



Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

Abbildung der zeitgebundenen Kosten im bergmännischen Tunnelvortrieb mit der BIM-Methodik

David Hacker

Masterthesis

für den Master of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autor: David Hacker

Matrikelnummer:

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

Sebastian Esser, M.Sc.

Ausgabedatum: 01. Januar 2019

Abgabedatum: 01. Juli 2019

Abstract

Due to their complexity, tunnel construction and similar civil engineering measures pose great challenges to the engineers involved in terms of planning, calculation and contractual accounting. Since the uncertain geology must be integrated as a building material and has a decisive influence on the processes, especially in tunnel driving, precise data, knowledge and boundary conditions are often lacking for the predefined construction planning and execution. This makes accurate planning and a calculable tendering process more difficult. The different level of information of all parties involved during the construction project and the lack of transparency in planning and calculation often lead to differences and conflicts between the main parties involved.

In recent years, the virtual mapping of construction projects using the Building Information Modeling (BIM) method has progressed more and more. In tunnel construction, BIM enables a networked working approach with the necessary transparency and control for complex construction projects. An integrated data system centrally provides an uniform information basis for subsequent evaluations and analyses. The geometry-bound databases must take full account of the degrees of freedom in the construction contract in order to be able to flexibly modify forecast values with later findings.

In the present work a target model for the mining tunnel driving with a typical database structure is generated. By a precise quantity evaluation in combination with the construction contract a prognosis for the resulting costs and construction times can be carried out.

During the execution phase, a further model with the actually realised construction measures is created during the driving process. The quantity-based calculation of time and costs at each project point forms the basis for the model-based monthly accounting of the construction company. In addition, a constant comparison to the predicted volume can be carried out and excess or short quantities as well as varying construction times can be evaluated and analysed model-based.

This system is successfully tested and put into practice in the course of a pilot project on a 600 m long road tunnel.

Zusammenfassung

Der Tunnelbau und ähnliche Tiefbaumaßnahmen stellen bei der Planung, Kalkulation und bauvertraglichen Abrechnung angesichts ihrer Komplexität die damit befassten Ingenieure vor große Herausforderungen.

Da die eingeschränkt bekannte Geologie als Baustoff integriert werden muss und sie die Prozesse gerade im Tunnelvortrieb ausschlaggebend beeinflusst, fehlen häufig präzise Daten, Kenntnisse und Randbedingungen für die fest definierte Bauwerksplanung und -ausführung. Dieser Sachverhalt erschwert eine zutreffende Planung, Mengenermittlung und damit eine Ausschreibung, auf der eine sichere und abschließende Kostenermittlung möglich ist. Der unterschiedliche Informationsstand aller Beteiligten während dem Bauprojekt und die fehlende Transparenz der Planung und Kalkulation führen dabei oft zu Differenzen und Konflikten zwischen den Hauptbeteiligten.

In den letzten Jahren ist die virtuelle Abbildung von Bauprojekten mit der Methode des Building Information Modelings (BIM) immer weiter vorangeschritten. BIM ermöglicht im Tunnelbau eine vernetzte Arbeitsweise mit der notwendigen Transparenz und Kontrolle bei komplexen Bauprojekten. Durch ein durchgängiges Datensystem wird eine einheitliche Informationsbasis für anschließende Auswertungen und Analysen zentral bereitgestellt. Dabei müssen die geometrieebundenen Datenbanken die Freiheitsgrade im Bauvertrag voll umfassend berücksichtigen, um prognostizierte Werte mit später gewonnenen Erkenntnissen flexibel modifizieren zu können.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Soll-Modell für den bergmännischen Tunnelvortrieb mit einer typischen Datenbankstruktur erzeugt. Durch eine präzise Mengenauswertung in Kombination mit dem Bauvertrag lässt sich eine Prognose für die anfallenden Kosten und bauzeitbezogenen Bauzeiten durchführen.

Während der Ausführungsphase wird ein weiteres Modell mit den tatsächlich realisierten Baumaßnahmen vortriebsbegleitend aufgeföhren. Die mengenbasierte Berechnung von Zeit und Kosten zu jedem Projektzeitpunkt bildet eine Grundlage für die modellbasierte Monatsabrechnung des Ausführungsunternehmens. Außerdem lässt sich ein ständiger Vergleich zum prognostizierten Zustand durchführen und es können Mehr- oder Mindermengen sowie variierende Bauzeiten modellgestützt ausgewertet und analysiert werden.

Dieses System wird bereits im Zuge eines Pilotprojekts an einem 600 m langen Straßentunnel erfolgreich getestet und damit richtungsweisend in die Praxis umgesetzt.

Inhaltsverzeichnis

1	Digitalisierung und BIM im Kontext des Tunnelvortriebs	1
1.1	Potential in den Planungsphasen des Tunnelvortriebs	1
1.2	Anforderungen im BIM-Modell	2
1.3	Auswertung der BIM-Modelle	3
2	Prognosemodell für Planung und Ausschreibung	6
2.1	Prognose der Vortriebsklassenverteilung als Kalkulationsgrundlage	6
2.2	Aufbau des BIM-Modells	11
2.2.1	Anforderungen an die Revit Familie	12
2.2.2	Geometrischer Erstellungsprozess	18
2.2.3	Festlegung der Parametertabelle	20
2.2.4	Erstellungsvorschriften im Dynamo-Script	26
2.2.5	Anpassungsmöglichkeiten im BIM Modell	29
3	Erzeugung eines Ausführungsmodells	34
3.1	Modifizierung der Datenbankgrundlage	36
3.2	Datenerfassung parallel zum Tunnelvortrieb	38
3.3	Automatische Modellgenerierung auf Grundlage des Abschlagprotokolls	44
4	Auswertung der BIM-Modelle mittels RIB iTWO	49
4.1	Datenaustausch zwischen Revit und iTWO 5D	50
4.2	Mengenermittlung mit Bezug zum Leistungsverzeichnis	53
4.3	Transparente Mengenabbildung im modellorientierten Leistungsverzeichnis	61
4.4	Ermittlung der zu vergütenden Bauzeit	63
4.5	Fazit bei der Umsetzung in iTWO	67
5	Auswertung und Gegenüberstellung verschiedener Systeme in Planung und Ausführung	69
5.1	Systemdefinitionen in den einzelnen Projektphasen	69
5.2	Vergleich der BIM-Systeme von Planung und Ausführung	71
5.3	Fazit bei der Analyse von Bauzeit und -kosten	76

6 Fazit und Ausblick

78

A Digitaler Anhang

80

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
4D	Abbildung der Bauzeit
5D	Abbildung der Kosten
AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
API	Schnittstelle zur Programmierung von Anwendungen (Applikation Programming Interface)
AVA	Auftrag, Vergabe und Abrechnung
BEP	BIM -Ausführungsplan (BIM Execution Plan)
BIM	Building Information Modeling
CAD	rechnergestütztes Konstruieren (Computer Aided Design)
cpXML	proprietäres XML-Format ((C)onstruction (P)rocess (I)ntegration)
DACH	Deutschland, Österreich, Schweiz
ID	Identifikationsnummer
IFC	Industry Foundation Classes
iTWO 5D	modellorientiertes Kosten- und Projektsteuerungssystem von RIB
KF	Kalottenfuß
KSG	Kalottensohlgewölbe
LOD	Level of Development
LOG	Level of Geometry
LOI	Level of Information
LV	Leistungsverzeichnis
PDF	Portable Document Format ((trans)portales Dokumentenformat)
RIB	Recheninstitut im Bauwesen (Software Unternehmen)
UTF-8	8-Bit UCS (Universal Coded Character Set) Transformation Format
VKL	Vortriebsklasse
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
XML	Extensible Markup Language
XML-Tree	Baumstruktur des Datenformats XML
ZGK	Zeitgebundene Kosten

Kapitel 1

Digitalisierung und BIM im Kontext des Tunnelvortriebs

1.1 Potential in den Planungsphasen des Tunnelvortriebs

Der Deutsche Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB) erstellt derzeit eine Reihe an Diskussionspapieren zur Erarbeitung konfliktarmer Bauverträge im Tunnelbau (Naumann & Brem, 2004).

Das Aufgabenfeld der Objektplanung und der Projektabwicklung erfordert äußerst flexible Strukturen und Werkzeuge. Gerade im Tunnelvortrieb liegt der Grund dafür in der Ungewissheit der Geologie. Durch die punktuellen Aufschlussbohrungen wird ein geologisches Gutachten nach bestem Wissen für den Bereich des Tunnelquerschnitts erstellt.

In der Planung wird versucht auf dieser Grundlage verschiedene Ausbruchs- und Sicherungssysteme vollumfänglich zu definieren, die unter den bekannten Bedingungen auch ausführbar sind. „Dabei sind die Anforderungen an die Nutzung, die Qualität, den Betrieb, die Unterhaltung und Nachhaltigkeit sowie die Einhaltung Anerkannter Regeln der Technik und die Beachtung der Wirtschaftlichkeit Grundlage der Planung (VOB/A).“ (Breidenstein *et al.*, 2016, S. 6)

Alle möglichen Sachverhalte, die bei der Projektrealisierung auftreten können, in der Planung voll umfassend und detailliert auszuarbeiten, ist aus unterschiedlichsten Gründen nicht immer möglich. Während der Ausführungsphase wächst der Informationsgrad, gerade was das physikalische Verhalten und die Schichtung des Baugrunds betrifft, deutlich an. Aus diesem Grund kann der Fall eintreten, dass Inhalte der Planung in der Phase der Ausführung nochmals angepasst oder modifiziert werden, um die grundlegenden Anforderungen der Planung zu erfüllen. „Obwohl die Planung also eine solch fundamentale Bedeutung für ein Projekt hat, nimmt sie in der heute vorherrschenden Form der Projektbearbeitung [...] einen eher geringen Anteil an der Gesamtbearbeitung ein.“ (Breidenstein *et al.*, 2016, S. 4) Erweist sich eine

Ausführungsplanung und damit eine bauvertragliche Struktur in einem Projekt nicht mehr als zutreffend oder zu unflexibel, sind Konflikte vorprogrammiert und eine wirtschaftliche, optimierte Projektdurchführung nicht mehr möglich (Breidenstein *et al.*, 2016).

Für die Vermeidung solcher Auseinandersetzungen ist es einerseits möglich, den Projektbeteiligten Empfehlungen und Hilfen für die konfliktvermeidende Durchführung eines Projekts auf Basis heutiger Strukturen bereitzustellen (Jodl, 2012).

Andererseits erfordern komplexe Herausforderungen und Veränderungen während der Projektphasen ein hohes Maß an Informationen und deren Abstimmung und Kommunikation. Diese Leistung kann nur in einer digitalen, vernetzten Projektstruktur erbracht werden. In Verknüpfung mit digitalen Prozessen trägt die Methode des Building Information Modeling (BIM) einen erheblichen Anteil zur Qualitätssteigerung von Projektplanung und -durchführung bei.

