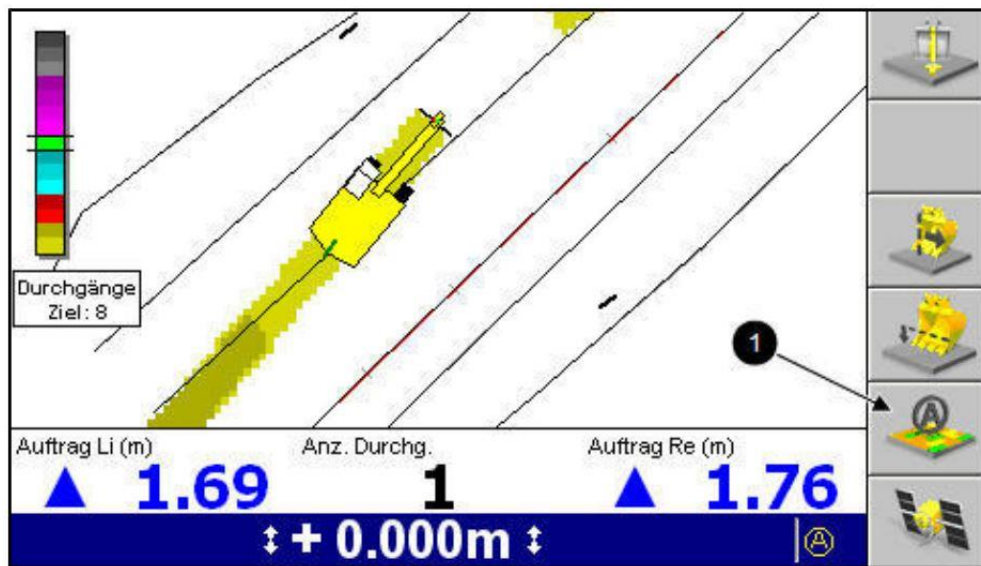


Abbildung 4-13: Geländeaufnahme (Kartierung) über Trimble GCS900 mit dem Hydraulikbagger [62]

Jedes Mal, wenn der Baggerlöffel über die Mitte einer 34-cm-Gitterzelle fährt, werden folgende Informationen in einer tag-Datei erfasst: die Planungsdatei mit dem Soll-Gelände, die auf der Maschine im Einsatz war, die Höhenangabe, das Pass Count Update, Datum und Uhrzeit der Aktualisierung der Zellen Daten, die ID der Baumaschine, die Vorwärts- oder Rückwärtsbewegung der Maschine sowie der automatische oder manuelle Status der Maschine. Im Falle des Einsatzes eines Verdichters kann außerdem der Verdichtungsmesswert über den Sensor auf der Walze des Verdichters miterfasst werden. Die tag-Dateien werden gepackt und alle fünf Minuten an die Trimble

#### 4.5 Maschinendaten von Hydraulikbaggern

Connected Community gesendet. Der Ablauf des Datenflusses ist in Abbildung 4-14 dargestellt. [72]

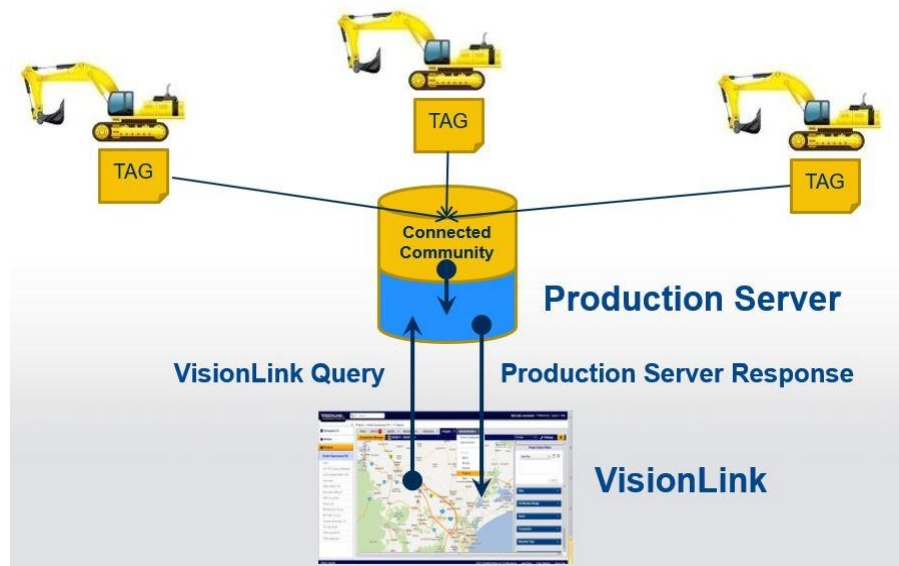


Abbildung 4-14: Datenfluss im System [72]

#### *Datenauswertung und Datenexport*

Der interne Datentransfer im Rahmen der Datenauswertung funktioniert auf eine ähnliche Weise wie im Unterkapitel 4.4.4 im Fall der Planierraupe beschrieben. Die über die Trimble Connected Community ausgefilterten und sortierten Daten werden an VisionLink übergeben. Hierfür müssen sich die in den tag-Dateien aufgenommenen Daten innerhalb der VisionLink-Projektgrenze befinden und innerhalb des Projektdatums und der Projektzeit liegen. Die fertigen Daten werden als ttm-Datei im VisionLink-Webportal ausgegeben. Die ausgegebenen Daten werden über das Trimble Business Center in xml-Dateien umgewandelt. [72] Die erstellten xml-Dateien werden in die Planungssoftware (wie z.B. Stratis oder ProVI) eingelesen und dienen als Basis für die Erstellung eines aktuellen digitalen Geländemodells. Das auf diese Weise erstellte digitale Modell des untersten Durchgangs im Rahmen des betrachteten Pilotprojektes kann in Abbildung 4-15 eingesehen werden. Die blauen Linien wurden zusätzlich für eine übersichtlichere Darstellung der Beckenaußenlinien hinzugefügt. Außer einer DGM-Ausgabe besteht die Möglichkeit, einen Gitter-Bericht mit eingegebenen Rasterabmessungen auszugeben. Die gelben Kreise in Abbildung 4-15 entsprechen jenen Punkten, deren 3D-Koordinaten in einer zusätzlichen Excel-Liste zur Kontrolle ausgegeben wurden. Ein Gitter-Bericht kann die Notwendigkeit einer Trassierung beseitigen sowie als Basis für die Überprüfung vonseiten der Bauherren, Ingenieure sowie des Managers fungieren. Der Abstand zwischen den Punkten des Gitters wird je nach Bauwerksart und Ebenheit der Geländeoberfläche bestimmt. Im Falle der vorliegenden Sandfilteranlage wurde ein Abstand von 10 m ausgewählt. [27] Während der Filterung und Sortierung der Daten im Trimble Connected Community ist die Kontrolle durch Abrechnungstechnikern wichtig, um die Übereinstimmung der aufgenommenen Daten mit der Realität zu überprüfen. Die Nachbearbeitung der aufgenommenen Maschinendaten wird von den Maschinensteuerungssystemtechnikern im Büro durchgeführt, demzufolge ist ein ständiger Informationsfluss von der Baustelle über die Abrechnungs-

techniker notwendig, damit die abzurechnenden Volumenkörper im nächsten Schritt von den Modellierern richtig erzeugt werden und keinen überflüssigen Datenmüll enthalten. Wegen des Einsatzes von mehreren Programmen ist der Schritt der Datenbearbeitung im Falle der modellbasierten Abrechnung mit den Baumaschinen komplizierter als jener im Falle einer konventionellen Abrechnung.

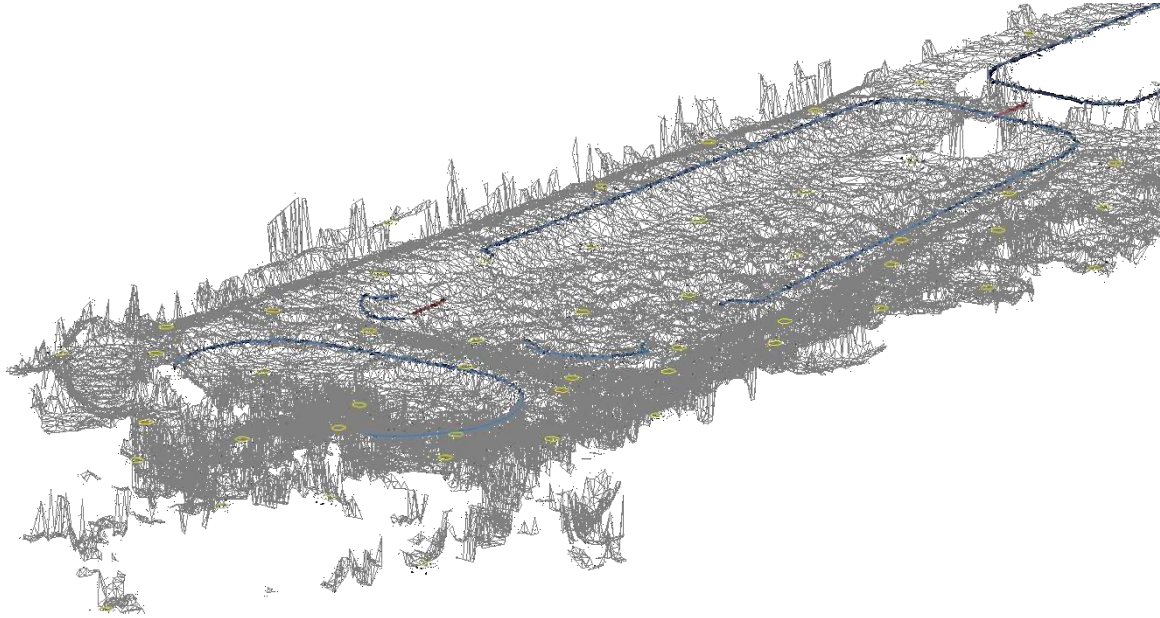


Abbildung 4-15: Digitales Geländemodell: unterster Durchgang des Baggers [27]

Neben dem digitalen Modell können aus dem System Querschnittsprofile ausgegeben werden. Die Querschnittsprofile entstehen durch die Verschneidung des untersten Durchgangs des Baggers mit der Urgeländeebene. Somit kann unter anderem eine vereinfachte Mengenauswertung über die Querprofile und den bekannten Abstand zwischen diesen durchgeführt werden. Eines der ausgegebenen Querschnittsprofile ist in Abbildung 4-16 zu sehen. Neben dem untersten Durchgang und dem Urgelände, sind der oberste Durchgang des Baggers sowie die Soll-Ebene abgebildet. Der hellblaue Bereich repräsentiert die geleisteten Abtragsmassen, der orange Bereich die Auftragsmassen. Am Beispiel dieses Querprofils sind die Abweichungen von der Soll-Ebene (pinke Linie) gut sichtbar. Diese sind dadurch entstanden, dass die Maschinendaten nicht ausgefiltert wurden. Für die Mengenauswertung wurde hierbei lediglich der unterste Durchgang der Schaufel als die untere Grenze des Abrechnungsmodells gewählt. Da es im Laufe der Erdbauarbeiten oft passieren kann, dass mit der Schaufel an einigen Stellen tiefer als das Soll-Gelände geschaufelt wird, müssen die Bestandsaufnahmedaten auf die richtige Weise gefiltert werden.

## 4.5 Maschinendaten von Hydraulikbaggern

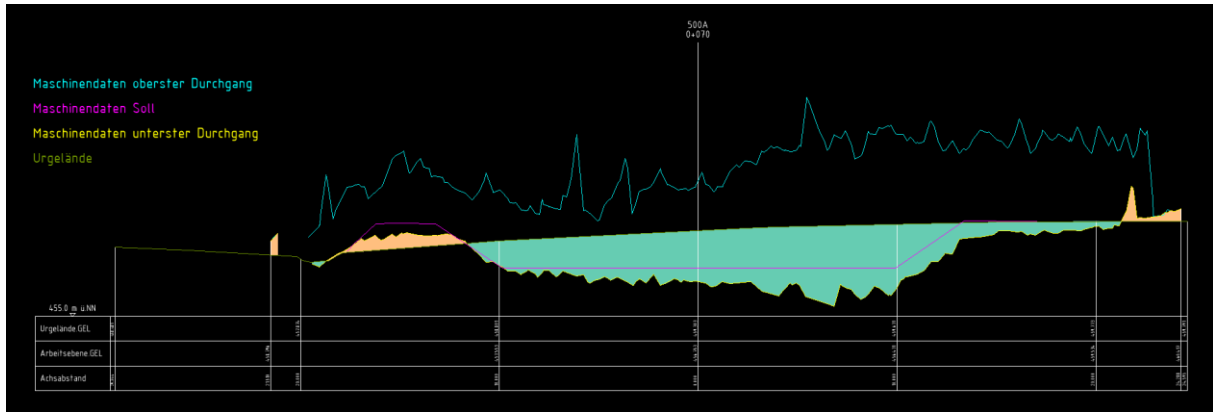


Abbildung 4-16: Ausgegebene Querschnittsansicht im 2. Becken (Profil 0+070) [27]

Nachdem ein DGM erstellt wurde, das dem entsprechenden Abrechnungszeitraum entspricht, erfolgt die Erstellung eines 3D-Modells in der Modellierungssoftware nach dem bereits bekannten Szenario, das schon in Unterkapitel 2.6.2 beschrieben wurde. Zur Kontrolle der aus dem Modell ermittelten Mengen können die Werte aus VisionLink herangezogen werden. Abbildung 4-17 repräsentiert die Gesamtmengen des Erdabtrags und des Erdauftrags zwischen den obersten und untersten Durchgängen des Baggers. Damit die Werte eine größtmögliche Genauigkeit erreichen, muss der obere Durchgang möglichst nah am Urgelände liegen.

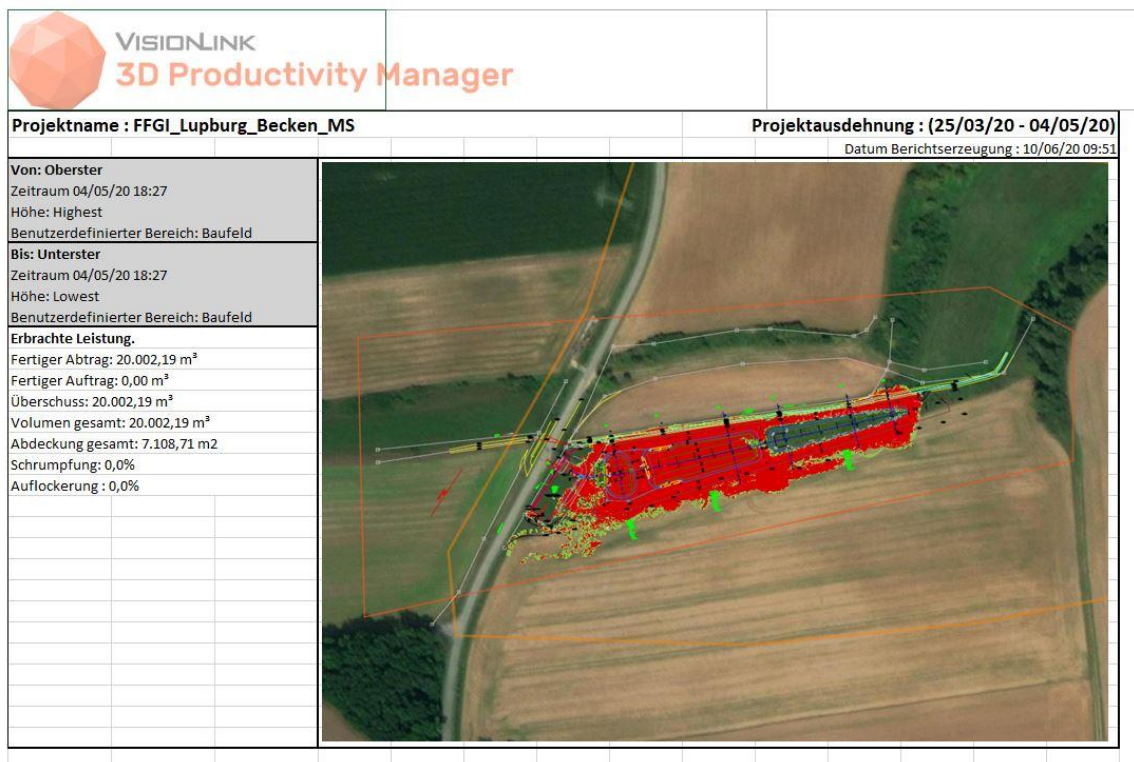


Abbildung 4-17: Ausgabe der ermittelten Ab- und Auftragsmengen über VisionLink [27]

### 4.5.5 Überlegungen zu alternativen Ablaufmöglichkeiten

Wie es aus dem Beispiel im Unterkapitel 4.5.4 erkennbar ist, können die Abweichungen der mit dem Maschinensteuerungssystem erfassten Mengen von den lt. Plan abzurechnenden Mengen sehr

groß sein, was die Funktionsfähigkeit des Konzeptes der modellbasierten Abrechnung mit dem Hydraulikbagger stark einschränkt. Damit das Konzept sein Potenzial vollständig entfalten kann, müssen diverse alternative Ansätze der monatlichen Bestandsaufnahmen berücksichtigt werden.

Eine der Möglichkeiten ist die punktweise Bestandsaufnahme, welche sich grundsätzlich auf die Idee der Vermessung von Querschnittsbruchpunkten aus Abschnitt 4.1 stützt. In enger Zusammenarbeit mit dem Vermessungsingenieur können von dem Abrechnungstechniker spezielle Punkte auf dem Baustellengelände ausgewählt werden, deren Koordinaten mit dem Hydraulikbagger am Ende des Arbeitstages aufgenommen werden sollen. Damit das daraus erzeugte digitale Geländemodell die Realität möglich genau abbildet, müssen alle Querschnittsbruchpunkte ausgewählt werden. Dieser Ansatz könnte bei verschiedenen kleinen Baustellen wie z.B. bei der bereits vorgestellten Sandfilteranlage aus Unterkapitel 4.5.3 eingesetzt werden, ist jedoch für eine Großbaustelle wegen des mit der Vermessungsdurchführung verbundenen Zeitaufwandes nur bedingt einsetzbar.

Eine andere Möglichkeit wäre eine Durchfahrt des Hydraulikbaggers mit der gesenkten Schaufel über das ganze Baustellengelände zum Ende des Abrechnungszeitraumes. Auf diese Weise wäre die Geländeoberfläche mit dem Hydraulikbagger auf die gleiche Weise aufgenommen, wie es im Unterkapitel 4.4.4 mit der Planierraupe vorgestellt wurde. Einer der Nachteile dieser Idee liegt in der Notwendigkeit des zusätzlichen Einsatzes des Maschinisten, welcher zusätzliche Lohn- und Treibstoffkosten verursacht. Ein anderer Nachteil ist der damit verbundene Zeitaufwand, der bei einer großen Baustelle die Vorteile des modellbasierten Ansatzes zunichtemachen kann.

Um das Problem des zusätzlichen Bestandsaufnahmeaufwandes zu beseitigen, wäre es sinnvoll, dass die Bestandsaufnahme doch während der Haupttätigkeit des Hydraulikbaggers durchgehend im Automatikmodus durchgeführt wird, jedoch mit einem wichtigen Unterschied zu dem Ansatz aus dem Unterkapitel 4.5.4. Zur Erzeugung des Abrechnungsmodelles für jeden Abrechnungszeitraum sollte nicht der unterste Durchgang herangezogen werden, sondern nur jene Punkte des untersten Durchgangs, die oberhalb des Soll-Geländes liegen, wenn es um den Erdabtrag geht. Dafür muss diese Zusatzbedingung im Automatikmodus im System aktiviert werden. Auf solche Weise werden die zu tiefen Punkte automatisch aussortiert und das Problem der Nichtübereinstimmung der unteren Grenze des Abrechnungsmodells mit der Ebene des Soll-Geländes kann somit beseitigt werden.

### 4.6 Prozessdiagramm

Die Wechselwirkungen zwischen den Projektbeteiligten im Rahmen der Konzepte der modellbasierten Abrechnung mit Baumaschinendaten sind jenen in der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen ähnlich. In Abbildung 4-18 ist das Prozessdiagramm der modellbasierten Abrechnung mit Maschinendaten ersichtlich, das den Konzepten mit dem Einsatz sowohl von Planierraupen als auch von Hydraulikbaggern entspricht.



## 4.6 Prozessdiagramm

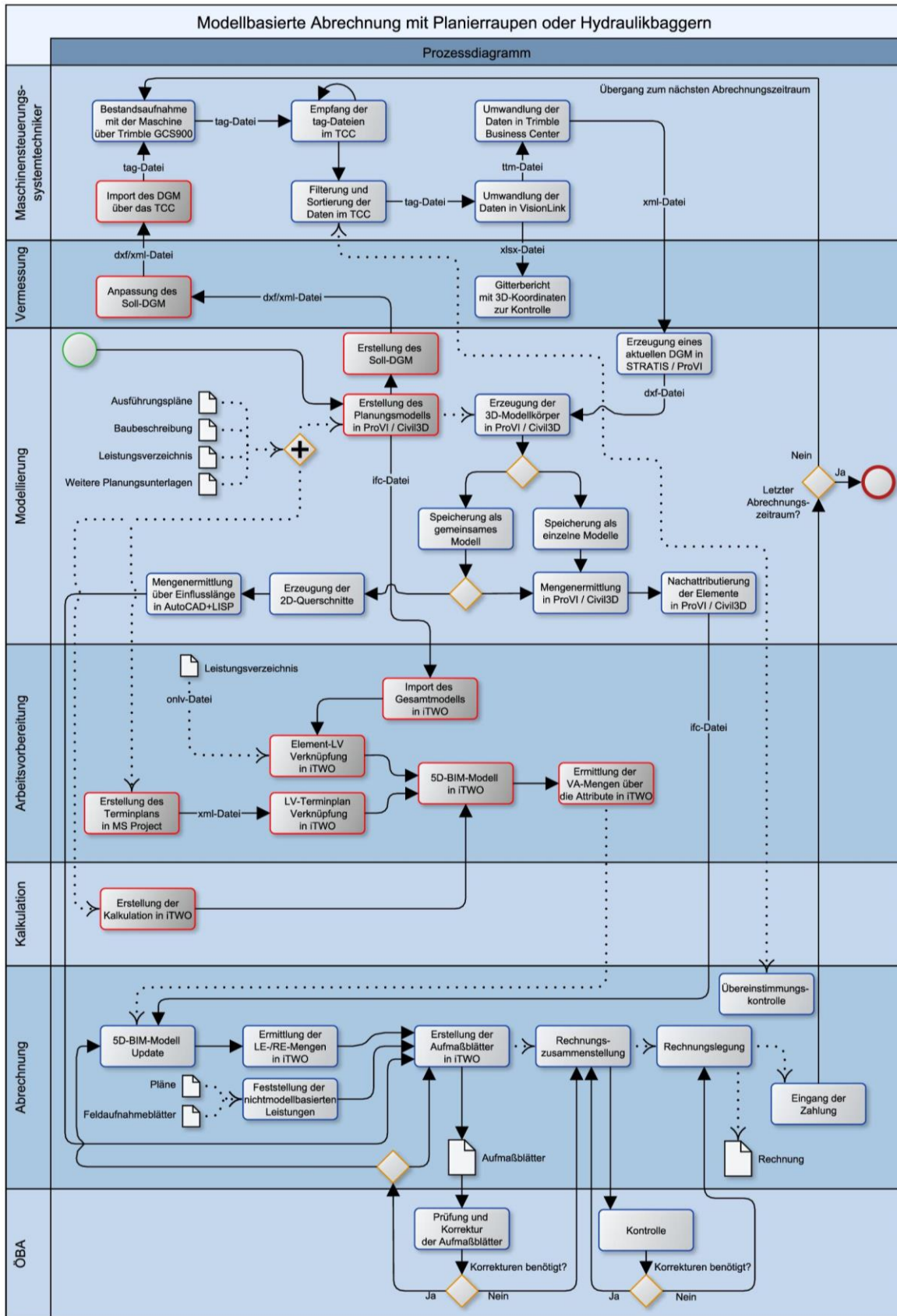


Abbildung 4-18: Prozessdiagramm zur modellbasierten Abrechnung mit den Baumaschinendaten

## 4.7 Rolle der Informationsmanagementsysteme

Der Einsatz mehrerer datengenerierender Geräte und die Integration der Maschinendaten tragen dazu bei, dass allmählich mehr Daten in elektronischer Form erfasst werden. Um den grundlegenden Zweck der modellbasierten Abrechnung, zu dem Ordnung und Übersichtlichkeit gehören, nicht zu widersprechen, muss ein geeignetes Datenmanagement organisiert werden. Hier kommen die Informationsmanagementsysteme ins Spiel, die auch als Cloud-Kollaborationssysteme bezeichnet werden. Funktionen eines Informationsmanagementsystems

Die Kombination von mehreren Maschinensteuerungssystemen wird durch ein Informationsmanagementsystem ermöglicht, welches die Daten aller Geräte mit verschiedenen Steuerungssystemen auf einer Plattform sammelt und bearbeitet. Alle auf der Baustelle verwendeten Vermessungsgeräte werden über eine Internetverbindung in das Cloud-Kollaborationssystem integriert. Die geometrischen Messungen auf einer Baustelle können mit Totalstationen, GNSS-Rovers oder Baumaschinen mit Maschinensteuerungssystemen durchgeführt werden. Alle durchgeführten Messungen werden sofort über die Internetverbindung in die Cloud übertragen und automatisch mit der Planung verglichen, um Höhenunterschiede und Farbcodierungen basierend auf den erforderlichen Toleranzen zu ermitteln. Die Messungen können über einen Webbrowser eines Computers oder Mobilgeräts auf einer Karte angezeigt und genehmigt werden. [34]

### 4.7.1 Informationsmanagementsystem Infrakit

Ein Beispiel für ein solches Informationsmanagementsystem ist Infrakit, das in Finnland speziell für Infrastrukturprojekte entwickelt wurde. Mit der Cloud-Technologie und offenen Formaten kann die Zusammenarbeit aller Beteiligten am Bauvorhaben unter einem verbesserten Informationsfluss ermöglicht werden. Die geplanten Modelle werden für das Außendienstteam aktualisiert und die Bestandsdaten für die Fortschritts- und Qualitätsüberwachung in Echtzeit integriert. [25] In Abbildung 4-19 ist ersichtlich, dass das System einen Datenaustausch zwischen den verschiedenen Systemen in allen Phasen des Projektes sicherstellt. Dazu zählen unter anderem die vier großen Maschinensteuerungssystementwickler, die bereits in Unterkapitel 4.3.6 erläutert wurden.