Dieser Mehrwert wurde vom Bundesministerium für Verkehr und digitaler Infrastruktur (BMVI) erkannt und ein Stufenplan für die Einführung der Methode für alle zuständigen Bereiche bis 2020 in die Praxis erarbeitet (BMVI(Hrsg.), 2015). Damit ist BIM auch in Zukunft für Tunnelprojekte der öffentlichen Hand verpflichtend vorgeschrieben (König *et al.*, 2017).

Die Verwendung der BIM-Methode ist für Tunnelprojekte generell noch nicht sehr weit verbreitet. Vielmehr wird in speziell ausgewählten Projekten des Tunnelbaus die Realisierbarkeit der Methode in den einzelnen Phasen der Planung und Ausführung überprüft. (Gruber *et al.*, 2018)

1.2 Anforderungen im BIM-Modell

Im Zuge dieser Arbeit wird ein System für den bergmännischen Tunnelvortrieb mit der BIM-Methode entwickelt. Das BIM-Modell des Tunnels unterscheidet sich dabei grundlegend von den Bauteilanforderungen virtueller Modelle im Hochbau (Zhou *et al.*, 2017).

Ein Modellelement im Tunnelbau erzeugt erstmals deutlich mehr Modellierungsaufwand als im Hochbau (Bernat *et al.*, 2018, S.36). Statt einer horizontalen und vertikalen Ausrichtung muss eine achsbasierte Orientierung des Elements erzeugt werden. Gerade im bergmännischen Bereich sind zusätzlich die geometrischen Formen und Abhängigkeiten durchaus komplex und erfordern umfangreiche Kenntnisse in der Modellierungssoftware. Bei einer flexiblen Gestaltung kann das Bauteil allerdings für einen großen Teil des Projekts verwendet werden. Innerhalb eines Tunnelquerschnitts reicht beispielsweise ein adaptives Modellelement aus, um die Tunnelröhre virtuell abzubilden. Außerdem kann für jeden Bauteiltyp im Tunnelverlauf eine einheitliche Datenbank vordefiniert werden. Im Hochbau hat hingegen jedes einzelne Bauteil spezifische Informationsanforderungen, die in einer Datenbank vorliegen müssen. Ein weiterer grundlegender Unterschied ist die Platzierung der einzelnen Bauteile. Im Hochbau sind gemäß dem architektonischen Konzept eine Vielzahl an Möglichkeiten für die Gestaltung

des Bauwerks denkbar. Im Tunnelvortrieb werden die Anforderungen und Ausbauvarianten nach bestem Wissen im Vorfeld der Modellierung gesetzt und bestimmen damit die genaue Platzierung und geometrische Ausprägung der Bauteilelemente.

Die Flexibilität der Bausteine wird durch die parametrische Modellierung der Elemente gewährleistet. Die Freiheitsgrade hängen dabei in erster Linie von den Anforderungen in der Projektumgebung ab. Die geometrische Adaptivität wurde anhand grundlegender Regeln für typische Formen aus dem Infrastrukturbereich bereits getestet (Flurl *et al.*, 2015; Vilgertshofer & Borrmann, 2016). Die prinzipielle Formulierung im Tunnelbau lehnt sich an den Methoden der anderen Bereiche an. Vollumfänglich parametrisierte Modelle des bergmännischen Vortriebs sind allerdings noch nicht bekannt.

Letztendlich lässt sich eine Modellierung der Ausbruchs- und Sicherungsmittel im Tunnel folgendermaßen zusammenfassen:

Die Gesamtheit der Anforderungen im Tunnelvortrieb ist zwar sehr speziell und bedarf einer intensiven Auseinandersetzung mit der Projektumgebung. Ist das System selbst jedoch für ein Bauprojekt einmal definiert, lässt sich jeder beliebige Zustand durch eine einfache Eingabe der vordefinierten Freiheitsgrade abbilden. Viele Elemente können anschließend sogar projektübergreifend wiederverwendet werden. Die Systemumgebung fungiert dabei wie ein Bauteilkastensystem, aus dessen Inhalt sich die letztendliche Projektdurchführung „frei“ zusammensetzt. Der erstmalig erhöhte Aufwand bei der Systemerstellung zahlt sich also in jedem Fall bei der Variantenuntersuchung, Erstellung von Prognosemodellen oder der allgemeinen Flexibilität des Systems aus.

Dieses Prinzip wurde bereits für BIM-Modelle des maschinellen Schildvortrieb erkannt und umgesetzt. Dabei wurden die Bauteile der Außenschale (Tübbingringe) wie beschrieben in einer parametrischen Modellumgebung automatisiert entlang der Tunnelachse ausgerichtet. (Linder, 2017; König *et al.*, 2017)

Für die bergmännische Bauweise der Außenschale sind funktionsfähige Systeme für die automatisierte Modellgenerierung auf Grundlage von Planungsdaten noch nicht bekannt.

1.3 Auswertung der BIM-Modelle

Der zentrale Fokus im zweiten Teil der Arbeit ist die Ermittlung der Mengen im Leistungsverzeichnis. Die Möglichkeit der Auswertung und Analyse von 3D-Datenmodellen bildet einen essentiellen Kernprozess bei Anwendungen der BIM-Methode. Die methodischen Ansätze für die Mengenermittlung wurden bereits für den Spezialtiefbau und den Tunnelbau im allgemeinen formuliert. Das Vorgehen ist dabei in hohem Maße abhängig von der Struktur des BIM-Modells. (Bernat *et al.*, 2018, S.45)

In der Praxis wurde im Zuge von Pilotprojekten bereits die Teilmengen anhand von Modellelementen des Tunnelbaus ermittelt (z.B. Tunnel Rastatt). Allerdings wurden stets Schwierig-

keiten bei der flächendeckenden Modellvernetzung mit den Teilleistungen erkannt. (Ehrbar, 2016, S.14f.)

Das bergmännische Vortriebsmodell stellt bezüglich der Mengenauswertung eine besondere Herausforderung dar. Der Grund hierfür liegt in den spezifischeren Geometrien und Informationen, verbunden mit flexiblen Anforderungen in der BIM-Umgebung. Da die Datenbankstruktur jedes Modellelements aber identisch ist (vgl. Kapitel 1.2), kann projektspezifisch eine standardisierte Mengenabfrage aus den Bauteilinformationen definiert werden. Solange dabei ein beliebiges BIM-Modell den Anforderungen und Freiheitsgraden der Projektumgebung entspricht, kann es der standardisierten Mengenermittlung unterzogen werden. Bei variierenden Ausbruchs- und Sicherungsmitteln lassen sich auch auf diese Weise die resultierenden Kosten und Bauzeiten gemäß den bauvertraglichen Richtlinien ermitteln.

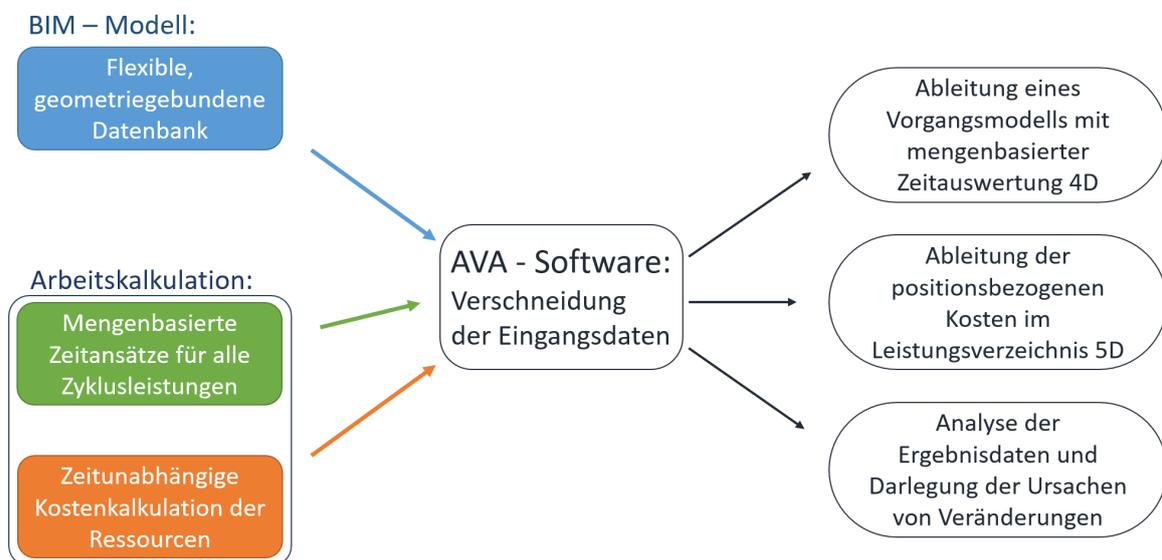


Abbildung 1.1: Ermittlung der Zeit und Kosten anhand von projektspezifischen Eingangsdaten

Die Abbildung 1.1 fasst das System für die Modellauswertung zusammen und dient als Leitgrafik für die Einordnung der einzelnen Themenbereiche im Verlauf der Arbeit.

Das **BIM-Modell** wird im Zuge der Planungsphasen erstellt und beinhaltet alle notwendigen Informationen für die leistungsorientierte Mengenauswertung.

Die Modelldaten werden mit den Werten der **Arbeitskalkulation** kombiniert. Mengenbasierte Zykluszeiten beschreiben dabei die Dauer aller bauzeitrelevanten Vorgänge. Die zeitunabhängigen Ressourcen werden in Form der Einheitspreise kalkuliert. Diese Bieterangaben sind im Vorfeld der Ausschreibung variabel für die Abschätzung des Projektumfangs, allerdings nach Vergabe in Form von festgelegten Werten im Bauvertrag verankert (Brandt & Franssen, 2013, S.80).

Die Eingangsdaten werden in einer Softwareumgebung für die Leistungsphasen Auftrag, Vergabe und Abrechnung (**AVA**) miteinander verschnitten. Auf diese Weise erhält man eine

zeitliche Auswertung (4D) sowie die positionsbezogenen Kosten (5D) im Leistungsverzeichnis. Über die Analyse der Ergebnisdaten können anschließend weitere Aussagen über die Ursachen von Veränderungen oder den zu erwartenden Projektverlauf getroffen werden.

Das BIM-System soll neben der Kosten- und Bauzeitprognose auch für die Abrechnung während des tatsächlichen Tunnelvortriebs verwendet werden.