### 4.7.2 Anwendungserfahrung in Finnland

Die in Unterkapitel 4.7.1 beschriebene Methode sowie das Informationsmanagementsystem Infrakit selbst wurden in einigen Pilotprojekten in Finnland in den Bereichen Straßen- und Eisenbahnbau getestet. Dazu zählt unter anderem das Projekt einer Straßensanierung in Espoo, Finnland. [34]

Am Anfang wurden in diesem Projekt die BIM-Modelle in die Cloud-Kollaborationssoftware (Infrakit) hochgeladen, indem die Oberflächen der modellierten Schichten in offenen Datenformaten wie DXF oder LandXML aus der Planungssoftware exportiert wurden. Die Maschinensteuerungssysteme, Totalstationen und GNSS-Roverstäbe wurden über verfügbare Schnittstellen in das Cloud-Kollaborationssystem integriert. Dies kann entweder über einen direkten Link vom Gerät in die Cloud oder über die Job-Dateien durchgeführt werden, welche Informationen über die gemessenen Bestandspunkte enthalten. [34]

## 4.8 Zusammenfassung

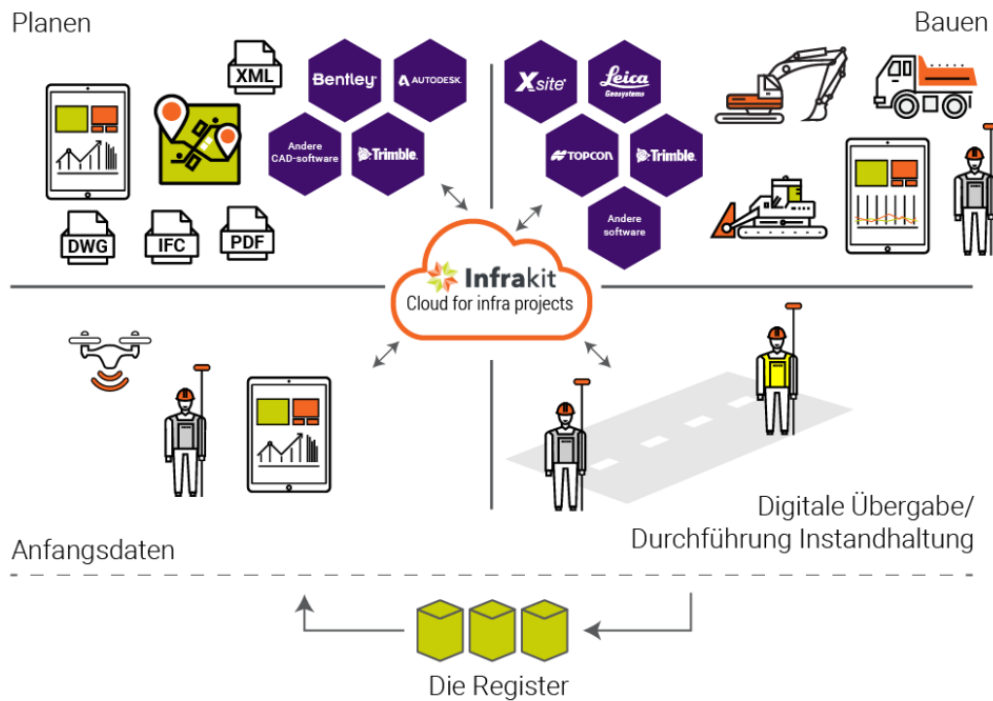


Abbildung 4-19: Funktionsweise des finnischen Informationsmanagementsystems Infrakit [25]

Nachdem die Punkte von den Bestandsaufnahmen in die Cloud übertragen wurden und für die aufgenommene Oberfläche die entsprechende Planungsoberfläche bestimmt wurde, werden die aufgenommenen Punkte mit der Planungsoberfläche verglichen, um den Unterschied in der Höhenkoordinate zu bestimmen. In Abhängigkeit der für die Planungsoberfläche definierten Toleranzen werden die Punkte auf einer Karte mit verschiedenen Farben dargestellt. [34]

Die Pilotprojekte haben gezeigt, dass die integrale Verwendung von mehreren digitalen Erfassungsmethoden über ein Informationsmanagementsystem die Geschwindigkeit der Qualitätsberichterstattung wesentlich verbessert und allen Projektbeteiligten eine hohe Transparenz sowie verbessertes Situationsbewusstsein ermöglicht, was zu einer Vorsehbarkeits- und Rentabilitätsverbesserung des Projektes führt. [34]

## 4.8 Zusammenfassung

Der Einsatz von Baumaschinendaten in der modellbasierten Abrechnung ist eine vielversprechende und innovative Methode der Datenerfassung, die im Bereich des Verkehrswegebbaus sehr perspektivenreich ist. Die Analyse der aktuellen Pilotprojekte beim kooperierenden Bauunternehmen sowie eine gründliche Analyse der themenrelevanten wissenschaftlichen Arbeiten hat ergeben, dass die unterschiedlichen Konzepte der Integration der Maschinendaten je nach Typ der Baumaschine und des Maschinensteuerungssystems einige Unterschiede aufweisen. Eine passende Kombination der Baumaschinen und Maschinensteuerungssysteme muss individuell in Abhängigkeit von der Baustellenart sowie dem Projektumfang gefunden werden, damit die Vorteile

gegenüber der konventionellen Abrechnung wie beispielsweise eine Effizienzsteigerung ersichtlich werden.

Ein flächendeckender Einsatz der modellbasierten Abrechnung fand bisher nicht statt. Dies hat sowohl technische als auch wirtschaftliche Gründe. Zu den technischen Gründen gehören die Neuheit der Methode sowie der momentan noch fehlende standardisierte Arbeitsablauf. Aus wirtschaftlicher Sicht sind vor allem die Software- und Ausbildungskosten sowie die hohen Anschaffungskosten der Maschinensteuerungsausrüstung, die eine zentrale Rolle bei der Datenerfassung in allen betrachteten Konzepten der modellbasierten Abrechnung einnimmt zu berücksichtigen.

Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal der modellbasierten Abrechnung mit Integration der Maschinendaten liegt wie im Fall der Drohnen im Schritt der Bestandsaufnahme, welcher jedoch im Vergleich zu den Drohnen eventuell weniger Zeit in Anspruch nehmen kann. Wenn angenommen werden kann, dass die eingesetzten Baumaschinen bereits mit einem Maschinensteuerungssystem zur Ausführung ihrer Hauptfunktionen ausgerüstet sind, ist es in einigen Fällen möglich, dass keine zusätzlichen Kosten im Vergleich zu den herkömmlichen Abrechnungsarten anfallen. Dies ist jedoch von den individuellen Einsatzbedingungen abhängig.

Das erste Gerät, dessen Anwendbarkeit für die modellbasierte Abrechnung analysiert wurde, ist die Planierdrape. Die Vor- und Nachteile ihrer Anwendung sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Zu den Nachteilen der Anwendung einer Planierdrape können die limitierte Anwendungsflexibilität sowie die konstante Abweichung bei der Mengenermittlung gezählt werden. Eine Bestandsdatenaufnahme mit der Planierdrape ist lediglich auf Baustellen mit rauer Geländeoberfläche zweckdienlich, was nicht in allen Phasen eines Straßenbauprojekts der Fall ist. Die Ermittlung der Mengen mit der Planierdrape kann je nach ausgewähltem Aufzeichnungsmodus im Vergleich zu konventionellen Vermessungen konstante Abweichungswerte aufweisen, die bei der Abrechnung berücksichtigt werden müssen. Zu den Vorteilen gehören hohe Flexibilität in Bezug auf die Auswahl des Steuerungssystems sowie die relativ schnelle Bestandsaufnahme. Die von Seichter [57] betrachteten Anwendungsbeispiele haben gezeigt, dass die Planierdrape mit verschiedenen konkurrierenden Steuerungssystemen, Ergebnisse in akzeptabler Qualität liefern kann, was dem Auftragnehmer Wahlfreiheit gibt und zudem durch Herstellerkonkurrenz die weitere Produktentwicklung beschleunigt. Die Dauer der Bestandsaufnahme im Vergleich zu konventionellen Vermessungsmethoden war unter anderem dank der vermiedenen Transportzeiten der Vermesser auf den betrachteten Baustellen weitaus geringer. Mit der Vergrößerung der Fläche der Baustelle steigt die Effizienz dieser Methode, da eine Planierdrape die Oberfläche nicht punktweise, sondern flächenbezogen aufnehmen kann.

Tabelle 4-1: Entdeckte Vorteile und Nachteile der Modellbasierten Abrechnung mit der Planierdrape

Vorteile	Nachteile
Flexible Auswahl des Steuerungssystems	Limitierte Anwendungsflexibilität
Relative Schnelligkeit der Bestandserfassung	Konstante Abweichungen bei der Mengenermittlung

Das zweite betrachtete Gerät ist der Hydraulikbagger, der im Rahmen eines Pilotprojektes eingesetzt wurde, die Vor- und Nachteile seiner Anwendung sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst. Zu

## 4.8 Zusammenfassung

den Nachteilen seiner Anwendung in der modellbasierten Abrechnung können die begrenzte Datenaufnahmekapazitäten sowie Abweichungen bei der Mengenermittlung gezählt werden. Die Kapazitäten der Bestandsdatenaufnahmen sind in ausgedehnterem Maße aus technologischen Gründen begrenzt, da ein Bagger die Geländeoberfläche lediglich punktwiese oder flächenweise mit kleiner Erfassungsbreite aufnehmen kann. Aus diesem Grund ist eine modellbasierte Abrechnung ausschließlich mit Baggern bei großflächigen Baustellen schwer vorstellbar. Ähnlich wie im Fall der Planierraupe muss bei dieser Art der Bestandsaufnahme mit konstanten Mengenabweichungen gerechnet werden, die bei der Abrechnung unbedingt berücksichtigt werden müssen. Bezüglich den Vorteilen können ebenso wie bei der Planierraupe die Flexibilität bei der Auswahl des Steuerungssystems sowie die große Anwendungsflexibilität betont werden. Da die Daten mit der Schaufel erfasst werden, können schwer zugängliche Punkte aufgenommen werden, wodurch Geländeoberflächen von beliebiger Rauigkeit aufgenommen werden können. Dies ermöglicht den Einsatz der modellbasierten Abrechnung auf nahezu allen Baustellen im Bereich des Verkehrswegebbaus.

*Tabelle 4-2: Entdeckte Vorteile und Nachteile der Modellbasierten Abrechnung mit dem Hydraulikbagger*

Vorteile	Nachteile
Flexible Auswahl des Steuerungssystems	Begrenzung der Datenaufnahmekapazitäten
Große Anwendungsflexibilität	Abweichungen bei der Mengenermittlung

Im Rahmen dieses Kapitels konnten lediglich zwei Baumaschinen betrachtet werden, die flächendeckend auf beinahe jeder Baustelle im Bereich des Verkehrswegebbaus Gebrauch finden können. Trotz entstandenen Herausforderungen und einer noch bevorstehenden erheblichen Prozessoptimierung haben sich diese Baumaschinen für die Bestandsdatenlieferung in der modellbasierten Abrechnung gut etabliert. Dennoch haben auch andere Geräten wie zum Beispiel Grader oder Asphaltfertiger großes Potential, da sie ebenso wertvolle Daten für die modellbasierte Abrechnung liefern können. Die Analyse dieser Geräte sprengt jedoch den Rahmen dieser Arbeit, deren Ziel es war, sich in erster Linie auf die allgemein verbreiteten Baumaschinen zu konzentrieren.



# 5 Entwicklungsthemen für die modellbasierte Abrechnung

Damit die modellbasierte Abrechnung im Verkehrswegebau flächendeckend und einwandfrei eingesetzt werden kann und somit einen Mehrwert für alle Projektbeteiligten generiert, ist die Weiterentwicklung der in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Konzepte notwendig. Die Überlegungen zur weiteren Prozessentwicklung im Bereich Abrechnung im Verkehrswegebau werden im Folgenden gesammelt.

## 5.1 Allgemeine Entwicklungsrichtungen

In der Zukunft werden Bauobjekte vollständig modellbasiert abgerechnet werden. Um die Effizienz des Prozesses zu steigern, sind einheitliche Standards entlang der ganzen Wertschöpfungskette notwendig. Auf der Basis der aktuell angewendeten Abrechnungsregeln müssen die elektronischen Abrechnungsnormen angepasst werden sowie die bereits vorgestellten digitalen Instrumente zur Erfassung des Baufortschritts wie Drohnen, Sensoren und klassische Vermessungsverfahren flächendeckend eingesetzt werden. Die Grundbedingung dafür ist die Schaffung von funktionierenden Datenschnittstellen sowie von Möglichkeiten zur Echtzeitdatenerfassung auf der Baustelle. [19]

### 5.1.1 Iterationsreduktion

Die konventionelle Projektbearbeitung zeichnet sich durch eine große Anzahl an iterativen Mengenermittlungen aus, die in unterschiedlichen Projektphasen durchgeführt werden. In einigen Projekten können die Mengen laut den befragten Experten bis zu fünf Mal neu kalkuliert werden. Die ersten zwei Mengenermittlungen auf Seiten des AN finden dabei in der Angebotsphase statt: eine für die Erstellung der Angebotskalkulation für die Erstellung eines Angebotsterminplans und die andere im Rahmen der Arbeitsvorbereitung zur Entwicklung eines Logistikkonzeptes. Die dritte Mengenermittlung wird für den Vergleich zwischen den Ausführungs- und den Ausschreibungsplänen in der Auftragsphase durchgeführt. Die restlichen zwei Mengenermittlungen finden in der Ausführungsphase statt: eine davon für die Materialbestellungen und die Kontrolle auf der Baustelle und die andere für die Abrechnung. Der zusätzliche Aufwand, der aus diesen iterierenden Berechnungen entsteht, kann durch die Einführung der modellbasierten Abrechnung wesentlich verringert werden. Um das Problem flächendeckend zu eliminieren, sind globale Anpassungen der aktuellen Regelwerke erforderlich.

### 5.1.2 Standardisierung und Automatisierung

Um alle Vorteile der modellbasierten Abrechnung im Verkehrswegebau nutzen zu können, müssen die Prozesse laut Experten standardisiert und automatisiert werden. Durch die Standardisierung wird die Qualität der Arbeiten gewährleistet, während durch die Automatisierung das Problem des Personalmangels in den Abrechnungsprozessen behoben werden kann.

Die Regelungen in den aktuellen abrechnungsbezogenen österreichischen Normen, die in den Grundlagen dieser Arbeit vorgestellt wurden, sind derzeit noch nicht ausformuliert genug, um

Bauobjekte vollständig modellbasiert ohne Ausgabe von 2D-Querschnitten abrechnen zu können. In den BIM-bezogenen Normen ist geregelt, dass die Abrechnungsregeln vom Auftraggeber bzw. durch die Werkvertragsnormen außer Kraft gesetzt werden können, obwohl es dafür noch keine standardisierte Vorgehensweise gibt. Ein wichtiger Schritt in Richtung Standardisierung bei den modellbasierten Abrechnungsprozessen ist die Herausgabe weiterer ÖNORMen aus der Gruppe A 6241, welche der digitalen Bauwerksdokumentation gewidmet sind. Ein besonderes Highlight auf diesem Weg ist die geplante Herausgabe der neuen ÖNORM A 2063-2:2018 10 01 „Austausch von Leistungsbeschreibung-, Elementkatalogs-, Angebots-, Auftrags- und Abrechnungsdaten in elektronischer Form – Teil 2: Berücksichtigung der Planungsmethode Building Information Modeling (BIM) Level 3“, die sich noch in ihrer Entwicklungsphase befindet. Mithilfe dieser Norm werden Regelungen für den Aufbau von Datenbeständen entwickelt, die in den AVA-Prozessen automationsunterstützt zwischen allen Projektbeteiligten ausgetauscht werden. [52]

Sobald die Standardisierung und die Automatisierung der modellbasierten Abrechnung einen hohen Umsetzungsgrad erreicht, können viele zusätzliche Vorteile erwartet werden. Dazu gehören zum Beispiel der Transparenzgewinn, die Beschleunigung des Abrechnungsprozesses, eine beträchtliche Vereinfachung der Prüfung von Leistungszuständen für die ÖBA, eine effizientere Nachtragsbearbeitung bei Mehrleistungen, welche bestimmten Objekten zugeordnet werden können, sowie die Vereinfachung der kaufmännischen Prüfung durch bessere Vergleichsmöglichkeiten der Rechnungsmengen mit den Leistungsmengen. [16]

### 5.1.3 Mehr Leistungen in der Planungsphase

Der phasenübergreifende Einsatz von BIM führt zu einer Aufwandsverlagerung gegenüber den bisherigen Abläufen, da einige Aufgaben aus der Ausführungsphase in die Planungsphase übertragen werden. Da die Modellierungsaktivitäten vorwiegend Teil der Planungsphase werden, kann dank dem Modell die Anzahl der in Unterkapitel 5.1.1 beschriebenen iterierenden Mengenermittlungen vermindert werden. Durch die 3D-Aufbereitung ist die Möglichkeit einer früheren Problemerkennung gegeben, was die Anzahl von spontanen Entscheidungen auf der Baustelle verringern soll. [9]

Im Verkehrswegebau kann die Wichtigkeit einer solchen Aufwandsverlagerung mittels eines Beispiels mit Bodenschichten demonstriert werden. Wenn ein Planungsmodell mit Bodenschichten nur auf fünf oder sechs Bohrungen basiert und das ausführende Unternehmen danach auf der Basis von 20 zusätzlichen Bodenaufschlussbohrungen wesentliche Abweichungen vom Planungsmodell feststellt, führt dies zwangsläufig zu einer Mehrkostenforderung, die sich unter anderem auf den Abrechnungsprozess auswirkt. Aus diesem Grund ist es im Interesse des Planers sowie des Auftraggebers, der Planung mehr Zeit zu widmen, damit die Modelle von vornherein für eine effiziente Anwendung in der Ausführung konsistent genug erstellt werden. Allerdings ist eine genauere Bodenerkundung auch bei konventioneller Projektbearbeitung wünschenswert, somit wäre der Mehrwert sowohl bei der konventionellen als auch bei der modellbasierten Projektbearbeitung von Vorteil.

Eine wichtige Voraussetzung für die modellbasierte Abrechnung ist die Konsistenz des Modells selbst sowie seine Verknüpfung mit dem Leistungsverzeichnis. Damit es bei der modellbasierten



## 5.1 Allgemeine Entwicklungsrichtungen

Mengenermittlung zu geringstmöglichen Abweichungen kommt, müssen die Modellelemente mit den LV-Positionen auf richtig verknüpft werden. Damit Verknüpfungsfehler und diverse Missverständnisse vermieden werden können, müssen vom Auftraggeber bereits bei der Ausschreibung genaue Zuordnungsregeln festgelegt werden. [52]

### 5.1.4 Kommunikation

Die Einführung der modellbasierten Abrechnung hat unter anderem auch das Ziel der Kommunikationsverbesserung. Eine ordentliche Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten spielt in den Abrechnungsprozessen eine wichtige Rolle. Laut den befragten Experten können im Laufe der Abrechnung diverse Interessenskonflikte zwischen den Projektbeteiligten aufkommen, da im Falle einer Streitsituation jede Partei meist ausschließlich auf das eigene Interesse besteht. Der häufigste Grund für Missverständnisse zwischen der ÖBA auf Seiten des Auftraggebers und dem Abrechnungstechniker des Auftragnehmers entsteht bei der Mengenüberprüfung anhand der Planungsunterlagen. Mit den konventionellen Planungsmethoden können Inkonsistenzen zwischen zum Beispiel der Baubeschreibung und den diversen Plänen nicht immer ausgeschlossen werden. Die Einführung einer modellbasierten Abrechnung mit einer parallelen Neuorganisation der Planungsprozesse wie im Unterkapitel 5.1.3 beschrieben soll solche Situationen verringern.

Mit einer erhöhten Qualität der Planungsunterlagen und der Einführung einer phasenübergreifenden modellbasierten Projektbearbeitung lässt sich eine produktive Zusammenarbeit zwischen den Projektbeteiligten gegenseitiger Interessengruppen besser gestalten – das Ziel ist eine Teamarbeit zwischen AG, AN und ÖBA wie im fennoskandischen Raum zu schaffen. Die Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die ÖBA eine geeignete IT-Infrastruktur besitzt. Der ÖBA müssen angemessene Werkzeuge für die Prüfung des Modells zur Verfügung gestellt werden, damit eine konsistente Modellprüfung möglich ist. Ein weiterer wichtiger Aspekt der effizienten Kommunikation ist die Rechtzeitigkeit der Meldungen im Laufe der Abrechnung. Wenn vom AN Fehler in den Planungsunterlagen erkannt werden, müssen sie sofort gemeldet werden, damit die Bauarbeiten so schnell wie möglich umgeplant werden können und die Mehrkostenforderung rechtzeitig gelegt wird.

### 5.1.5 Nachhaltigkeit

In den letzten Jahren wurde das Thema der Nachhaltigkeit branchenübergreifend immer aktueller. Die aktive Wirtschaftstätigkeit der globalen Gesellschaft sowie die langjährige Verfolgung des Wirtschaftswachstums beschleunigen den Klimawandel, wobei auch die Baubranche eine wesentliche Rolle spielt. Allgemeine Optimierungsmaßnahmen der Bauprozesse und insbesondere die Optimierungsmaßnahmen der Abrechnungsprozesse durch den Übergang zur modellbasierten Abrechnung verfolgen neben allgemeinen Zielen wie Schnelligkeit und Konsistenz auch das Ziel einer gesteigerten Nachhaltigkeit.

Ein Beispiel im Verkehrswegebau kann die Wiederverwendung der abzurechnenden Erdmengen sein, da die Deponiekosten wegen zunehmendem Platzmangel immer teurer werden. Außerdem entsteht beim Transport der Erdmassen zur Deponie ein beträchtlicher zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Aus-

stroß. Diese Probleme können mit der Wiederverwendung der abgetragenen Erdmassen eliminiert werden, wenn diese zum Beispiel als Lärmschutzdamm in einer anderen, naheliegenden Verkehrswegebau- oder in einem anderen Baulos verwendet werden. Damit diese Erdmassen rechtzeitig vom “Spender-Baulos” zum “Empfänger-Baulos” transportiert werden können, müssen sie auch rechtzeitig, genau und synchronisiert abgerechnet werden. Hier kommt die modellbasierte Abrechnung ins Spiel, die somit im Zusammenhang mit einem vernünftigen Logistik-konzept ihren Beitrag zum Klimaschutz leisten kann.

## 5.2 Tablets als Bestandsdatenerfassungsmittel

Zusätzlich zu den Drohnen, Laserscannern, Totalstationen und Baumaschinen können zu Bestandsmodellierung im Rahmen der modellbasierten Abrechnung Mobilgeräten wie Smartphones oder Tablets herangezogen werden. In diesem Unterkapitel wird ihre Anwendungsfähigkeit analysiert.

### 5.2.1 Einsatzpotenzial

Die Qualitätsbewertung war immer eine herausfordernde Aufgabe in der AEC-Industrie (engl.: Architecture, Engineering and Construction), die Bereiche der Architektur, des Ingenieurwesens sowie des Bauwesens umfassen. In den letzten Jahren wurden 3D-Bestandsmodelle für die Qualitätskontrolle unter Verwendung von Datenerfassungstechniken wie dem 3D-Laserscanning und der Photogrammetrie entwickelt, deren Funktionsweise in den Grundlagen dieser Arbeit bereits vorgestellt wurden. Allerdings schränken Nachteile wie Nichterschwinglichkeit, das Erfordernis von Fachwissen für den Betrieb und die Abhängigkeit von zeitaufwändigen Prozessen die Verwendung dieser Techniken ein. Eine mögliche Lösung dieses Problems ist der Einsatz mobiler Geräte. Die Anwendbarkeit einer neuen, erschwinglichen, benutzerfreundlichen und schnelleren Modellierungstechnologie zur Erstellung von 3D-Bestandsmodellen mit Mobilgeräten wird im Rahmen des Projektes Tango erforscht. [32] Wichtig ist dabei zu beachten, dass die beschriebenen Modelle ihre Anwendung nicht nur in der Qualitätskontrolle finden können, sondern auch in der modellbasierten Abrechnung.

### 5.2.2 Anwendung

Die Project Tango-Technologie ist das Ergebnis eines Entwicklungsprojektes von Google. Im Rahmen dieses Projektes werden mithilfe eines mobilen Tablet-Geräts räumliche Modelle der Umgebung erstellt. Das Gerät ist in Abbildung 5-1 ersichtlich. Das Projekt verwendet die Advanced Vision, einen Tiefensensor, sowie Bildverarbeitungswerkzeuge. Der Tiefensensor ist an der Aufzeichnung der räumlichen Umgebung und der Erstellung direkter 3D-Bestandsmodelle beteiligt; er liest die reflektierten Infrarotlichter mit der Infrarotkamera des Geräts ein. Das System ermöglicht zwei Arten der Modellgenerierung. Die erste Möglichkeit ist die Generierung über die App Tango Constructor direkt auf dem Gerät eines 3D-Netzobjektes, das anschließend in das OBJ-Format exportiert werden kann. Die zweite Möglichkeit ist die Generierung einer 3D-Punktwolke mit einem Speicherlimit von bis zu 500.000 Punkten über die App Tango Room Scanner. In diesem

## 5.2 Tablets als Bestandsdatenerfassungsmittel

Fall erfolgt die nachträgliche geometrische Modellierung mithilfe einer open-source Software wie zum Beispiel Meshlab. Nachdem das Modell generiert wird, kann es im dxf-Format exportiert werden. [32]



Abbildung 5-1: Projekt Tango Gerät [32]

Im Rahmen der Studie wurde die Anwendung mittels drei verschiedener Bauobjekte analysiert: dem Fundament und zwei Innenhallen. Das Modell des betrachteten Fundaments ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Genauigkeitsfehler der mit dem Project Tango-Gerät erstellten Bestandsmodelle in Bezug auf absolute Fehler gering waren. Im Experiment lagen die Fehler beim Fundament bei 0,5 cm bis 5 cm für Objekte unter 2 m Länge bei den zwei Innenhallen bei 5 cm bis 6 cm für Objekte unter 4 m Länge. Die Analyse ergab, dass Project Tango ein durchaus möglicher Weg für die Generierung von Bestandsmodellen in Abhängigkeit von Projektanforderungen ist. Bei Projekten mit Budgeteinschränkungen sowie bei Projekten, die keine Entwicklung von hochpräzisen Modellen erfordern, kann somit die Anwendung von Project Tango laut Analyse eine gute Alternative zum 3D-Laserscannen sein. Das Project Tango kann außerdem anstatt der klassischen Photogrammetrie eine geeignete Lösung für Projekte sein, bei denen die Bestandsmodelle ohne besondere Fachkenntnisse in der Vermessung schnell generiert werden sollen. [32]