Alle vorgestellten Methoden werden parallel zu dieser Arbeit an einem Pilotprojekt bereits erfolgreich getestet und schaffen gerade für den Prozess der Abrechnung und die Variantenuntersuchung möglicher Bauzustände enorme Vorteile (vgl. Kapitel ??).

Im letzten Kapitel wird nochmals darauf eingegangen, inwiefern das ausgearbeitete BIM-System das anfänglich erwähnte Konfliktpotenzial in Tunnelplanung und -ausführung eindämmen und ein Werkzeug der Kommunikation und des Datenmanagements sein kann. Allerdings werden auch schon im Verlauf der Arbeit die Vorteile gegenüber den herkömmlichen Prozessen deutlich.

Kapitel 2

Prognosemodell für Planung und Ausschreibung

Im vorliegenden Kapitel werden die einzelnen Schritte für die Generierung eines Prognosemodells für die Tunnelaußenschale erläutert.

Für die Definition der Querschnitte werden regelbasierte Abhängigkeiten formuliert, um geometrische Veränderungen im Tunnelverlauf parametergesteuert abbilden zu können. Für die Tunnelinnenschale wurden bereits mathematische Beziehungen zwischen Geometrieparametern im Querschnitt getestet und auf die Anwendbarkeit in Praxisprojekten überprüft (Flurl *et al.*, 2015). Allerdings erfordern die Zusammenhänge in den Formen der Außenschale deutlich komplexere Formulierungen der Bauteilbeziehungen. Die Modellgenerierung baut allerdings auf den Grundprinzipien der parametrisierten Geometriebausteine aus anderen Fachdisziplinen (Georgoula, 2019; Ji, 2014) auf.

Die entstehenden adaptiven Bauteilgruppen werden anschließend entlang der Tunnelachse(n) ausgerichtet. Für den repetitiven Platzierungsaufwand kommen visuelle Programmierungstools zum Einsatz, deren Nutzung in der Baubranche durch die flexiblen Anwendungsweisen deutlich ansteigt (Ritter *et al.*, 2015).

Auf diese Weise kann letztendlich eine geometrie-basierte Datenbank mit allen relevanten Informationen für die Mengenermittlung im gesamten Tunnelbereich erstellt werden.

2.1 Prognose der Vortriebsklassenverteilung als Kalkulationsgrundlage

Im Zuge der Grundlagenermittlung werden für jedes Tunnelprojekt geologische Erkundungsbohrungen durchgeführt, die essentiell für die Prognose und Planung der Ausbruchs- und Sicherungsmittel sind (Girmscheid, 2000, S.46). Auf Basis des geotechnischen Gutachtens

wird die Geologie entlang der Tunnelachse(n) in Homogenbereiche unterteilt, die nach dem physikalischen Verhalten der jeweiligen Bodenschichten charakterisiert sind. Die entsprechenden Ausbruchs- und Sicherungsmittel in einem homogenen Abschnitt werden unter Berücksichtigung des Gebirgsverhaltens, des Bauverfahrens, der Art des Ausbruchs sowie Art, Umfang und Zeitpunkt des Einbaus der Sicherungsmittel bestimmt (Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 2018, S. 16f).

Für jedes Projekt werden auf Grundlage dieser prognostizierten Einflussparameter fest definierte Ausbauvarianten, sogenannte Vortriebsklassen (VKL's), festgelegt (Maidl, 2004b, S.79-83). Die allgemeine Einstufung der Vortriebsklassen erfolgt nach DIN 18312, wobei darüber hinaus projektbezogene Untergliederungen mit einer präziseren Ausbaufestlegung erforderlich werden (Deutscher Vergabe- und Vertragsausschuss für Bauleistungen, 2016). In der Regel kennzeichnet eine höhere Ziffer der VKL-Bezeichnung auch einen erhöht abgesicherten Ausbau der Außenschale (Maidl, 2004b, S.79f.).

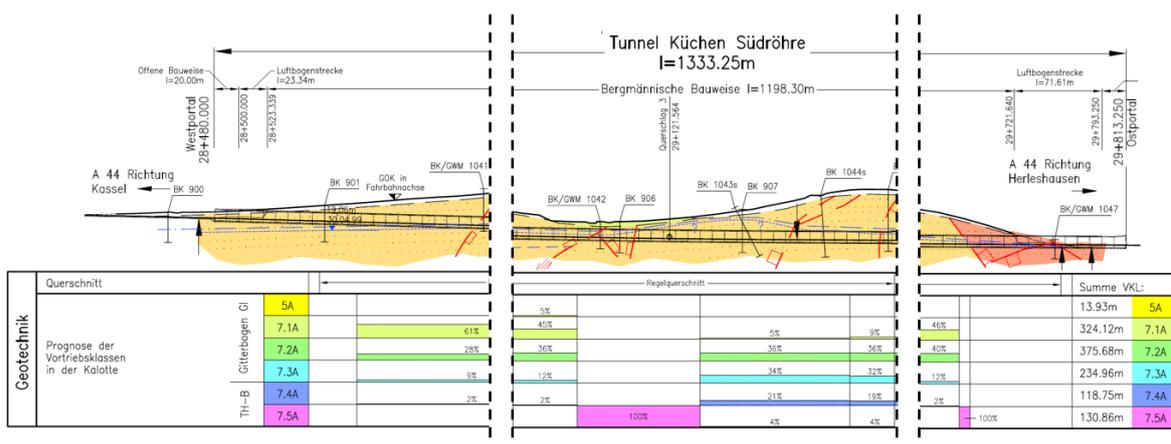


Abbildung 2.1: Geotechnischer Längsschnitt mit VKL Einteilung

In Abbildung 2.1 ist beispielhaft ein geologischer Längsschnitt entlang der Tunnelachse dargestellt. Eine Unterteilung in die jeweiligen Homogenbereiche ist im Bereich „Geotechnik“ von einem Experten durchgeführt worden.

Allerdings kann für einen Homogenbereich in der Regel nicht nur eine Vortriebsklasse bestimmt und für die Ausführung geltend gemacht werden. Grund hierfür ist die Unsicherheit der Schichtung und des physikalischen Verhaltens der Geologie. Für die Zeit- und Kostenplanung wird das Vorkommen einer VKL in einem Bereich auf Basis der geotechnischen Erkundungen und auf Grundlage von Erfahrungswerten meist prozentual abgeschätzt (Wagner *et al.*, 2016). Welche VKL allerdings tatsächlich während des Tunnelvortriebs eingesetzt wird, bestimmen Experten direkt auf der Baustelle im Vortriebsverlauf.

Nebenbei sei erwähnt, dass hier ein großes Potential für die Preisspekulationen seitens der Ausführungsfirmen bei der Angebotserstellung entsteht.

In Abbildung 2.1 ist zu erkennen, dass lediglich die VKL 7.5A in zwei Bereichen mit 100% prognostiziert ist. Die eindeutige Zuordnung der höchsten Vortriebsklasse kann hier aufgrund der geringen Bodenüberdeckung im mittleren Bereich und dem Anschlagsvorgang auf der östlichen Seite (in Abbildung rechts) des Tunnels vorhergesagt werden. Beide Bereiche erfordern den höchsten Grad an Sicherungsmitteln aufgrund geologischer Begebenheiten.

Im Zuge dieser Arbeit soll unter Anderem ein BIM-Modell für den Vorgang des Vortriebs auf Grundlage der Ausschreibungsdaten erstellt werden. Die Prognose einer bestimmten Vortriebsklasse in einem Bereich von 100% lässt sich in der Regel eindeutig in einem Modell abbilden. Allerdings ergeben sich mit einer prozentualen Festlegung von weniger als 100% einer VKL folgende Schwierigkeiten für die Modellierung der Ausbruchs- und Sicherungsmaßnahmen:

- An welcher Stelle innerhalb des Homogenbereichs ist der einheitliche Vortriebsklassenabschnitt zu erwarten? Die zufällige Festlegung der Anteile hätte einen erheblichen Einfluss auf die ortsgebundene Bauzeitermittlung.
- Eine Vortriebsklasse wird mit einer festgelegten Abschlagslänge geplant. Würde beispielsweise ein prozentualer Anteil eines VKL-Bereichs eine Gesamtlänge von elf Metern bedeuten, ist dies mit einer festen Abschlagslänge von 1,20 m nicht lückenlos abbildbar. Eine Lösungsvariante wäre ein angepasster Abschlag für die verbleibende Bereichsrestmenge am Ende. Ein kürzerer Außenschalenblock hätte allerdings in der Realität abweichende Sicherungsmittel und kann demnach nicht zur vorherigen VKL gezählt werden.
- Die VKL 7.5A kann hier beispielsweise nur in einem zusammenhängenden Bereich von zehn Metern aufgefahren werden, da eine vorausseilende Sicherungsmaßnahme einen größeren Bereich in Vortriebsrichtung abdeckt. Dies ist bei einem vierprozentigen Anteil von 100 m weder in der Baupraxis umsetzbar, noch im Modell abbildbar. Für die theoretische Prognose und Kostenabschätzung macht dieser Ansatz aber unter Umständen Sinn.
- Die „prozentuale Modellierung“ würde keinen Zustand abbilden, der in der Realität auch wirklich umgesetzt werden könnte. Damit wären die Modellelemente der Ausschreibungsplanung mit denen der Ausführung nur noch bedingt vergleichbar.

Aus eigener Erfahrung etabliert sich die BIM-Methodik am besten im Planungs- und Ausführungsprozess eines Projekts, wenn sie möglichst keine bewährten Abläufe unterbricht

oder ändert, sondern vielmehr ein Hilfsmittel und Werkzeug zur besseren Planung und Projektabwicklung darstellt. Im Zuge dieser Arbeit wurde aus diesem Grund versucht, die prozentualen Vortriebsklasseneinteilungen in einem Modell abzubilden.

Allerdings ließen sich die Ausbruchs- und Sicherungsmittel innerhalb eines Homogenbereichs für die Prognose von Vortriebsklassen deutlich flexibler und einfacher auch in einer verknüpften Berechnungstabelle abbilden. Durch die festgelegten Ausbruchs- und Sicherungsmittel einer vordefinierten Vortriebsklasse in Kombination mit der geplanten Abschlagslänge lassen sich so sehr leicht die Kosten pro Meter einer bestimmten Vortriebsklasse sowie die zu erwartende Bauzeit pro Tunnelmeter berechnen. Multipliziert man diese Kennzahlen mit der Summe über die Längen der jeweiligen Vortriebsklassen ([Abbildung 2.1](#), Abschnitt Geotechnik, rechte Seite), erhält man die prognostizierten Gesamtkosten und die benötigte Bauzeit für die gesamte Tunnellänge.