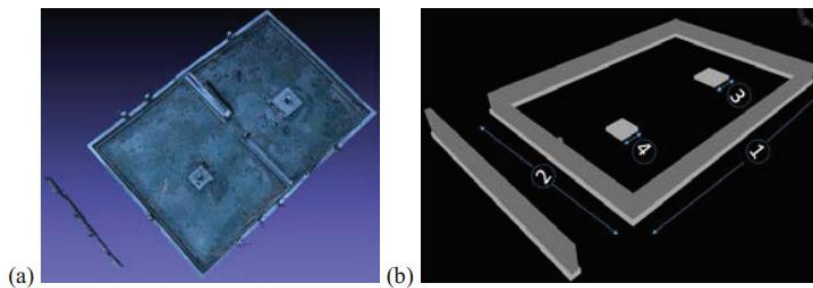


Abbildung 5-2: Mit Tango generiertes Bestandsmodell in äußeren Bedingungen (links), Modell aus der Planung (rechts) [32]

### 5.2.3 Zusammenfassung

Die Analyse im Rahmen der kanadischen Studie von Kalyan et al. [32] zur Anwendung eines Tablets in der Bestandsaufnahme hat ergeben, dass das Tablet unter bestimmten Bedingungen eine gute Alternative zu den klassischen Vermessungsmethoden sein kann. Die Analyse der Dimensi-

onsgenauigkeit ergab, dass ein mit einem Tablet erzeugtes Modell nahezu genau sein kann. Sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht hat eine solche Art der Bestandsaufnahme für die modellbasierte Abrechnung hohes Einsatzpotential. Allerdings sind noch diverse Testungen in aktiven Pilotprojekten im Bereich des Verkehrswegebbaus erforderlich, um das Einsatzpotential eindeutig zu definieren. Besonders Hoffnung gibt die mögliche Anwendung des Tablets in den Übergangsbereichen zwischen Straßen- und Ingenieurbauobjekten, die mit Drohnen und Baumaschinen aus technischen Gründen nicht immer mit ausreichender Genauigkeit aufgenommen werden können.

# 6 Forschungsergebnisse

In diesem Teil der Arbeit werden die Forschungsergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst, die im Rahmen der Arbeit gestellten Forschungsfragen beantwortet und der über den Rahmen der Arbeit hinausgehende weitere Forschungsbedarf zusammengefasst.

## 6.1 Zusammenfassung

Dieses Unterkapitel stellt eine allgemeine inhaltlich chronologische Zusammenfassung dar und dient dem Grundverständnis für die Beantwortung der Forschungsfragen. Es wird insbesondere ein Akzent auf die wichtigsten Themenpunkte der Arbeit gelegt und die daraus resultierenden Forschungsergebnisse kurz vorgestellt.

Zu Beginn der Arbeit wurde auf die Grundlagen eingegangen, sowohl der BIM-Methode als auch der Abrechnung, da die modellbasierte Abrechnung als Fusion dieser zwei Bereiche zu verstehen ist. Wichtig war es unter anderem, einen Überblick über jene aktuellen Technologien zu bekommen, die die Grundlagen für alle Konzepte der modellbasierten Abrechnung sind. Außerdem wurde der Ablauf bei der konventionellen Abrechnung im Bereich des Verkehrswegebau betrachtet, der eine Basis für den Vergleich mit den erforschten experimentellen Methoden der modellbasierten Abrechnung geschaffen hat. Auf die Kerngedanken und Konzepte letzterer, auf welchen die weiteren Analysen beruhen, wurde am Ende des zweiten Kapitels näher eingegangen.

Mit einem der zwei Kernthemen dieser Diplomarbeit befasste sich das dritte Kapitel, dabei wurde das Potential eines Drohneneinsatzes umfassend auf der Basis eines niederösterreichischen Pilotprojekts im Bereich des Straßenbaus analysiert. Da im Rahmen des Projektes aufgrund der Projektbedingungen die modellbasierte Abrechnung nicht vollständig dreidimensional durchgeführt werden konnte, wurde zusätzlich ein alternativer Ablauf auf Basis eines Testprojektes analysiert. Ein besonderer Akzent wird dabei auf die periodischen Bestandsaufnahmen gelegt, da diese das Hauptunterscheidungsmerkmal der Methode gegenüber anderen Abrechnungsmethoden bilden. Die Analyse der Unterprozesse ergab, dass die gesamte Methode trotz notwendiger, beträchtlicher Verbesserungs- und Optimierungsmaßnahmen erfolgreich Anwendung im Verkehrswegebau finden kann, und somit mit den allgemeinen Zielen der modellbasierten Abrechnung übereinstimmt, zu denen in erster Linie Zeitersparnis und Qualitätssteigerung gehören.

Das zweite Kernthema dieser Arbeit bildet das vierte Kapitel, dieses widmet sich dem Einsatz von Baumaschinendaten in der modellbasierten Abrechnung auf der Basis eines Pilotprojektes in Deutschland beziehungsweise mithilfe der Recherche von praxisbezogener und wissenschaftlicher Literatur analysiert. Im Rahmen dieser Arbeit konnte das Einsatzpotential eines Hydraulikbaggers sowie einer Planierdraupe ausführlich untersucht werden. Eine zentrale Rolle übernehmen bei den betrachteten Baugeräten die Baumaschinensteuerungssysteme, die für den Datenaustausch und die Datenintegrität verantwortlich sind. Mit diesen Systemen wird ein konsistenter Datenfluss gewährleistet, wodurch die Zeit für die Datenbearbeitung und somit auch die Prozesskosten minimiert werden. Trotz der aufgetretenen Schwierigkeiten im betrachteten Projekt in Bezug auf die Datenübertragung hat sich diese Methode als applikabel bewährt. Es besteht jedoch

auch großes Potential für andere Geräte wie zum Beispiel Bohrer oder Rammmaschinen, eine Analyse derer aber über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen würde.

Im letzten Kapitel wurden weitere entwicklungsbezogene Themen behandelt, die für die weitere Entwicklung der modellbasierten Abrechnung im Verkehrswegebau von Priorität sind. Dazu gehört sowohl die zukünftige Rollenverteilung als auch der Anschluss der mobilen Geräte an den Abrechnungsprozess, damit der Prozess in Zukunft so schnell und effizient wie möglich erfolgt. Besonderen Wert wurde auf die Standardisierung gelegt, da die Bauprozesse immer komplexer werden und eine große Anzahl unterschiedlicher Parteien miteinschließen. Damit die erforschten Prozesse einen Mehrwert für alle Beteiligten bringen, müssen alle Prozesse zu einem gemeinsamen Nenner geführt werden.

## 6.2 Beantwortung der Forschungsfragen

In dieser Diplomarbeit wurden vier Forschungsfragen betrachtet. In diesem Unterkapitel folgt die Beantwortung dieser Forschungsfragen.

### 6.2.1 Forschungsfrage 1

*Gibt es einen Unterschied zwischen der modellbasierten und konventionellen Abrechnung bezüglich dem Aufwand und der Genauigkeit der Ergebnisse? Welcher Mehrwert entsteht für die Projektbeteiligten, wenn sie sich für die modellbasierte Abrechnung im Zuge eines Verkehrswegebauprojektes entscheiden?*

Die konventionelle und die modellbasierte Abrechnung verfolgen in jedem Prozess die gleichen Ziele: Schnelligkeit und Genauigkeit der Ergebnisse, was die Basis für regelmäßige und vollständige Zahlungen seitens des Auftraggebers bilden. Einer der Unterschiede zwischen diesen zwei Prozessarten besteht in den Ansätzen, mit denen diese Ziele erreicht werden können. Im Falle einer konventionellen Abrechnung kann die Erreichung dieser Ziele hauptsächlich durch Erhöhung der Personalauslastung gesichert werden. Die modellbasierte Abrechnung jedoch ermöglicht durch die Innovativität des Projektbearbeitungsansatzes eine Skalierung der Zielerreichungsmöglichkeiten, die sich dadurch auszeichnet, dass die Zielerreichung durch eine ständige technologische Prozessoptimierung präzisiert wird. Die Ergebnisse der in dieser Arbeit betrachteten Projekte zeigen, dass sich der Aufwand bei der konventionellen und der modellbasierten Abrechnung auf einem vergleichbaren Niveau befindet. Bei der Genauigkeit der Ergebnisse gibt es jedoch einige Unterschiede in den ermittelten Mengen, wobei diese Unterschiede in der Genauigkeit von der Art des jeweiligen Projekts abhängen. Diese Unterschiede können jedoch unter bestimmten Bedingungen auf ein unbedeutendes Niveau minimiert werden, was den Konzepten der modellbasierten Abrechnung ihre Existenzberechtigung gibt.

Die Perspektiven in der Softwareentwicklung sowie der technologische Fortschritt dürfen dabei nicht unberücksichtigt bleiben, da sich der Prozess in einer laufenden Entwicklung befindet und eine klare Tendenz in Richtung verkürzter Datenverarbeitungszeiten besteht. Unter der Berücksichtigung dieses Faktors sowie der Tendenz zu steigenden Arbeitskosten können keine eindeutigen Schlussfolgerungen gezogen werden, wenn dabei ausschließlich die Kosten und die Dauer

## 6.2 Beantwortung der Forschungsfragen

des Prozesses berücksichtigt wird. Unter der Berücksichtigung desselben Faktors kann jedoch zusammenfassend festgestellt werden, dass der Mehrwert für Bauunternehmen und Auftraggeber im Falle des Einsatzes der modellbasierten Abrechnung darin besteht, dass der Prozess der Abrechnung auf lange Sicht ein Automatisierungspotential hat. Mit der Automatisierung der Prozesse werden die negativen Auswirkungen auf den Arbeitsprozess durch Personalmangel eliminiert sowie zusätzlich Zeit gespart, wodurch ein Ziel des Konzeptes der modellbasierten Abrechnung bereits erreicht ist. Durch die Standardisierung der automatisierten modellbasierten Abrechnung wird ein weiteres Ziel erreicht: die Qualitätssicherung. Auf diese Weise entsteht trotz des zusätzlichen Aufwandes aufgrund der Prozessumstrukturierungen in der Übergangsphase ein deutlicher Mehrwert für den Auftraggeber, den Auftragnehmer und die ÖBA im Verkehrswegebau, der aus der Eliminierung zweier aktueller Probleme der Abrechnung entsteht. Dieser Mehrwert besteht laut Expertenmeinungen in einer weniger aufwendigen Leistungsfeststellung, eindeutiger Leistungszuordnung und einer transparenten Kommunikation.

### 6.2.2 Forschungsfrage 2

*Welches Potential bietet die modellbasierte Abrechnung mit Integration von Drohnen- und digitalen Vermessungsdaten im Verkehrswegebau?*

Der Einsatz von Drohnen im Abrechnungsprozess ist eines der zentralen Themen im Rahmen des BIM-Anwendungsfalls „Abrechnung von Bauleistungen“ geworden. Anhand der umfassenden Analyse eines Pilotprojektes im Bereich Straßenbau konnte ermittelt werden, dass der Einsatz von Drohnen für großflächige umfangreiche Infrastrukturprojekte eine essentielle Methode ist, mit der die für die Abrechnung notwendigen Bestandsaufnahmen schnell und ohne Unterbrechung der aktiven Baumaßnahmen durchgeführt werden können. Dank der Unabhängigkeit dieser Methode von der Ebenheit der Geländeoberfläche kann diese Art der modellbasierten Abrechnung bei den meisten Verkehrswegebauabstellen eingesetzt werden. Diverse Integrationsmöglichkeiten mit anderen innovativen Vermessungsarten wie Mobile Mapping und GNSS-Absteckung sowie mit klassischen Vermessungsgeräten wie Totalstationen in Gebieten mit eingeschränkter Sichtbarkeit können eine Mengenermittlung für die Abrechnung in Schlussrechnungsqualität ermöglichen. Mit der Weiterentwicklung des Standardisierungsprozesses sowie einer ständigen Prozesskostenverringerung durch allgemeine Prozessoptimierung wird ein stabiles Nachfragewachstum erwartet, was das große Einsatzpotential dieser Methode unterstreicht.

### 6.2.3 Forschungsfrage 3

*Welches Potential besitzt die Integration von Maschinendaten in die modellbasierte Abrechnung von Verkehrswegebauprojekten? Welche Maschinendaten können für die modellbasierte Abrechnung herangezogen werden?*

Die im vierten Kapitel durchgeführte Analyse der zwei allgemein verbreiteten Baumaschinen Hydraulikbagger und Planierdraupe zeigte auf, dass die Maschinen unter bestimmten Voraussetzungen für die modellbasierte Abrechnung eingesetzt werden können. Zu diesen Voraussetzungen gehört unter anderen das Vorhandensein eines Maschinensteuerungssystems, das einen stabilen Datenfluss sowohl von als auch zu der Maschine sicherstellt. Aus der Analyse geht hervor,

dass mithilfe der Baumaschinen eine für die Abrechnung notwendige Bestandsaufnahme in kürzerer Zeit als mit konventionellen Methoden durchgeführt werden kann. Wenn die Baumaschinen bereits mit Maschinensteuerungssystemen zur Ausführung ihrer Hauptfunktionen ausgerüstet sind, kann angenommen werden, dass für die Hardware keine zusätzlichen Kosten entstehen. In Anbetracht der in Zukunft zu erwartenden Verbesserungen weist die Integration der Maschinendaten ein großes Einsatzpotential in der modellbasierten Abrechnung im Bereich Verkehrswegebau auf.

Für die modellbasierte Abrechnung mit der Integration von Baumaschinen werden hauptsächlich räumliche Koordinaten ausgewählter Punkte der Geländeoberfläche herangezogen. Diese Koordinaten bilden die maßgebenden Daten für die Abrechnung. Damit die Mengen der abzurechnenden LV-Positionen möglichst genau ermittelt werden können, ist die Erfassung der Elementgeometrie von besonderer Bedeutung. Die aufgenommenen Punkte der Geometrie werden in 3D-Körper transformiert, die die Basis für eine präzise Abrechnung bilden.

#### 6.2.4 Forschungsfrage 4

*Welchen Einfluss wird ein flächendeckender Einsatz der modellbasierten Abrechnung im Verkehrswegebau auf die Verteilung der Aufgaben und Tätigkeiten zwischen den im Prozess involvierten Personen haben?*

Der Einsatz der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen, Baumaschinen und weiteren innovativen Arten der Bestandsaufnahme verursachen im Vergleich zur konventionellen Abrechnung eine globale Umverteilung der Aufgaben und Tätigkeiten zwischen den im Prozess involvierten Parteien. Unter Berücksichtigung der positiven Effekte der sich stets weiterentwickelnden Standardisierungs- und Automatisierungsprozesse wird die Zuständigkeitsliste des Abrechnungstechnikers verkürzt, da der Prozess der Aufmaßblatterstellung halbautomatisch erfolgen soll. Die Zuständigkeit für die notwendigen Bestandsaufnahmen für die Erstellung der aktuellen Abrechnungsmodelle verschiebt sich von den klassischen Vermessungsingenieuren auf Piloten unbemannter Fluggeräte, Maschinisten diverser Baugeräte sowie Fahrer der Mobile Mapping-Fahrzeuge. Die Zuständigkeiten der Abrechnungstechniker erweitern sich dabei um die Kontrolle der Datenbearbeitung im Zuge der Bestandsaufnahme sowie die Erstellung von Bestandsmodellen. Auf diese Weise gehen die traditionellen Outdoor-Tätigkeiten sukzessive in Büroaktivitäten über. Die Rolle der örtlichen Bauaufsicht bleibt weiterhin die Kontrolle der Abrechnungsunterlagen, denn auch wenn die Mengen mittels Drohnen oder Baumaschinen ermittelt werden, wird die Leistungsfeststellung nach wie vor durch die Baustellenbesichtigungen kontrolliert. Nachdem der öffentliche Auftraggeber von der Planung eine BIM-Projektbearbeitung für alle Projekte fordert, wird das Modell aus der Planung über den AG dem ausführenden AN übergeben. Aus diesem Grund wird seitens des AN wesentlich weniger Zeit in die Bestandsmodellierung investiert, vor allem, was die Abrechnungstätigkeiten betrifft. Das Ziel aller Umbesetzungen bleibt der Transparenzgewinn in der Abrechnung sowie die Beschleunigung des Prozesses.



### 6.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

In diesem Unterkapitel wird ein Ausblick auf weitere Forschungsfelder gegeben, welche über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen, aber für die zukünftige Weiterentwicklung der modellbasierten Abrechnung im Verkehrswegebau eine Rolle spielen.

In dieser Arbeit wurden hauptsächlich jene Baumaschinen betrachtet, die im Erdbau eingesetzt werden. Damit alle Schichten eines Bauobjektes zum Beispiel im Bereich Straßenbaus größtenteils modellbasiert abgerechnet werden können, muss auch die Einsatzmöglichkeit weiterer Baumaschinen in der Abrechnung erforscht werden. Zu diesen Baumaschinen gehören Grader und Asphaltbaugeräte wie Asphaltverdichter, Fertiger und Fräsen, aber auch Bohrer oder Rammmaschine, die ebenso wertvolle Daten für die modellbasierte Abrechnung liefern können. Die Baumaschinen können neben den räumlichen Koordinaten auch andere wichtige Daten an das Gesamtmodell liefern, die auch in anderen Prozessen außerhalb des Abrechnungskontextes Gebrauch finden können. Solche Daten könnten beispielsweise Verdichtungswerte diverser Schichten sein, mit denen eine flächendeckende Verdichtungskontrolle im Sinne der Qualitätskontrolle parallel zur Bestandsdatenerfassung durchgeführt werden kann. Ein weiterer Forschungsbedarf besteht in der effizienten Kombination unterschiedlicher Baumaschinen mit Drohnen für präzise Bestandsaufnahmen im Rahmen der modellbasierten Abrechnung.

Forschungspotential besteht des Weiteren im Einsatz mobiler Geräte wie Smartphones und Tablets, die meistens mit hochauflösenden Kameras ausgerüstet sind. Die Kameras können dank der Technologie der Photogrammetrie für die Erstellung bzw. Ergänzung der Bestandsmodelle als Datenquelle dienen, wenn zum Beispiel von den Baumaschinen Daten nicht vollständig aufgenommen werden konnten. Dank der leistungsstarken Hardware moderner Mobilgeräten könnte den frisch aufgenommenen Punkten eine begleitende Datenbearbeitung hinzugefügt werden, was ein Thema einer neuen Forschungsarbeit in diesem Bereich sein könnte.



## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
4D	vierdimensional
5D	fünfdimensional
AG	Auftraggeber
AEC	Architecture, Engineering and Construction (engl.)
AMBL	Aufmaßblatt
AI	Artificial Intelligence (engl.)
AN	Auftragnehmer
ASFiNAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
AVA	Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung
AWF	Anwendungsfall
AZ	Abrechnungszeitraum
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BEP	BIM Execution Plan
BK	Begleitende Kontrolle
BOQ	Bill of Quantities (engl.)
CAD	Computer Aided Design
CDS	Car Driven Survey (engl.)
DACH	Deutschland, Österreich und die Schweiz
DGM	Digitales Geländemodell
DTM	Digital Terrain Model
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EK	Elementkatalog
FAB	Feldaufnahmeblatt

FM	Facility Management
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GUID	Globally Unique Identifier (engl.)
HTL	Höhere Technische Lehranstalt
IFC	Industry Foundation Classes
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LB	Leistungsbeschreibung
LE-Mengen	Leistungsmengen
LV	Leistungsverzeichnis
LV-Mengen	Leistungsverzeichnis-Mengen
LZ	Leistungszeitraum
MB	modellbasiert
ME	Mengeneinheit
MKF	Mehrkostenforderung
ÖBA	Örtliche Bauaufsicht
ÖNORM	Österreichische Norm
PP	Preisperiode
QS	Quantity Surveyor (engl.)
QTO	Quantity Take-Off (engl.)
REB	Regelungen für die Elektronische Bauabrechnung
RE-Mengen	Abrechnungsmengen
TCC	Trimble Connected Community
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UTS	Universal Total Station (engl.)
VA-Mengen	Voraussichtliche Abrechnungsmengen
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
XML	Extensible Markup Language
VE	Verrechnungseinheit

## 7.2 Literaturverzeichnis

- [1] Australian Institute of Quantity Surveyors: *What is a QS?* URL: [https://www.aiqs.com.au/imis/AIQS\\_Website/About/What\\_is\\_a\\_QS\\_/AIQS\\_Website/About/What\\_is\\_a\\_QS\\_.aspx](https://www.aiqs.com.au/imis/AIQS_Website/About/What_is_a_QS_/AIQS_Website/About/What_is_a_QS_.aspx). Abgerufen am 12.04.2020.
- [2] Austrian Standards: *Building Information Modeling (BIM)*. URL: <https://www.austrian-standards.at/de/themengebiete/bau-immobilien/building-information-modeling/alles-zu-bim>. Abgerufen am 18.03.2020
- [3] bauen-aktuell.eu: *Drohnen und künstliche Intelligenz: So wird mehr aus den Baustellendaten*. 2019. URL: <https://www.bauen-aktuell.eu/drohnen-und-kuenstliche-intelligenz-so-wird-mehr-aus-den-baustellendaten>. Abgerufen am 21.04.2020.
- [4] Baumgärtel T., Borrmann A., Euringer T., Frei M., Hirzinger G., Horenburg T., Ji Y., Juli R., Liebich T., Neuberg F., Obergrießer M., Pfitzner M., Plank C., Popp K., Posch H., Reif R., Schorr M., Steinert S., Strackenbrock B., Stockbauer W., Stumpf D., Suleiman A., Vogt N., Wimmer J.: *Integrierte Planung auf Basis von 3D-Modellen*. In: Günthner W., Borrmann A. (Hrsg.): *Digitale Baustelle- innovativer Planen, effizienter Ausführen. Kapitel 2*. Berlin, Deutschland. Springer - Verlag, 2011.
- [5] Baumgärtel T., Horenburg T., Ji Y., Obergrießer M., Plank C., Schorr M., Strackenbrock B., Wimmer J.: *Die Umsetzung der Digitalen Baustelle*. In: Günthner W., Borrmann A. (Hrsg.): *Digitale Baustelle- innovativer Planen, effizienter Ausführen. Kapitel 6*. Berlin, Deutschland. Springer - Verlag, 2011.
- [6] bimpedia.eu: *BAP - BIM Abwicklungsplan*. URL: [https://www.bimpedia.eu/-/1341-bap\\_-bim-abwicklungsplan](https://www.bimpedia.eu/-/1341-bap_-bim-abwicklungsplan). Abgerufen am 27.04.2020.
- [7] bimpedia.eu: *Dimensionen der BIM Planung*. URL: <https://www.bimpedia.eu/-/1347-dimensionen-der-bim-planung>. Abgerufen am 13.04.2020.
- [8] BIM4INFRA2020: *Glossar*. Handreichungen und Leitfäden – Glossar. Berlin, Deutschland. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019.
- [9] Borrmann, A., König M., Koch C., Beetz J. (Hrsg.): *Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Berlin, Deutschland. Springer - Verlag, 2015.
- [10] Borrmann, A., König M., Koch C., Beetz J. (Hrsg.): *Building Information Modeling – Technology Foundations and Industry Practice*. Berlin, Deutschland. Springer - Verlag, 2018.
- [11] Borrmann A., Elixmann R., Eschenbruch K., Forster C., Hausknecht K., Hecker D., Hochmuth M., Klempin, Kluge M., König M., Liebich T., Schäferhoff G., Schmidt I., Trzeciak M., Tulke J., Vilgertshofer S., Wagner B.: *Steckbriefe der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle*. Handreichungen und Leitfäden – Teil 6. Berlin, Deutschland. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019.
- [12] Brigola M., Krempel S.: *Abrechnungsleitfaden für Bauleistungen und Dienstleistungen*. Mitgeltendes Dokument zu dem ASFINAG Leitfaden LF\_038 Abrechnungsleitfaden für Bauleistungen und Dienstleistungen, Version 2.00. ASFINAG Autobahnen-und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft, 2009.

- [13] Brigola-Pulverer M., Frühwirth M.: *Der Anspruch an den Abrechnungsprozess bei Infrastrukturprojekten*. In: Hofstadler C. (eds) *Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht*. Wiesbaden, Deutschland. Springer Vieweg, 2019.
- [14] Building SMART Finland, Infrastructure business group: *Common InfraBIM Requirements YIV 2019*. URL: <https://buildingsmart.fi/en/common-infrabim-requirements>. Abgerufen am 05.05.2020.
- [15] DATAflor AG: *Prüffähige Bauabrechnung*. URL: <https://www.dataflor.de/support/anwendertipps/prueffaehige-bauabrechnung>. Abgerufen am 03.05.2020.
- [16] DB Netz AG: *Anwendungsfälle Ausführen*. URL: <https://www1.deutschebahn.com/db-netz-bim/ausfuehren-4067754>. Abgerufen am 02.05.2020.
- [17] Dragovic S.: *Leitfaden Abrechnung VWB für Praktiker*. Internes Dokument des Kooperationsbauunternehmens.
- [18] Ferger M.: *Verfahren zur IT-gestützten Ermittlung von Prozess- und Abrechnungsmengen des Erdbaus unter Einsatz von Baumaschinensteuerungssystemen*. Dissertation. Cuvillier Verlag, 2015.
- [19] Goger G., Reismann W.: *Roadmap Digitalisierung von Planen, Bauen und Betreiben in Österreich*. Wien, Österreich. TU-Verlag, 2018.
- [20] Gritzke Lasertechnik OHG: *Einmann-Vermessung ohne Festpunkte / GPS / GLONASS Rover System*. URL: <https://www.gritzke.de/gnss-roverstab>. Abgerufen am 30.04.2020
- [21] hays.de: *Jobprofil Abrechner im Bauwesen*. URL: <https://www.hays.de/jobprofile/abrechner-im-bauwesen>. Abgerufen am 12.04.2020.
- [22] Heck D.: *Skriptum zu der Vorlesung „Bauverfahrenstechnik“*. Technische Universität Graz – Institut Baubetrieb und Bauwirtschaft, 2015.
- [23] Heck D., Müller F.: *Skriptum zu der Vorlesung „Bauwirtschaftslehre Grundlagen“*. Technische Universität Graz – Institut Baubetrieb und Bauwirtschaft, 2017.
- [24] Hoffmann M., Krause T.: *Beispiele für die Baubetriebspraxis*. Kapitel 4 Bauabrechnung und Mengenermittlung. Wiesbaden, Deutschland. Teubner – Verlag, 2006.
- [25] Infrakit Group Oy: *Infrakit – Cloud for infra projects*. URL: <https://infrakit.com/de/learn-more-de/>. Abgerufen am 13.05.2020.
- [26] Interner BIM-Abwicklungsplan: *A5 Umfahrung Drasenhofen. Ausführungsphase*. 2019.
- [27] Interne Projektdokumentation: *Lupburg Sandfilteranlage*. 2020.
- [28] Internes Referenzblatt: *Referenz A5 - Baulos Drasenhofen*. Abgerufen am 17.05.2020.
- [29] Internes Dokument des Kooperationsbauunternehmens: *BIM.Abrechnung*. 2018.
- [30] Interne Projektdokumentation: *Pilotprojekt A5 Umfahrung Drasenhofen*.
- [31] Intranet des Kooperationsunternehmens: *3D Mapping Services*. Abgerufen am 23.04.2020.