An dieser Stelle kommt natürlich die Frage auf, welchen Vorteil es dann bringt, das Prognosemodell für den Ausbruch und die Sicherungsmittel mit der [BIM](#)-Methodik abzubilden. Die Antwort liegt in der direkten Vergleichbarkeit von Ausschreibung und Ausführung, also der Vergleich des „SOLL-“ und „IST-Modells“. Im Detail wird dies im späteren [Kapitel 5](#) ausführlicher erläutert.

Für die [BIM](#)-Modellierung muss aus den genannten Gründen, abweichend von den bisherigen prozentualen Einschätzungen der Planer, eine stationsbezogene Einteilung der jeweiligen Vortriebsklasse entlang des geotechnischen Längsschnitts vom Planer/Geologen prognostiziert werden, wobei der wahrscheinlichste Zustand der Ausbruch- und Sicherungsmittel nach bestem Wissen zugrunde gelegt wird. Solch eine konkrete Verteilung wurde bei einem weiteren Beispielprojekt mit einem Experten zusammen erarbeitet und wird im Folgenden dargestellt.

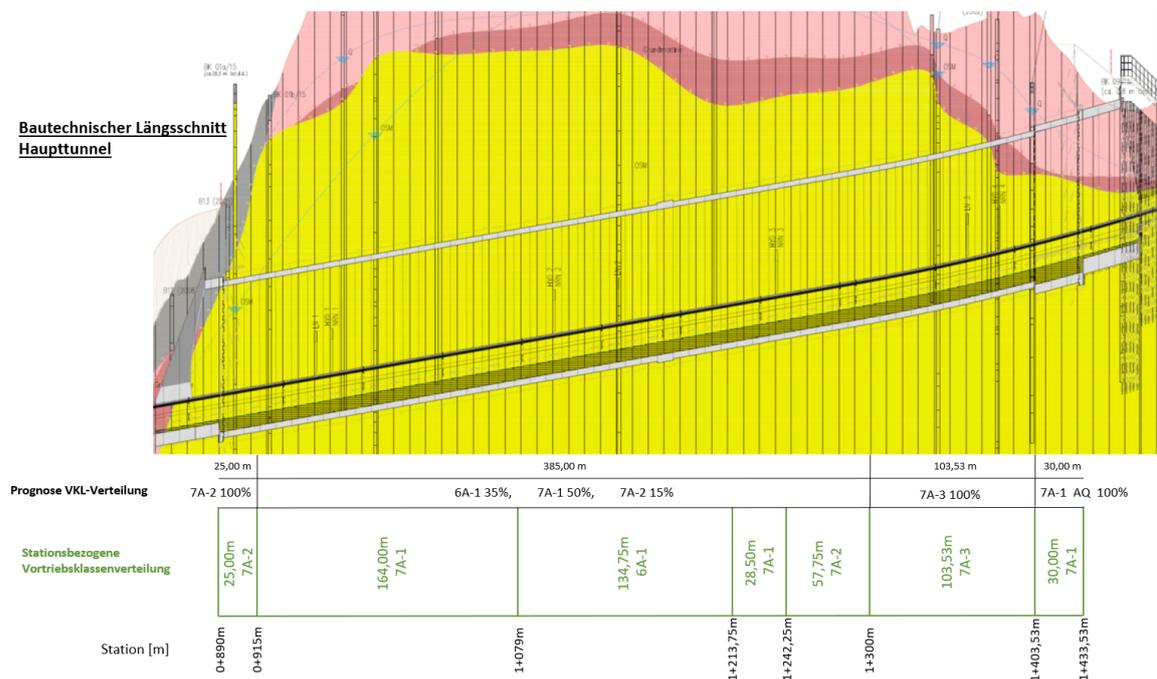


Abbildung 2.2: Geotechnischer Längsschnitt mit stationsbezogener VKL-Einteilung

In Abbildung 2.2 ist im Band „Prognose VKL-Verteilung“ die ursprüngliche prozentuale Verteilung angegeben. Der Bereich zwischen Station 0+915 und 1+300 wurde durch eine stationsbezogene VKL-Verteilung ersetzt, sodass nun entlang der gesamten Tunnelachse eine lokale Zuordnung der entsprechenden Ausbruchs- und Sicherungsmittel als Prognose existiert. Dabei war darauf zu achten, dass die, dem Bauvertrag zugrundeliegenden, prozentualen Anteile (6A-1: 35%; 7A-1: 50%; 7A-2: 15%) erhalten bleiben. Die Zwischenstationen ergeben sich somit zu 1+079m, 1+213,75m und 1+242,25m. Die konkrete Zuordnung, in welchem untergeordneten Abschnitt und in welcher Folge die prozentual angegebenen Vortriebsklassen am wahrscheinlichsten lokal anzutreffen sind, wird von einem Experten prognostiziert.

Eingabetabelle für die automatisierte Modellgenerierung

Aufgrund der Vielzahl an Elementen im Tunnelvortrieb sollte die Modellerstellung automatisch erfolgen. Hierfür wurde aus der stationsbezogenen VKL-Einteilung in Abbildung 2.2 eine Eingabetabelle (Tabelle 2.1) erarbeitet. Aufgrund der Möglichkeit der flexiblen Datenweiterverarbeitung wird die Eingabetabelle mit der Software „Microsoft Excel“ erstellt.

1	2	3	4	5	6	7	8
Achskilometrierung - Anfang /	Ende	Abschlagslänge	Querschnitt	VKL	Bereichslänge	# Abschläge	-
890,00 m	915,00 m	1,00 m	RQ	7A-2	25,00 m	25	x
915,00 m	1079,00 m	1,00 m	RQ	7A-1	164,00 m	164	x
1079,00 m	1213,40 m	1,20 m	RQ	6A-1	134,40 m	112	x
1213,40 m	1213,75 m	0,35 m	RQ	6A-1	0,35 m	1	Passblock
1213,75 m	1241,75 m	1,00 m	RQ	7A-1	28,00 m	28	x
1241,75 m	1242,25 m	0,50 m	RQ	7A-1	0,50 m	1	Passblock
1242,25 m	1299,25 m	1,00 m	RQ	7A-2	57,00 m	57	x
1299,25 m	1300,00 m	0,75 m	RQ	7A-2	0,75 m	1	Passblock
1300,00 m	1403,00 m	1,00 m	RQ	7A-3	103,00 m	103	x
1403,00 m	1403,53 m	0,53 m	RQ	7A-3	0,53 m	1	Passblock
1403,53 m	1433,53 m	1,00 m	AQ	7A-1	30,00 m	30	x

Tabelle 2.1: Eingabetabelle der stationsbezogenen VKL-Verteilung für die Modellgenerierung des Kalottenvortriebs

In den ersten zwei Spalten werden die Anfangs- und Endstationierung für den jeweiligen VKL-Abschnitt eingegeben. über diesen Abschnitt wird ein bestimmter Tunnelquerschnitt (Spalte vier) mit der entsprechenden Vortriebsklasse (Spalte fünf) gelegt. Die Spalte „Bereichslänge“ ergibt sich aus der Differenz von Endkilometer und Anfangskilometer.

Für jede Vortriebsklasse ist eine bestimmte Länge der einzelnen Abschläge aus der Planung festgelegt. Diese Länge muss unbedingt eingehalten werden, da statische und bautechnische Erfordernisse auf dieser Grundlage geplant und berechnet wurden (Spalte drei).

Die Anzahl an Abschlägen (Spalte sieben) ergibt sich aus der Bereichslänge und der einzelnen Abschlagslängen des jeweiligen Ausbruchselements.

Allerdings bleibt für manche Abschnitte ein „Rest“ übrig, der für einen weiteren regulären Abschlag nicht mehr ausreicht. Hier wird ein angepasster Abschlagsblock eingefügt. Dieser Spezialblock „verfälscht“ bei der Mengenermittlung das Ergebnis im SOLL zwar leicht, kann aber auf diese Weise auch in die Prognose mit einfließen. Denn welche Vortriebsklasse an den Überlappungsbereichen tatsächlich aufgefahren wird, ist ungewiss und ergibt sich erst beim Auffahren des Tunnels.

2.2 Aufbau des BIM-Modells

Das BIM-Modell wird mit der Modellierungssoftware Autodesk Revit 2019 in Kombination mit der visuellen Programmierschnittstelle Dynamo 2.1.0 erzeugt.

Mit anderen Softwarelösungen ist es ebenfalls möglich, die erforderlichen Geometrien entlang der Tunnelachse als Grundlage für das BIM-Modell abzubilden (Miedel, 2014; Allplan Schweiz AG, 2016). Allerdings wurde Revit ausgewählt, da es dort möglich ist, sogenannte adaptive Familien mit komplexen geometrischen Abhängigkeiten zu erzeugen (Autodesk GmbH, 2019). Mit entsprechendem Know-How kann auf diese Weise eine veränderbare Geometriestruktur geschaffen werden, die alle notwendigen Formzustande parametergesteuert abbilden kann.

In diesem Kapitel werden alle Schritte für die Modellierung und Attributierung der einzelnen Tunnelgeometrien vorgestellt.

2.2.1 Anforderungen an die Revit Familie

Bevor die einzelnen Teilschritte für die konkrete Umsetzung des BIM-Modells aufgezeigt werden, sollen in diesem Abschnitt die grundlegenden Geometrien und Einbauteile aus dem geplanten Vortrieb beschrieben werden. Somit wird ein besseres Verständnis für die Funktionsweise und die notwendige Flexibilität der einzelnen Bauteilkomponenten geschaffen. Anschließend wird diskutiert, auf welche Weise die jeweiligen Bauteilkomponenten im BIM-Modell erfasst werden können.

Relevante Bauteile im Vortriebsprozess

Im Folgenden sollen die wesentlichen Bauteilkomponenten im jeweiligen Ausbruchsquerschnitt erläutert werden. Diese Auflistung dient als Grundlage für die Umsetzung der Familienstruktur in Revit im Kapitel 2.2.2.

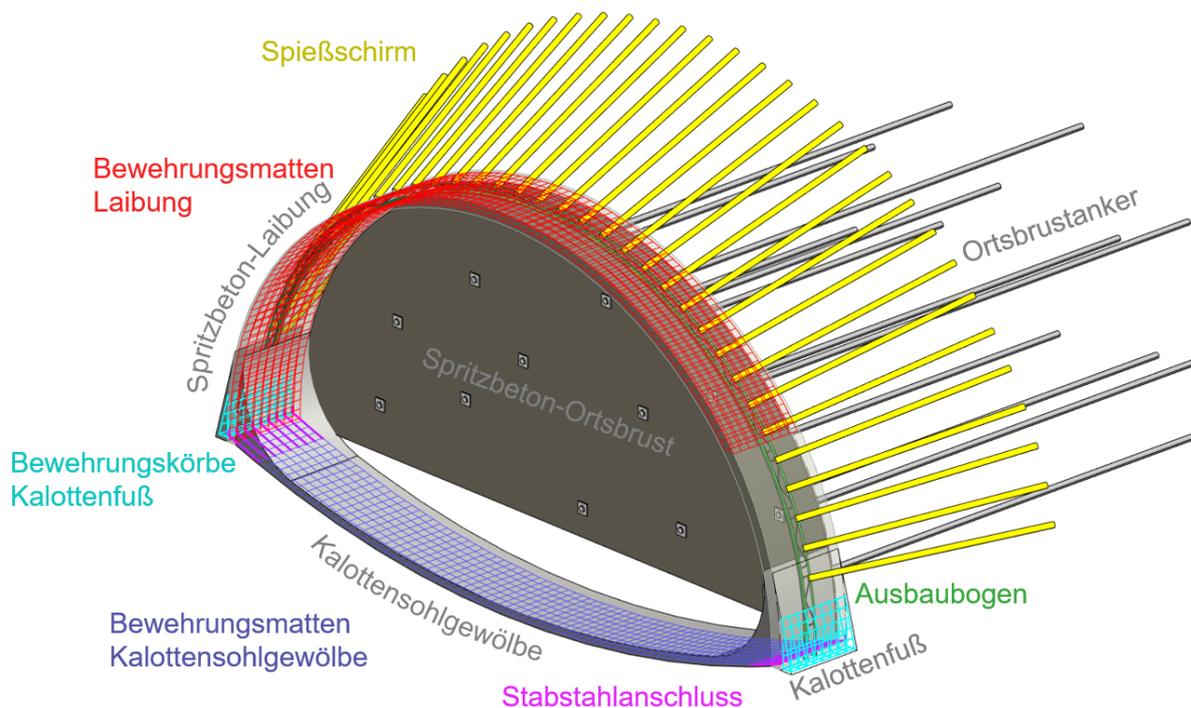


Abbildung 2.3: Detailelemente im Kalottenausbruch

Um einen Überblick über die einzelnen Bauteilkomponenten im Prozess des Kalottenausbruchs und der anschließenden Sicherung zu erhalten, wurde ein sehr detailliertes Modell

einer Abschlagsgeometrie erstellt. Der Detaillierungsgrad des Geometrieelements lässt sich mit dem **LOG** (Level of Geometry) beschreiben und entspricht hier in etwa einem Level von ~ 400 (Hausknecht & Liebich, 2016). Das **LOG** ist Bestandteil des **LOD**'s (Level of Development) und kennzeichnet den Grad der Ausarbeitung eines **BIM**-Modells anhand einer Skala von 100-500 (Borrmann *et al.*, 2018, S.136 f.).

Für die Außenschale des bergmännischen Tunnelbaus wurde noch keine eindeutige Klassifizierung des **LOD**'s durchgeführt. Aus diesem Grund wurde bei der Einstufung auf erste Definitionen aus dem maschinellen Schildvortrieb zurückgegriffen (Papantonakis, 2018, S. 45).

Im Folgenden wird kurz auf den Modellierungsaufwand eingegangen, da solch eine dreidimensionale Ausarbeitung mit heutigen Softwareanwendungen immer noch spezielle Herausforderungen mit sich bringt:

Das adaptive Modellelement ist an einer dreidimensionalen Achse ausgerichtet und die Querprofile sind in allen drei Raumrichtungen verdreht, sodass das Start- und Endprofil jeweils in der Normalenebene im entsprechenden Achsstationierungspunkt ausgerichtet ist. Mit heutigen Softwarefunktionen und programmierten Anwendungen ist es mit entsprechendem Wissen durchaus möglich, achsbasierende Komponenten zu erzeugen und auch in gekrümmten Ebenen mit Stahl zu bewehren. Auch Fertigteile, wie hier der Ausbaubogen, können entsprechend dreidimensional ausgerichtet werden. Die geometrischen Abhängigkeiten bleiben bei einer solch detaillierten Ausarbeitung mit der richtigen Modellierungstechnik erhalten. Somit kann zum Beispiel der Abschlag neu orientiert und die Strukturen innerhalb der Bauteilgruppe flexibel verändert werden, sodass alle Detailelemente wie Bewehrungsstahl und Ausbaubogen richtig ausgerichtet bleiben. Die genaue Erläuterung eines solchen Modellierungsprozesses würde allerdings den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Die spezielle Ausbauvariante des in Abbildung 2.3 gezeigten Tunnelabschlags, wird im Folgenden kurz erläutert.

In einem ersten Schritt wird die Kalotte ausgebrochen. Die Größe dieses Querschnitts wird in der Regel aus dem nötigen Arbeitsraum der Maschinen sowie vom geplanten späteren Lichtraumprofil abgeleitet.

Nachdem das Tragverhalten der Geologie durch die Hohlraumbildung gestört wird, ist es erforderlich, dass durch den Einbau von Sicherungsmitteln und dem interaktiven Zusammenwirken zwischen Geologie (Gebirge) und Sicherungsmittel außerhalb des Hohlraumes eine Lastumlagerung - Gebirgstragring- entsteht, die letztlich die Standsicherheit des Hohlraumes im Ausbruchsbereich gewährleistet. Weitere Hilfsmittel zur Herstellung eines stabilen Hohlraums sind der Vortrieb in Teilausbrüchen und die Reduzierung der Angriffstiefe zur langsamen Lastumlagerung und beschleunigter Sofortsicherungsmaßnahmen. Kontrolliert werden die nachfolgenden Sicherungsmaßnahmen durch Verformungsmessungen zur Realisierung der

im Tunnelbau vorherrschenden Beobachtungsmethode, die den Standsicherheitszustand des Tunnels während dem Vortrieb bestimmt. (Maidl, 2004a, S.145f.)

Nach dem Ausbruch des geologischen Materials wird zuerst die Ortsbrust durch eine Spritzbetonschicht gesichert. Eventuell kann die Ortsbruststabilität durch eingelegte Baustahlmatten und in Vortriebsrichtung gebohrte Ortsbrustanker erhöht werden. Für die Sicherung in der Spritzbetonlaibung werden sogenannte Ausbaubögen mit beidseitigen Bewehrungsmatten eingestellt und mit dem Aufbringen von Spritzbeton in ihrer Lage stabilisiert. Für eine großflächige vertikale Lastabtragung in den Untergrund ist die Standflächenverbreiterung durch einen Kalottenfuß (KF) üblich. Auch hier kann eine erhöhte Stabilität durch den Einbau von Bewehrungskörben erzeugt werden. Eine zusätzliche radiale Sicherung der Spritzbetonlaibung kann durch eingebaute Anker (in Abbildung nicht dargestellt) sichergestellt werden (Girmscheid, 2000, S.153-220). Um einen tragenden Ringschluss zu erzeugen, wird die Sohle optional durch ein sogenanntes Kalottensohlgewölbe (KSG) verstärkt. Der Anschluss des KSG an die Laibung erfolgt in der Regel durch den Einbau von Stabstahl. Das KSG kann ebenfalls durch das Einlegen von Bewehrungsmatten eine erhöhte Tragwirkung erzielen. Um den weiteren Vortriebsverlauf zu stabilisieren, werden sogenannte vorausseilende Sicherungselemente eingebaut. Hierzu zählt beispielsweise der Spieß- oder Rohrschirm. (Maidl, 2004a)

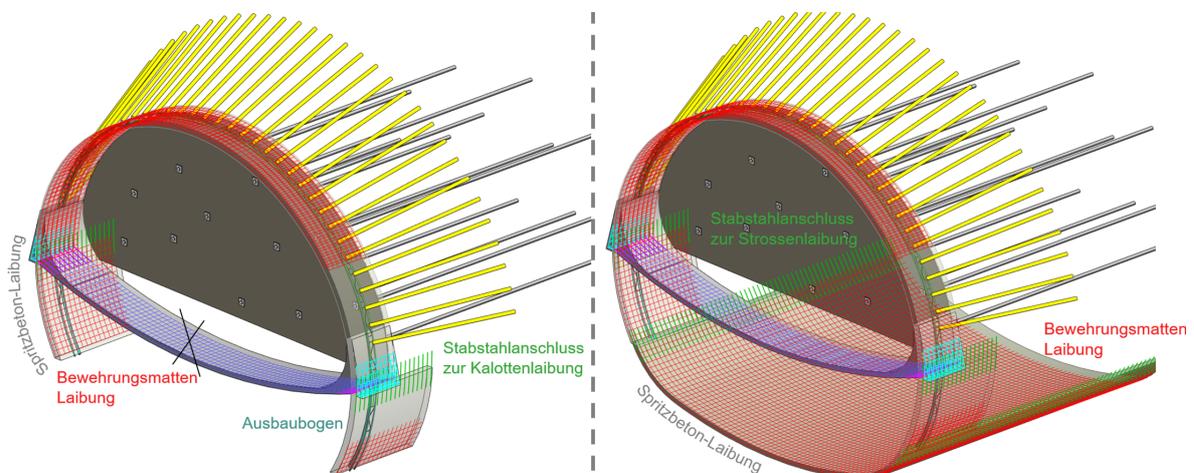


Abbildung 2.4: Detailelemente im Strossen- und Sohlbruch

In Abbildung 2.4 sind die Sicherungsmittel der weiteren Ausbruchprofile von Strosse und Sohle dargestellt.

Der Strossenvortrieb wird entsprechend dem Verformungsverhalten der Kalotte in einem bestimmten Abstand zum Kalottenvortrieb nachgefahren. In der Regel sind in der Strosse die Angriffstiefen zum Ausbruch der Strosse, gegenüber der Kalotte, deutlich länger, bevor eine Sicherung mit reduzierten Sicherungsmitteln eingebaut werden muss. Soweit ein KSG aus

Spritzbeton zum Auffahren der Kalotte verwendet wurde, wird dieses mit dem Strossenvortrieb wieder ausgebaut. Die Spritzbetonlaibung der Strosse wird mit der Kalotte über einen weitergeführten Ausbaubogen und den Stabstahlanschluss verbunden. (Maidl, 2004b, S.79f.) Mit dem Vortrieb der Sohle ist das gesamte Ausbruchsprofil für den späteren Einbau der Tunnelinnenschale aufgefahren. Die Sohle kann in der Regel mit sehr großen Abschlagslängen vorgetrieben werden. Sie ist ebenfalls über Stabstahl an die Strosse angeschlossen und wird durch Bewehrungsmatten und eine Spritzbetonschale ausgekleidet (Maidl, 2004b, S.79f.).

Der Vortriebsablauf und die genauen Einbauteile entsprechen den festgelegten Vortriebsklassen aus der Ausschreibungs- und Ausführungsplanung. Die Geometrien und Bauteilkomponenten können zwischen verschiedenen Projekten stark variieren. Somit hat jeder Tunnel seine universellen radialen Abmessungen, Vortriebsmechanismen und Bauteilkomponenten (Girmscheid, 2000, S.1).

Abbildung der Bauteilkomponenten im BIM-Modell

Für die Gesamtheit aller aufgezeigten Bauteilkomponenten soll nun eine, den Anforderungen entsprechende, Repräsentation der Gesamt-Bauteilgruppe für das BIM-Modell erarbeitet werden.

Das BIM-Modell wird mit dem Ziel erstellt, eine detaillierte Mengenerfassung für die einzelnen Positionen im Leistungsverzeichnis durchführen zu können. Demnach ist eine überaus detaillierte Geometrierepräsentation wie in Abbildung 2.3 und 2.4 nicht notwendig. Vielmehr würde ein zu hoher Detailgrad das Modell unflexibel und unübersichtlich machen. Diese Tatsache präzisiert die Einstufungen von Modellelementen in die verschiedenen LODs/LOGs. Ein niedriger oder hoher geometrischer Ausarbeitungsgrad ist demnach nicht gleichzustellen mit den Einschränkungen oder Zuverlässigkeiten im Modell (Borrmann *et al.*, 2015, S.141). Vielmehr muss der LOD/LOG den Zielen und Anwendungsfällen, die das BIM-Modell erfüllen soll, zutreffend gewählt sein.

In der tabellarischen Darstellung 2.2 werden alle relevanten Komponenten im Vortriebsvorgang nochmals zusammenfassend aufgelistet. Über die Abrechnungsgröße wird ersichtlich, welche Informationen im Modell auf welche Weise vorhanden sein müssen.

Dies führt abschließend zu der Entscheidung, ob eine geometrische Repräsentation notwendig ist, oder ob vielleicht eine parametrische Erfassung der Komponente ausreicht. Die tabellarische Übersicht definiert damit den genauen Ausarbeitungsgrad der Geometrie und der verknüpften Informationen im BIM-Modell. Dieser Schritt ist Grundlage für den geometrischen Erstellungsprozess in Kapitel 2.2.2 und die Festlegung der Parametertabelle in Kapitel 2.2.3.

Bauteilkomponente	Unterscheidung nach Vortriebsklasse		Abrechnungsgröße	explizite Geometrie notwendig?
Ausbruch	variabel über Fläche inkl. Deformationstoleranzen		Volumen	✓
Spritzbetonlaibung	variabel über Dicke und Deformationstoleranzen		Dicke, Innenkante Abwicklung, Abschlagslänge	✓
Bewehrungsmatten für Laibung und KSG	bergseitig luftseitig	Typen- beschreibung	Innenfläche, aus pos. Spritzbeton	X
Stabstahl	Typenbeschreibung keine explizite Vorschrift		Abrechnung nach Plan	X
Ausbaubogen	Typenbeschreibung		Innenkante Abwicklung	X
Radialanker	Typenbeschreibung		Stückzahl	X
Vorauselende Sicherung Spießschirm	Typenbeschreibung		Stückzahl	X
Vorauselende Sicherung Ortsbrustanker	Typenbeschreibung		Stückzahl	X
Vorauselende Sicherung Rohrschirm	Typenbeschreibung		Stückzahl und Länge	/
Spritzbeton Ortsbrust	variabel über Dicke und Deformationstoleranzen		Fläche, Volumen	✓
Spritzbeton Kalottenfußverbreiterung	Typenbeschreibung		Breite, Fläche, Volumen	✓
Spritzbeton Kalottensohlgewölbe	variabel über Dicke und Deformationstoleranzen		Länge, Fläche und Volumen	✓

Tabelle 2.2: Repräsentation der einzelnen Bauteilkomponenten im BIM-Modell

Für Bauteilkomponenten wie beispielsweise die Radialankerung oder Spießschirm reicht es aus, den jeweiligen Produktnamen (Bauteiltyp) sowie die Stückzahl der eingebauten Komponenten zu dokumentieren. Die genaue Lage und Anordnung spielt für die Abrechnung keine Rolle und variiert in der Bauausführung ohnehin.

Der Stabstahl muss im Modell nicht vorhanden sein, da er in der Regel über den Ausführungsplan abgerechnet wird und im tatsächlichen Vortriebsverlauf nicht ohne weiteres neue Varianten der Bewehrung festgelegt werden können. Somit lässt sich die Stabstahlmenge im Prinzip allein durch die Vortriebsklassendefinition des Abschlagelements im Modell ermitteln. Für die Bewehrungsmatten ist allerdings die Information des eingebauten Mattenprodukts (Typenbeschreibung) notwendig, da die einzelnen Matten spezifische Gewichtskennwerte aufweisen. Die abzurechnende Fläche wird jedoch über schon vorhandene Geometrien, wie beispielsweise die Spritzbetonlaibung oder das Kalottensohlgewölbe (KSG), abgerechnet. Somit ist keine Modellierung der Bewehrungsmatten notwendig. (Poppinga, 2013, S.111)

Für die vorausseilende Rohrschirmsicherung würde es eigentlich ausreichen, einen Parameterwert für die Stückzahl und die Rohrlänge für die Mengenabrechnung zu erfassen. Allerdings ist der Rohrschirm eine sehr spezielle und ausschlaggebende Maßnahme für den Vortriebsverlauf, sodass er als Geometrie im Modell visualisiert wird. Damit erleichtert es dem Anwender, sich im Modell orientieren und gesetzte Parameterwerte überprüfen zu können.

Folgende Bauteilkomponenten müssen jedoch im Modell geometrisch abgebildet werden, da sonst keine Mengenermittlung möglich ist:

- Ausbruch
- Spritzbetonlaibung
- Kalottensohlgewölbe
- Kalottenfuß
- Ortsbrust

Die Definition der exakten geometrischen Abrechnungsgrößen ist entweder nach Bauvertrag oder nach **VOB** (Poppinga, 2013) geregelt.

Diese Geometrien müssen miteinander so „verlinkt“ werden, sodass sich bei einer Änderung der variablen Größen einer Komponente die Anderen entsprechend mit verändern. Beispielsweise muss sich bei einer dickeren Spritzbetonstärke auch der Kalottenfuß senkrecht zum Kreisbogen nach außen mit verschieben. Diese geometrischen Abhängigkeiten werden in Kapitel 2.2.2 genauer erläutert und aufgezeigt.

Toleranzen und Überhöhungen nach DIN 18312

Im Tunnelbau gibt es die Besonderheit, dass sich nach dem Einbau der Außenschale das Gebirge ausschlaggebend für den weiteren Bauprozess verformen kann. Je nach Intensität muss der Ausbruchsquerschnitt deshalb aufgeweitet werden, sodass er nach Verformung das entsprechende Soll-Maß erreicht (Ruse, 2004).

Zusätzlich besteht beim Lösen des Boden- und Felsmaterials die Schwierigkeit, aufgrund der geologischen Zusammensetzung des Boden-/Gesteinskörpers keine exakten Ausbruchprofile herstellen zu können (Girmscheid, 2000).

Aus diesen beiden Gründen gibt es im Tunnelbau die Norm DIN 18312, die diese Sachverhalte über Toleranz- und Überhöhungswerte abdeckt. Da aus den Toleranzen und Überhöhungen Geometrieänderungen resultieren, die für die Abrechnung relevant sind, müssen sie sehr präzise behandelt und in das Modell mit einbezogen werden. (Poppinga, 2013, S.109)

Eine aussagekräftige Abbildung zu dieser Norm ist im Anhang unter Anlage A.1 zu finden. Die Abrechnung aller Komponenten in der Außenschale erfolgt über die sogenannte „L_{AS}-Linie“. Sie ergibt sich aus der inneren Tragwerksbegrenzungslinie (Innenschale) und den folgenden Toleranzwerten und Bauteildicken:

$$L_{AS} = L_{TW} + t_b + d_i + t_d + d_{ak} + d_a + t_i + \ddot{u}$$

- L_{AS}-Linie Ausbruchsollprofil
- L_{TW}-Linie Innere Tragwerksbegrenzungslinie
- t_b Bautoleranz der Innenschale
- d_i Planmäßige Dicke der Innenschale
- t_d Deformationstoleranz der Außenschale
- d_{ak} Dicke der Ankerköpfe und der Abdichtung
- d_a Planmäßige Dicke der Außenschale
- t_i Innentoleranz
- \ddot{u} Überhöhung zum Ausgleich nicht vermeidbarer Verformungen

Dabei sind in der Regel fast alle Werte im Bauvertrag oder in der Planung fest geregelt. Lediglich die Toleranzwerte „t_d + \ddot{u} “ sind während des Vortriebs variabel. Sie werden entsprechend den Verformungsmessungen, des physikalisch berechneten Bodenverhaltens oder aus Erfahrungswerten heraus im Vortriebsverlauf angepasst. Dies erfordert eine sehr flexible Modellierung bei der Familienerstellung, da ein variables Maß t_d+ \ddot{u} eine konzentrische Aufweitung oder Verengung des Profils bedeutet.

2.2.2 Geometrischer Erstellungsprozess

Der geometrische Modellierungsprozess hängt sehr stark davon ab, zu welchem Projektzeitpunkt und auf welcher Datengrundlage die Bauteilfamilie erstellt wird. Je besser die Querschnittsvarianten, das Leistungsverzeichnis und damit auch die notwendigen Freiheitsgrade im Projektverlauf bereits ausgearbeitet sind, desto präziser lassen sich die geometrischen Zusammenhänge mit definierten und flexiblen Abhängigkeiten erzeugen.

In Kapitel 2.2.1 wurden die grundlegenden Geometrien und Einbauteile beschrieben. Erst wenn dieser Informationsgrad im Planungsverfahren erreicht ist, lassen sich alle notwendigen Informationen in einer geometrie-gebundenen Datenbank für die Anforderungen im BIM-Modell eindeutig abbilden.

In der Regel bestehen zu dieser Planungsphase schon die entsprechenden VKL-Pläne im 2D-Format. Bei der Querschnittsfindung und der Definition der genauen Ausbruchs- und Si-

cherungsmethoden lässt sich bisher mit einer 3D-Planung noch kein Mehrwert erzielen. In den 2D-Plänen sind nicht nur die genauen Querschnitte und Einbauteile für jede Vortriebsklasse definiert, sondern auch die notwendigen Freiheitsgrade und Ausbauvarianten formuliert. Eine Information im Vortriebsklassenplan *“das Maß $td+ü$ wurde bei dieser Ausbauvariante mit 8cm berücksichtigt, muss aber anhand von Verformungsmessungen entsprechend angepasst werden”* liefert beispielsweise eine flexible geometrische Anforderung, die bei der Modellierung umzusetzen ist. Ein weiteres Beispiel ist die Platzierung der Voraussicherungen. Ein Rohrschirm muss in seiner genauen Position den tatsächlichen Anforderungen angepasst werden. Auch dieser Punkt setzt eine sehr flexible Modellierung für die Abbildung dieser Maßnahme voraus.

Die Gesamtheit aller Anforderungen und Freiheitsgrade im Vortriebsklassenelement bestimmen am Ende den genauen Weg der geometrischen Modellierung. Der Erstellungsprozess der Revit-Familie kann deshalb von Projekt zu Projekt deutlich variieren.

In der Regel lässt sich auf den 2D-Dateien des herkömmlichen Planungsprozesses aufbauen. Auch in der 3D-Modellierung werden zuallererst die geometrischen Abhängigkeiten in der zweidimensionalen Querschnittsgeometrie abgebildet. Anschließend lassen sich die adaptiven Profile durch parametergesteuerte Translation und Rotation im Raum frei orientieren. In Revit spielt dabei die richtige Formulierung der sogenannten adaptiven Punkte und Referenzpunkte eine ausschlaggebende Rolle (Autodesk GmbH, 2019).

Zwischen den positionierten Profildfamilien kann nun eine Verbindung durch ein oder mehrere Pfad(e) erzeugt werden. Mögliche Formen zwischen den Querschnitten sind beispielsweise lineare, polylineare, quadratische oder kubische Raumkurven. Die Verbindung der Profile muss allerdings dem tatsächlichen dreidimensionalen Verlauf entsprechend gewählt sein.

Im Tunnelbau muss eine definierte Querschnittsform in jedem Stationierungspunkt exakt abgebildet werden. Eine lineare Verschmelzung zweier nicht parallel liegender Querschnittsprofile ist daher in der Regel nicht zulässig. Passende Interpolationsmethoden sind die Extrusion oder das 3D-Sweeping in Richtung des Normalenvektors der 2D-Querschnittsebene.

Die räumlich richtige Kopplung der einzelnen Elemente erfordert nicht nur eine durchdachte Formulierung der 3D-Geometrie, sondern auch ein neues Denken in der Tunnelplanung. Nicht selten wurden im herkömmlichen Planungsprozess komplexe dreidimensionale Sachverhalte vereinfacht dargestellt und erst in der Projektrealisierung entsprechend gelöst. Bildet man allerdings einen digitalen Zwilling des Tunnels im dreidimensionalen Raum ab, ist die Berücksichtigung dieses Schrittes essentiell und schon für die Planungsphase umzusetzen.

Über die Verbindung von geschlossenen Polylinien in den einzelnen Profilen lassen sich für die Teilkomponenten der Abschlagsgeometrie 3D-Volumenkörper erzeugen.

Um ein bestimmtes Teilvolumen bei der Mengenauswertung berechnen zu können, ist die Identifikation über die Zuweisung eines Materials erforderlich. Dabei ist darauf zu achten, dass alle notwendigen Bauteile durch einen eindeutigen Parameterfilter abgegriffen werden können. Möchte man beispielsweise das Volumen einer Spritzbeton-Komponente berechnen

können, muss sichergestellt werden, dass auch nur diese Komponente ein bestimmtes Material zugewiesen bekommen hat.

Die einzelnen Vortriebsklassen werden als Familientypen innerhalb einer Querschnittsform definiert. Somit kann im Projekt an einem Element direkt die Vortriebsklasse geändert werden, ohne dass eine neue Familie positioniert und attributiert werden muss. Das Vorkommen von speziellen Einbauteilen innerhalb einer Abschlagsgeometrie kann über die Sichtbarkeitsparameter gesteuert werden. Wählt man beispielsweise innerhalb der Familie für den Regelquerschnitt die Kombination Sohle_VKL.7-1A anstatt Kalotte_VKL.7-1A als Familientyp aus, werden alle Elemente des Sohlvortriebs ein- und alle Elemente des Kalottenvortriebs ausgeblendet.

Die genaue geometrische Modellierung kann von Projekt zu Projekt sehr unterschiedlich sein. Am Ende muss lediglich jeder geometrische Sachverhalt mit den entsprechend veränderbaren Parametern für die geometrischen Abhängigkeiten richtig abgebildet werden.

“Richtig” heißt in einem Abrechnungsmodell nicht unbedingt, dass jede Geometrie genau so im Modell vorliegen muss, wie sie in den Vortriebsklassenplänen für die Bauausführung definiert worden ist. Sondern es müssen alle geometrischen Größen in der Bauteilfamilie vorhanden sein, um jedes Abschlagselement den Leistungspositionen entsprechend abrechnen zu können.

Soll ein Modell die Basis für die Abbildung beider Ziele, der Ausführungsplanung und der Steuerung von Zeit und Kosten, erfüllen, muss sichergestellt werden, dass auch alle Abrechnungsmengen aus den tatsächlich auszuführenden Geometrien abgeleitet werden können. Das scheint für einfache Disziplinen im Bausektor zu funktionieren, allerdings (noch) nicht für den Tunnelvortrieb.

Beispielsweise wird in der Vortriebsklassenplanung die Geometrie dargestellt, die sich nach der theoretischen Verformung des Gebirges ergibt. In der Abrechnung wird allerdings die aufgeweitete, ursprünglich hergestellte Geometrie vergütet (Poppinga, 2013, S.109).

Dieser Sachverhalt ließe sich nicht in einem gemeinsamen BIM-Modell abbilden, sondern würde ein separates Planungs- und Abrechnungsmodell bedeuten. Solch eine unterschiedliche Betrachtungsweise kommt davon, dass sich bisher die einzelnen Fachdisziplinen weitestgehend unabhängig voneinander organisiert haben. Dieser Gedanke ist allerdings mit der BIM-Methodik nicht mehr möglich und es muss sich auf einheitliche Standards verständigt werden (Borrmann *et al.*, 2015, S.251).

2.2.3 Festlegung der Parametertabelle

Wie aus Abbildung 2.2 ersichtlich, reicht es für einige Bauteilkomponenten aus, alle abrechnungsrelevanten Informationen in Form von Parameterwerten zu speichern. Die geometrische Beschreibung dieser Strukturen wäre nicht nur mit sehr hohem Modellierungsaufwand ver-

bunden, sondern würde ohnehin keinen Mehrwert bei den Informationsanforderungen für die Mengenerfassung erzielen.

Die Informationsanforderungen eines jeden Elements ergeben sich aus dem Leistungsverzeichnis (LV). In der Regel ist im Tunnelvortrieb das LV nach den einzelnen Ausbruchsquerschnitten gegliedert. Für jedes Abschlags-element im Modell ist damit geregelt, welche Einbauteile und Bauteiltypen vertraglich nach einer bestimmten Vortriebsklasse überhaupt eingebaut werden dürfen.

Damit bestimmt das LV die exakten informativen Anforderungen und Freiheitsgrade im BIM-Modell.

Dieser Sachverhalt wird anhand folgenden Beispiels genauer erläutert:

Im Bereich des Regelquerschnitts (RQ) sind für den Kalottenvortrieb folgende Spieße für die vorausseilende Sicherung im LV ausgeschrieben:

- Hüllrohrspieß, L = 4,0m
- Hüllrohrspieß, L = 6,0m
- Rammspieß, L = 4,0m
- Rammspieß, L = 6,0m

Jede Leistungsposition wird nach der genauen Anzahl an eingebauten Spießen in jedem Abschlag abgerechnet.

Auf welche Weise können nun diese Varianten des Einbaus der Spieße im Modell abgebildet werden? Diese Frage ist nicht so leicht zu beantworten und erfordert für manche Bauteilgruppen ein tiefes Verständnis für die Prozesse des Tunnelvortriebs.

Die Freiheitsgrade werden für jede Bauteilkomponente anhand folgender Punkte definiert:

Wie viele verschiedene (Spieß-)Typen können innerhalb eines Abschlags verwendet werden?

Die Anzahl an verschiedenen Spieß-Typen, die innerhalb eines Abschlags eingebaut werden können, bestimmen die Anzahl an Parametern, die zur Erfassung im Modell notwendig sind. Ein Modellparameter (z.B. mit dem Namen „Spieße_Typ_1“) wird mit dem Wert „Hüllrohrspieß, L = 4,0m“ belegt. Wird allerdings im selben Abschlag ebenfalls ein „Rammspieß, L = 4,0m“ eingebaut, wird ein zweiter Parameter für die Erfassung (z.B. mit dem Namen „Spieße_Typ_2“) benötigt.

Im Tunnelvortrieb wird in der Planung und Ausführung in der Regel bei einem Spießschirm auch nur ein Typ verwendet, allerdings können zwei verschiedene Typen bei anderen Einbauteilen, wie zum Beispiel Radialankern, durchaus vorkommen.

Haben alle Abschläge vom Typ „RQ_Kalotte“ (Teilausbruch Kalotte im Regelquerschnitt) die selben Parameterwerte?

Diese Frage entscheidet darüber, ob ein sogenannter Typen- oder Exemplarparameter für die Erfassung der Bauteilkomponente im Modell angelegt wird.

Der Wert eines Typenparameters ist für einen Revit-Familientypen immer identisch. ändert man den Wert des Typenparameters eines Elements, ändern sich automatisch auch die Werte dieses Parameters für alle anderen Elemente des selben Typs (b.i.m.m GmbH, 2012).

Demzufolge würden alle Abschläge vom Typ „RQ_Kalotte“ immer auch den selben Wert des Typenparameters „Spiee_Typ.1“ von beispielsweise „Hüllrohrspieß, L = 4,0m“ aufweisen.

Der Wert eines Exemplarparameters hingegen kann zwischen mehreren Exemplaren eines gemeinsamen Revit-Familientyps variieren (b.i.m.m GmbH, 2012).

Demzufolge könnte bei zwei Abschlags-elementen jeweils ein unterschiedlicher Wert für den Exemplarparameter „Spiee_Typ.1“ ausgewählt sein, obwohl beide Abschläge zum selben Typ „RQ_Kalotte“ gehören.

In der Planung von Tunnelbauwerken wird bei der Erstellung des BIM-Modells in der Regel versucht, alle Einbauteile als Typenparameter abzubilden. Damit lässt sich bei einer Änderung eines bestimmten Bauteiltyps die Datenbank mit einer einzigen Neueingabe des Parameterwertes einfach aktualisieren. Außerdem spiegelt diese Denkweise den Inhalt eines Vortriebsklassenplan und dessen Definition von Ausbruchs- und Sicherungsmitteln wider.

Im Tunnelbau ist ein Spieschirm oftmals auch nur für jeden zweiten Abschlag innerhalb eines Ausbruchquerschnitts vorgesehen. Somit ist der Parameter für die Spieße als Exemplarparameter zu wählen. Der Spietyp ist demnach für einen Abschlag entsprechend gesetzt, für den darauffolgenden Abschlag bleibt er leer.

Welches Datenformat wird für den Wert des Parameters benötigt?

Eigentlich liegt es sehr nahe, den Parameterwert durch eine einfache Texteingabe festzulegen. Allerdings muss die Qualität in der Geometrie-gebundenen Datenbank auf die Weise sichergestellt sein, dass in Folgeapplikationen eine fehlerfreie Parameterauswertung durchgeführt werden kann.

Bei einer manuellen Eingabe kann es durchaus vorkommen, dass keine einheitliche Regel der Zeichenfolge für die entsprechende Bauteilbeschreibung befolgt wird. Außerdem könnten Bauteilbezeichnungen eingetragen werden, für die im LV keine Leistungsposition vorhanden ist. Das System wäre dadurch äußerst fehleranfällig und dieser Sachverhalt könnte während der Projektphase zu großen Schwierigkeiten führen.

Deutlich strukturierter und fehlerfreier ist hier eine Auswahl des Parameterwertes aus einer Liste. Dabei sind die Auswahlmöglichkeiten innerhalb einer Liste genau so definiert, dass sie in Form einer einheitlichen Namenskonvention die projektspezifischen Einbauteile in den Leistungspositionen im LV abbilden. In den Listen muss berücksichtigt werden, dass zusätzlich

zu den Einbauteiltypen auch eine Option für die fehlende Existenz einer Bauteilgruppe ausgewählt werden kann.

Wie wird die Menge eines Einbauteils erfasst?

Die Menge einer Bauteilkomponente muss in einem separaten Parameter erfasst werden, der in seiner Namensbezeichnung einen entsprechenden Bezug zur Definition des Bauteiltyps hat. Im Beispiel der Spieße wäre ein Parameter mit der Bezeichnung „Spieße_Typ-1_Anzahl“ denkbar.

Außerdem sollte das Datenformat so gewählt sein, dass die Abrechnungsgröße nach Tabelle 2.2 entsprechend ihres Zahlenformats und der jeweiligen Einheit richtig abgebildet werden. Die Anzahl an Spießen lässt sich über den Datentyp „Ganzzahl“ (Integer) in Kombination mit der Einheit „St“ (Stück) beschreiben.

Eine Bewehrungsmatte benötigt hingegen keine zusätzlichen Informationen für die Mengenermittlung, da die Fläche über die Geometrien der Spritzbetonlaibung und des Kalottensohlgewölbes abgerechnet wird.

Letztendlich lassen sich noch eine Vielzahl von weiteren Überlegungen anstellen, um die Bauteilkomponenten möglichst strukturiert und flexibel in einer Datenbank abbilden zu können. Die Anforderungen und Freiheitsgrade variieren dabei von Projekt zu Projekt, wobei den wesentlichen Faktor für eine durchgängige Datenbank die Qualität und Strukturierung des Leistungsverzeichnisses ausmacht.

Eine voll ausgearbeitete Datenbank für einen Abschlag im Regelquerschnitt ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Die Parameterwerte sind auf Grundlage einer typischen Ausbauvariante der Vortriebsklasse „6A-1“ gesetzt.

Im ersten Abschnitt der Parametertabelle sind grundlegende Informationen über das Abschlagselement aufgelistet. Die Parameterkennzahlen 1-5 ordnen den Abschlag einem eindeutigen Tunnelbereich zu. Die Abschlagsnummer in Kombination mit der Anfangs- und Endstationierung identifiziert innerhalb eines Bereichs ein einzelnes Abschlagselement.

Im darauffolgenden Abschnitt „0A0Toleranzen_und_Ueberhoehungen“ werden die bauvertraglichen und planerischen Toleranzen nach DIN 18312 (vgl. Kapitel 2.2.1) festgelegt.

Die weiteren Parameter mit den zweistelligen Ordnungszahlen 02-10 beschreiben die einzelnen Bauteilkomponenten analog zu Abbildung 2.2.

Für den Spießschirm wurden, wie zuvor beschrieben, ein Parameter „07_Sp_Typ1“ für die Auswahlliste der Typenbezeichnung und ein weiterer Parameter „07_Sp_Typ1_Anzahl“ für die Anzahl der eingebauten Spieße eingeführt.

Parameter, dessen Wert leer, „-“ oder eine Nullmenge ist, sind in diesem Abschlag nicht enthalten. Es kann sogar vorkommen, dass ein Einbauteil (z.B. „08_Pfaendbleche“) im gesamten Projekt gar nicht verwendet wird und damit immer zu null gesetzt ist. Selbst dann muss der Parameter aber aufgeführt werden, da im LV eine entsprechende Leistungsposition und damit eine vertragliche Grundlage vorhanden ist und somit das Bauteil bis zum Projektende

unter Umständen noch einbezogen können werden muss.

Bei einer vollständig vernetzten Datenbank in der BIM-Umgebung ist oftmals das gravierendste Problem, wenn gerade in einer späteren Projektphase grundlegende Datenstrukturen ergänzt oder verändert werden müssten. Dies kann entweder eine Modifizierung der Geometriestruktur oder ein erweitertes Vernetzen neuer oder abgeänderter Informationen zur Folge haben.

1Angriffsort	Süd
2Tunnelroehre	RQ
3Bezeichnung_Ausbruchsquerschnitt	Kalotte
4Vortriebsart	Baggervortrieb
5VKL	6A-1
6Ausbaufestlegungs-Nr.	
Abschlagslaenge	1200.0 mm
Abschlagsnummer	7
KilometrierungAnfang	10.500000 m
KilometrierungEnde	11.700000 m
0A0Toleranzen_und_Ueberhoeungen###	###
00Außentoleranz_(ta)	200.0 mm
00BautoleranzInnenschale_(tb)	0.0 mm
00dak	30.0 mm
00Deformationstoleranz&Ueberhoeung_(td+ ue)	100.0 mm
00Innentoleranz_(ti)	0.0 mm
01_Allgemeine Parameter###	###
01_Datum	
01_Teilflaechen	5
02_Ausbaubogen###	###
02_A_Typ1<Sonderausstattung>	List_Ausbaubögen : 3-Gurt Gitterträger 145/20/30
02_A_Typ1_Anzahl	1.000000
03_Baustahlmatten###	###
03_B_Typ1<Sonderausstattung>	List_Baustahlmatten : Q257A
03_B_Typ2<Sonderausstattung>	List_Baustahlmatten : Q257A
04_Ortsbrust###	###
04_O	<input checked="" type="checkbox"/>
04_O_Dicke	50.0 mm
04_O_Typ1_Baustahlmatten<Sonderausstattung>	List_Baustahlmatten : -
04_O_Typ1_Lagen_Baustahlmatten	1
05_KSG###	###
05_KSG	<input checked="" type="checkbox"/>
05_KSG_B_Typ1<Sonderausstattung>	List_Baustahlmatten : Q257A
05_KSG_B_Typ2<Sonderausstattung>	List_Baustahlmatten : Q257A
05_KSG_Dicke	300.0 mm
06_Anker_radial###	###
06_A_Typ1<Sonderausstattung>	List_Anker : Gebirgsanker L = 6,0 m
06_A_Typ1_Anzahl	2
07_Spiessschirm###	###
07_Sp_Typ1<Sonderausstattung>	List_Spieße : Hüllrohrspieß L = 6,0 m
07_Sp_Typ1_Anzahl	43
08_Pfaendbleche###	###
08_Pf_Typ1<Sonderausstattung>	List_Pfändbleche : -
08_Pf_Typ1_Anzahl	0
09_Spritzbeton###	###
09_Staerke_(da)	300.0 mm
09_Ulmenstiel_Ausbaubogen<Sonderausstattung>	List_Ausbaubögen : -
09_Ulmenstiel_Ausbaubogen_Anzahl	0.000000
09_Ulmenstiel_Staerke	0.0 mm
10_Kalottenfuss###	###
10_Breite_Kalottenfuss	500.0 mm
10_Kalottenfuss	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabelle 2.3: Ausschnitt der Parametertabelle für das Prognosemodell

2.2.4 Erstellungsvorschriften im Dynamo-Script

In den vorherigen Kapiteln wurde erläutert, wie eine adaptive Familie eines Tunnelabschlags mit der Modellierungssoftware Revit aufgebaut wird, die alle relevanten Geometrien und Informationen, verknüpft mit den notwendigen Freiheitsgraden, beinhaltet.

Anschließend müssen die Exemplare der Familie gemäß der Eingabetabelle 2.1 entlang der Trasse platziert werden. Dieser Schritt ist aufgrund der erforderlichen Genauigkeit von Bauteilpositionen und Querschnittsdrehungen sowie der Vielzahl an Elementen nicht manuell möglich.

Aus diesem Grund wurde die visuelle Programmierschnittstelle „Dynamo“ als Erweiterung für Revit verwendet.

Bei der visuellen Programmierung werden Code-Blöcke so miteinander verknüpft, dass sie eine logische Einheit ergeben und bestimmte Berechnungsaufgaben erfüllen. Die Code-Blöcke können entweder aus vorgefertigten Bibliotheken eingefügt, oder selbst mit der Programmiersprache „Python“ entwickelt werden. Die Anwendungsgebiete reichen dabei von der Erstellung komplexer Geometrien bis zu diversen Auswertungs- und Visualisierungsmöglichkeiten im BIM-Modell (dynamobim.org, 2019).

Die vernetzte Arbeitsweise zwischen einem visuellen Programmierungstool und einer Modellierungsumgebung hat sich in den letzten Jahren bei der Erzeugung von Infrastrukturmodellen oder aufwändigeren Formen in der Architektur bewehrt. (Ritter *et al.*, 2015) Mit dieser Softwarekombination können beispielsweise Brückenbauwerke mit einem parametrisierten Modellierungsprozess (Georgoula, 2019; Abedin, 2016, S.37) oder komplexe Formen im konstruktiven Ingenieurbau (Mirtschin, 2011) für die BIM-Modellierung erzeugt werden. Für die Generierung eines BIM-Modells für die Außenschale im bergmännischen Tunnelvortrieb ist die Methode aber noch nicht weit verbreitet. Allerdings lässt sich auf den achsbasierten Systemen aus dem Brückenbau aufbauen.

Bei der Erzeugung des Vortriebmodells wird Dynamo verwendet, um die exakte Positionierung der Elemente im dreidimensionalen Raum sowie die Querschnittsverdrehung entsprechend der Stationierung automatisch zu berechnen.

Die Erläuterung der einzelnen Schritte im Dynamo-Skript erfolgt über das Flussdiagramm (Flow-Chart) in Abbildung 2.5.