## 7.2 Literaturverzeichnis

- [32] Kalyan T., Zadeh, P., Staub-French S., Froese T.: *Construction Quality Assessment Using 3D as-built Models Generated with Project Tango*. In: *Procedia Engineering* (145 1416 – 1423.). 2016.
- [33] Dr. Kerth + Lampe Geo-Infometric GmbH: *Neu im Einsatz: Rover-Stab zur satellitengestützten Vermessung*. URL: <http://www.dr-kerth-lampe.de/de/archiv/?data=281>. Abgerufen am 30.04.2020.
- [34] Kivimäki T., Heikkilä R.: *Infra BIM Based Real-Time Quality Control of Infrastructure Construction Projects*. Conference Paper. Infrakit Oy, Finland & University of Oulu, Construction Technology Research Center, Finland. 2015.
- [35] Kukko A., Jaakkola A., Lehtomäki M., Kaartinen H., Chen Y.: *Mobile mapping system and computing methods for modelling of road environment*. Conference Paper. 2009 Urban Remote Sensing Joint Event, 2009.
- [36] Landrock H., Baumgärtel A.: *Die Industriedrohne – der fliegende Roboter*. Wiesbaden, Deutschland. Springer Verlag, 2018.
- [37] Leica Geosystems: *3DReshaper Beginner's Guide*. URL: <https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/licence-activation-guides/3dreshaper-2018-beginners-guide.ashx>. Abgerufen am 19.04.2020.
- [38] Leica Geosystems: *Leica Aibot Aerial Data Capture Platform*. URL: <https://leica-geosystems.com/products/uav-systems/copter>. Abgerufen am 22.04.2020.
- [39] Leica Geosystems: *Leica iCON grade. Intelligent grading solutions*. URL: [https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/brochures/leica\\_icon\\_grade\\_bro.ashx](https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/brochures/leica_icon_grade_bro.ashx). Abgerufen am 16.05.2020.
- [40] Leica Geosystems: *Leica iCON office – Software zur Datenvorbereitung*. URL: <https://leica-geosystems.com/de-at/products/construction-tps-and-gnss/software/leica-icon-office>. Abgerufen am 16.05.2020.
- [41] Leica Geosystems: *Leica RTC360 3D Laser Scanner*. URL: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>. Abgerufen am 23.04.2020.
- [42] Leica Geosystems: *Who We Are*. URL: <https://leica-geosystems.com/about-us/summary/who-we-are>. Abgerufen am 14.05.2020.
- [43] MOBA Mobile Automation: *Xsite excavation control*. URL: <https://moba-automation.com/products/excavator-control>. Abgerufen am 15.05.2020.
- [44] ÖNORM A 2050:2006 11 01. *Vergabe von Aufträgen über Leistungen – Ausschreibung, Angebot, Zuschlag – Verfahrensnorm*. Austrian Standards Institut. Wien.
- [45] ÖNORM A 2063:2015 07 15. *Austausch von Leistungsbeschreibungs-, Elementkatalogs-, Ausschreibungs-, Angebots-, Auftrags- und Abrechnungsdaten in elektronischer Form*. Austrian Standards Institut. Wien.
- [46] ÖNORM A 6241-1:2015 07 01. *Digitale Bauwerksdokumentation Teil 1: CAD-Datenstruktur und Building Information Modeling (BIM) –Level 2*. Austrian Standards Institut. Wien.

- [47] ÖNORM A 6241-2:2015 07 01. *Digitale Bauwerksdokumentation Teil 2: Building Information Modeling (BIM) – Level 3-iBIM*. Austrian Standards Institut. Wien.
- [48] ÖNORM B 2110:2013 03 15. *Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen Werkvertragsnorm*. Austrian Standards Institut. Wien.
- [49] ÖNORM B 2118:2013 03 15. *Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen unter Anwendung des Partnerschaftsmodells, insbesondere bei Großprojekten – Werkvertragsnorm*. Austrian Standards Institut. Wien.
- [50] ÖNORM ISO 21500:2016 01 01. *Leitlinien Projektmanagement*. Austrian Standards Institut. Wien.
- [51] Öztürk B.: *Analyse und Optimierung der Verfahren zur Erfassung von Massen im Rahmen der digitalen Baustelle*. Bachelorarbeit. Hochschule Bochum, 2017.
- [52] Pfersche N.: *Prozessdarstellung der konventionellen Bauabrechnung im Baubetrieb mit BIM*. Diplomarbeit. Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Technische Universität Wien, 2019.
- [53] Plessl U.: *Flottenmanagement von Baumaschinen auf Baustellen*. Bachelorarbeit. Technische Universität Wien, 2016.
- [54] rieg.com: *RiCOPTER sensor platform infosheet*. URL: [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxriegldownloads/RiCOPTER\\_sensor-platform\\_Infosheet\\_2019-09-02.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/RiCOPTER_sensor-platform_Infosheet_2019-09-02.pdf). Abgerufen am 22.04.2020.
- [55] Rösel W., Busch A.: *AVA-Handbuch. Ausschreibung — Vergabe — Abrechnung*. 6 Auflage. Wiesbaden, Deutschland. Vieweg+Teubner Verlag, GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [56] Schneider K., Wormuth R. (Eds.): *Baulexikon: Erläuterung wichtiger Begriffe des Bauwesens mit vielen Abbildungen*. Berlin, Deutschland. Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [57] Seichter B.: *Automatisierte Mengenermittlung auf maschinengesteuerten Fahrzeugen*. Bachelorarbeit. Hochschule für Technik Stuttgart, 2014.
- [58] SITECH Austria GmbH: *Maschinensteuerungen für Bagger*. URL: <https://www.sitech-austria.at/produkte/maschinensteuerung/trimble-maschinensteuerung-fuer-bagger/>. Abgerufen am 16.05.2020.
- [59] SITECH Austria GmbH: *Maschinensteuerungen für den Bagger*. URL: [https://www.sitech-austria.at/fileadmin//sitech-content/Broschueren/Bagger/SITECH-Prosp\\_Bagger\\_neu.pdf](https://www.sitech-austria.at/fileadmin//sitech-content/Broschueren/Bagger/SITECH-Prosp_Bagger_neu.pdf). Abgerufen am 26.04.2020.
- [60] SITECH Austria GmbH: *Maschinensteuerungen für die Planierdraupe*. URL: [https://www.sitech-austria.at/fileadmin//sitech-content/Broschueren/Dozer/SITECH-Prosp\\_Raupen\\_neu.pdf](https://www.sitech-austria.at/fileadmin//sitech-content/Broschueren/Dozer/SITECH-Prosp_Raupen_neu.pdf). Abgerufen am 14.05.2020.



## 7.2 Literaturverzeichnis

- [61] SITECH Austria GmbH: *Nutzerhandbuch für GCS-Maschinensteuerungssysteme Version 12.60 für Dozer/Grader*. URL: [https://www.sitech-austria.at/fileadmin/sitech-content/Downloads/Handbuecher/SITECH\\_GCS900\\_V1260\\_Benutzerhandbuch\\_Raupe-lowRes.pdf](https://www.sitech-austria.at/fileadmin/sitech-content/Downloads/Handbuecher/SITECH_GCS900_V1260_Benutzerhandbuch_Raupe-lowRes.pdf). Abgerufen am 28.06.2020.
- [62] SITECH Austria GmbH: *Nutzerhandbuch für GCS-Maschinensteuerungssysteme. Version 12.60 für Hydraulikbagger*. URL: [https://www.sitech.de/fileadmin/sitech-content/Downloads/Handbuecher/SITECH\\_GCS900\\_V1260\\_Benutzerhandbuch\\_Bagger-lowRes.pdf](https://www.sitech.de/fileadmin/sitech-content/Downloads/Handbuecher/SITECH_GCS900_V1260_Benutzerhandbuch_Bagger-lowRes.pdf). Abgerufen am 28.06.2020.
- [63] SITECH Austria GmbH: *Positionsbestimmung mit GNSS*. URL: <https://www.sitech-austria.at/produkte/laser-und-positionierung/gnss-empfaenger-von-trimble/>. Abgerufen am 30.04.2020.
- [64] SITECH Austria GmbH: *Trimble Business Center*. URL: [https://www.sitech-austria.at/fileadmin//sitech-content/Broschueren/Trimble\\_Business\\_Center/022482-4035-DE\\_BusinessCenter\\_DS\\_A4\\_1118\\_LR.pdf](https://www.sitech-austria.at/fileadmin//sitech-content/Broschueren/Trimble_Business_Center/022482-4035-DE_BusinessCenter_DS_A4_1118_LR.pdf). Abgerufen am 15.05.2020.
- [65] SITECH Austria GmbH: *Trimble Connected Community*. URL: <https://www.sitech-austria.at/produkte/software-it/trimble-connected-community-projektmanagement-fuer-den-tiefbau/>. Abgerufen am 15.05.2020.
- [66] SITECH Austria GmbH: *VisionLink – Lösungen zur Projektüberwachung*. URL: <https://www.sitech-austria.at/produkte/software-it/trimble-visionlink2d-und-3d-projektueberwachung/>. Abgerufen am 15.05.2020.
- [67] svGeosolutions GmbH: *Drohnenvermessung*. URL: <https://www.svgeosolutions.de/leistungen-drohnenvermessung/>. Abgerufen am 23.05.2020.
- [68] Teutsch C.: *Model-based Analysis and Evaluation of Point Sets from Optical 3D Laser Scanners*. In: Magdeburger Schriften zur Visualisierung. Band 1. Shaker Verlag, ISBN 978-3-8322-6775-9, 2007.
- [69] Topcon Corporation: *Topcon at a Glance*. URL: <https://global.topcon.com/about/>. Abgerufen am 15.05.2020.
- [70] Trimble Inc.: *About Trimble*. URL: [https://www.trimble.com/Corporate/About\\_at\\_Glance.aspx](https://www.trimble.com/Corporate/About_at_Glance.aspx). Abgerufen am 14.05.2020.
- [71] Trimble Inc.: *Company History*. URL: [https://www.trimble.com/Corporate/About\\_History.aspx](https://www.trimble.com/Corporate/About_History.aspx). Abgerufen am 14.05.2020.
- [72] Trimble Inc.: *Project Monitoring*. Präsentation. URL: <https://slideplayer.com/slide/3997238/>. Abgerufen am 28.06.2020.
- [73] Trimble Inc.: *Trimble MX9 Datenblatt*. URL: [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-872141/022516-357H-DEU\\_Trimble%20MX9\\_DS\\_A4\\_0320\\_LRsec.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-872141/022516-357H-DEU_Trimble%20MX9_DS_A4_0320_LRsec.pdf). Abgerufen am 25.04.2020.

### 7.3 Verzeichnis der sonstigen Abbildungsquellen

[74] Airclip Service GmbH & Co KG: *Passpunkt*. <https://www.airclip.de/product/Passpunkt>. Abgerufen am 23.05.2020.

[75] Bundesministerium Nachhaltigkeit und Tourismus: *Grüner Bericht*. <https://gruenerbericht.at/cm4/jdownload>. Abgerufen am 23.05.2020.

[76] hirschs.de: *iTwo – Abrechnung*. URL: <http://www.hirschs.de/Handreichungen/Abrechnung.pdf>. Abgerufen am 07.04.2020.

[77] JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH. <https://www.joanneum.at/robotics/aktuelles/news/news-detail/news/das-digitale-europa-no-borders-no-limits/>. Abgerufen am 02.05.2020.

[78] researchgate.net: *8 BIM Dimensions*. URL: [https://www.researchgate.net/figure/BIM-Dimensions-source-http-bimtalkcouk-bim-glossarybim-dimensionsfn-2\\_fig4\\_317717583](https://www.researchgate.net/figure/BIM-Dimensions-source-http-bimtalkcouk-bim-glossarybim-dimensionsfn-2_fig4_317717583). Abgerufen am 14.04.2020.

[79] RMR Softwareentwicklungsgesellschaft mbH & Co. KG: *Digitales Geländemodell (GeoCAD-Classic-DGM 1-4)*. <http://www.rmr.de/seiten/GC-DGM.htm>. Abgerufen am 19.04.2020.

[80] SITECH Austria GmbH: *Earthworks*. URL: <https://www.sitech-austria.at/fileadmin/sitech-content/Produkte/Maschinensteuerung/Bagger/Earthworks/Koffiguration/Earthworks3.jpg>. Abgerufen am 01.05.2020.

[81] SITECH Austria GmbH: *Maschinensteuerung für Dozer*. <https://www.sitech-austria.at/produkte/maschinensteuerung/trimble-maschinensteuerung-fuer-dozer/>. Abgerufen am 14.05.2020.

[82] Youtube.com: *Trimble GCSFlex: Using Measure Mode*. [https://www.youtube.com/watch?v=iG\\_NvQMLGqA](https://www.youtube.com/watch?v=iG_NvQMLGqA). Abgerufen am 30.04.2020.

## 7.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Position der Abrechnung im AVA-Bereich [55].....	7
Abbildung 2-2: Schema des Abrechnungsablaufs [55].....	14
Abbildung 2-3: Ablaufschema für Bauabrechnung von ASFiNAG [12].....	15
Abbildung 2-4: Aufmaßblatt erstellt in iTWO [76].....	17
Abbildung 2-5: Mögliche Nummerierung der Aufmaßblätter [12].....	17
Abbildung 2-6: Beispiel von einem Feldaufnahmeblatt [17].....	18
Abbildung 2-7: Informationsverlust durch Brüche im Informationsfluss [10].....	19
Abbildung 2-8: BIM über den gesamten Objektlebenszyklus [9].....	20
Abbildung 2-9: Die Breite des BIM-Einsatzes nach Jernigan (2008) [9].....	23
Abbildung 2-10: BIM-Dimensionen [78].....	24
Abbildung 2-11: Aufgabenverteilung zwischen BIM-Manager und BIM-Koordinatoren [9].....	24
Abbildung 2-12: Schichtenaufbau, Damm [75].....	25
Abbildung 2-13: Schichtenaufbau, Einschnitt [75].....	25
Abbildung 2-14: Photogrammetrische Auswertung eines Bauwerkes über das PHIDAS-System [9] ...	28
Abbildung 2-15: Beispiel eines digitalen Geländemodells (DGM) [79].....	30
Abbildung 2-16: Prozessablauf bei der Erzeugung des digitalen Geländemodells.....	30
Abbildung 2-17: Ausdünnung der Punkte mit dem auf Raumraster bezogenen Verfahren [5].....	31
Abbildung 2-18: 3D-Punktwolken eines Beispielprojektes [36].....	32
Abbildung 2-19: Digitales Geländemodell (Netz von Polygonen) eines Beispielprojektes [36].....	32
Abbildung 2-20: Überlagerung der modellierten Trasse mit dem Ist-DGM, Zeitpunkt 1 (mod. nach Baumgärtel T. et al. [5]).....	32
Abbildung 2-21: Überlagerung der modellierten Trasse mit dem Ist-DGM, Zeitpunkt 2 (mod. nach Baumgärtel T. et al. [5]).....	33
Abbildung 2-22: Beispielhafter Workflow bei der Erzeugung von 3D-Vermaschungsmodellen [4].....	33
Abbildung 2-23: Systematisierung elektronischer Datensysteme für Baumaschinen laut M. Ferger [18].....	34
Abbildung 2-24: Beispiel eines Maschinensteuerungssystems von Trimble [80].....	36
Abbildung 2-25: Laserscanner Leica RTC360 im Einsatz [41].....	37
Abbildung 2-26: Roverstab von Trimble, "SPS585 Smart-Antenne" [63].....	38
Abbildung 2-27: Beispiel einer in der Bauvermessung eingesetzten Drohne (UAV flying plattform): Leica AX20 [38].....	39
Abbildung 2-28: Ein mit Trimble-Maschinensteuerungssystem GCSFlex ausgerüsteter Hydraulikbagger während der Bestandsaufnahme [82].....	40
Abbildung 2-29: Beispiel eines Mobile Mapping Systems „Pegasus: Two Ultimate Dualhead“ von Leica Geosystems, verwendet von Joanneum Research [77].....	40
Abbildung 2-30: Allgemeiner Verlauf bei der "semi-modellbasierten Abrechnung" über die Querschnittsflächen und Einflusslängen.....	42
Abbildung 2-31: Allgemeiner Verlauf bei der grundlegenden Methode der modellbasierten Abrechnung.....	43
Abbildung 2-32: Mengenermittlung für den ersten Leistungszeitraum bei der Anschüttung [29].....	43
Abbildung 2-33: Mengenermittlung für den zweiten und weitere Leistungszeiträume bei der Anschüttung [29].....	44
Abbildung 2-34: Allgemeiner Verlauf bei der modellbasierten Abrechnung über die Leistungswerte.....	44
Abbildung 3-1: Ablauf der modellbasierten Abrechnung mit Drohnen.....	46
Abbildung 3-2: Satellitenbild des Projektgebietes von Google Earth [30].....	47
Abbildung 3-3: Ablauf der Bestandserfassung [30].....	49
Abbildung 3-4: Passpunkt auf der zu vermessenden Geländeoberfläche [74].....	50

Abbildung 3-5: Beispiel der ausgewerteten Daten in Pix4D [30] .....	50
Abbildung 3-6: Mögliche Wege bei der Erstellung des Abrechnungsmodells .....	52
Abbildung 3-7: Varianten der Mengenermittlung.....	53
Abbildung 3-8: Erstellung des Einschnitts im Abrechnungszeitraum August, 3D-Ansicht [30].....	54
Abbildung 3-9: Erstellung des Einschnitts im Abrechnungszeitraum August, Querschnittsansicht [30] .....	55
Abbildung 3-10: Vorbereitenden Maßnahmen aus der Angebotsphase in iTWO .....	55
Abbildung 3-11: Modell und ausgewähltes Element mit den Kurzbezeichnungen (iTWO) .....	56
Abbildung 3-12: Vorgangsmodell, verknüpfter Termin und LV-Position (iTWO).....	57
Abbildung 3-13: Modul LE-/RE-Mengen (iTWO) .....	59
Abbildung 3-14: Modul "Aufmaß": hier werden alle zugewiesenen Mengen mit den LV-Positionen an- gezeigt (iTWO) .....	60
Abbildung 3-15: elektronisches Aufmaßblatt, wessen Werte auf den RE-Mengen basieren (iTWO) ..	61
Abbildung 3-16: Prozessdiagramm zur modellbasierten Abrechnung mit Drohnen .....	62
Abbildung 4-1: Querschnittsbruchpunkte der Struktur, die mit den Baumaschinen aufgenommen wer- den müssen. [14].....	66
Abbildung 4-2: Systemaufbau GCS900 für den Bagger [59].....	72
Abbildung 4-3: Querneigungssensor AS 400.....	75
Abbildung 4-4: Planierraupe ausgerüstet mit Trimble GCS900 Dual von Trimble [60] GNSS [81].....	75
Abbildung 4-5: Geländeaufnahme mittels des Rasters. Die grünen Flächen werden vom System auf- genommen [72] .....	76
Abbildung 4-6: Manuelle Geländeaufnahme (Kartierung) über Trimble GCS900 mit der Planierraupe [61] .....	78
Abbildung 4-7: Vermaschung der nicht deckungsgleichen Oberflächenaufnahmen von verschiedenen Tagen .....	79
Abbildung 4-8: Möglicher Fehler bei der Geländeaufnahme im Bereich der Böschungen.....	82
Abbildung 4-9: Parameter, welche für die Lagebestimmung der Schaufel benötigt werden [51] .....	84
Abbildung 4-10: Hydraulikbagger ausgerüstet mit Trimble GCS900 Dual GNSS [59] .....	85
Abbildung 4-11: Grundriss der geplanten Sandfilteranlage [27] .....	86
Abbildung 4-12: Interaktion der Systemelementen [72] .....	88
Abbildung 4-13: Geländeaufnahme (Kartierung) über Trimble GCS900 mit dem Hydraulikbagger [62] .....	88
Abbildung 4-14: Datenfluss im System [72] .....	89
Abbildung 4-15: Digitales Geländemodell: unterster Durchgang des Baggers [27].....	90
Abbildung 4-16: Ausgegebene Querschnittsansicht im 2. Becken (Profil 0+070) [27] .....	91
Abbildung 4-17: Ausgabe der ermittelten Ab- und Auftragsmengen über VisionLink [27] .....	91
Abbildung 4-18: Prozessdiagramm zur modellbasierten Abrechnung mit den Baumaschinendaten ..	93
Abbildung 4-19: Funktionsweise des finnischen Informationsmanagementsystems Infrakit [25].....	95
Abbildung 5-1: Projekt Tango Gerät [32] .....	103
Abbildung 5-2: Mit Tango generiertes Bestandmodell in äußeren Bedingungen (links), Modell aus der Planung (rechts) [32] .....	103

## 7.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Arten der Mengen in iTWO 2017 und ihre Speicherorte .....	59
Tabelle 3-2: Entdeckte Vorteile und Nachteile der Modellbasierten Abrechnung mit Drohen.....	64
Tabelle 4-1: Entdeckte Vorteile und Nachteile der Modellbasierten Abrechnung mit der Planierdrape .....	95
Tabelle 4-2: Entdeckte Vorteile und Nachteile der Modellbasierten Abrechnung mit dem Hydraulikbagger.....	96



## 8.1 Fragebogen Experteninterview

# 8 Anhang

## 8.1 Fragebogen Experteninterview

## Fragebogen Experteninterview

### Modellbasierte Abrechnung im Verkehrswegebau mit Integration von Maschinendaten



Erstellt von: Artem Igumnov, BSc.

Zweck: Im Zuge der Diplomarbeit am Forschungsbereich für Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik der Technischen Universität Wien unter der Leitung von Herrn Univ.-Prof. Gerald Goger und der Betreuung durch Herrn Andreas Jurecka Univ.-Lekt. und Frau Univ.-Ass. Bettina Chylik wird das Potenzial des flächendeckenden Einsatzes der Modellbasierten Abrechnung mit Drohnen und Baumaschinendaten im Bereich Verkehrswegebau untersucht.

#### Kurze Einleitung und Vorstellung:

Die Abrechnung ist ein zeitaufwendiger Prozess, welcher im Bereich des Verkehrswegebaus einen großen Anteil der Personalkosten verursacht und somit ein großes Optimierungspotenzial hat. Der Einfluss der flächendeckenden Digitalisierung in der Baubranche führt zu einem neuen Ansatz in der Durchführung der Abrechnung, der als modellbasierte Abrechnung bezeichnet wird. Im Zuge einer Diplomarbeit wird untersucht, wie neue Datenquellen in den modellbasierten Abrechnungsprozess im Verkehrswegebau integriert werden können. Außerdem wird innerhalb dieser Arbeit versucht den Einfluss der Veränderungen im Abrechnungsablauf auf die Auslastung der Parteien in der Zukunft abzuschätzen und die daraus folgenden Vorteile und Nachteile abzuleiten.

Ihre Antworten werden vertraulich behandelt und nicht an Dritte weitergegeben.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit.

Name:

Unternehmen:

- Ihre Rolle im Abrechnungsprozess:
- Auftraggeber (AG)
  - Auftragnehmer (AN)
  - Örtliche Bauaufsicht (ÖBA)



## 8.1 Fragebogen Experteninterview

Was ist aus Ihrer Sicht bei der Durchführung der Abrechnung besonders wichtig?  
(z.B. Personalqualifikation, Genauigkeit der Ergebnisse, Angemessenheit des Aufwands, etc.)

Wie würden Sie aus Ihrer Erfahrung die Beziehungen zwischen den Parteien der **konventionellen** Abrechnung (AG/AN/ÖBA) charakterisieren?

- Mit hoher Verständigungsbereitschaft
- Mit angemessener Verständigungsbereitschaft
- Neutral
- Teilweise kontrovers
- Kontrovers
  
- Anders:

Wie würden Sie aus Ihrer Erfahrung die Beziehungen zwischen den Parteien der **modellbasierten** Abrechnung (AG/AN/ÖBA) charakterisieren?

- Mit hoher Verständigungsbereitschaft
- Mit angemessener Verständigungsbereitschaft
- Neutral
- Teilweise kontrovers
- Kontrovers
  
- Anders:

Gibt es nach Ihrer Erfahrung länderspezifische Besonderheiten beim Abrechnungsprozess, die Sie betonen würden?

- Ja
- Nein

Wenn ja, welche?

Wie würden Sie die Prozesskosten- und Zeitaufwandunterschiede zwischen der **modellbasierten** und **konventionellen** Abrechnung bewerten?

Was ist aus Ihrer Sicht der Mehrwert der **modellbasierten** Abrechnung für Ihre Rolle im Abrechnungsprozess (AG/AN/ÖBA) im Vergleich zur konventionellen Abrechnung?

Gibt es aus Ihrer Sicht Verbesserungsmöglichkeiten für die bestehenden Konzepte der **modellbasierten** Abrechnung?

- Ja
- Nein

Wenn ja, welche?

## 8.1 Fragebogen Experteninterview

Gibt es aus Ihrer Sicht wichtige Besonderheiten (bzw. Vorteile und Nachteile) der **modellbasierten** Abrechnung mit dem Einsatz von **Drohnen** bzw. **Baugeräten** (Hydraulikbagger/Planierdraupe), die Sie betonen würden?

Wenn relevant, wie zufrieden sind Sie nach Ihrer Erfahrung mit der Genauigkeit der Ergebnisse der **modellbasierten** Abrechnung mit dem Einsatz von **Drohnen**?

- Voll zufrieden
- Eher zufrieden
- Neutral
- Eher nicht zufrieden
- Nicht zufrieden
  
- Anders:

Wenn relevant, wie zufrieden sind Sie nach Ihrer Erfahrung mit der Genauigkeit der Ergebnisse der **modellbasierten** Abrechnung mit dem Einsatz von **Baugeräten**?

Hydraulikbagger:

- Voll zufrieden
- Eher zufrieden
- Neutral
- Eher nicht zufrieden
- Nicht zufrieden
  
- Anders:

Planierdraupe:

- Voll zufrieden
- Eher zufrieden
- Neutral
- Eher nicht zufrieden
- Nicht zufrieden
  
- Anders: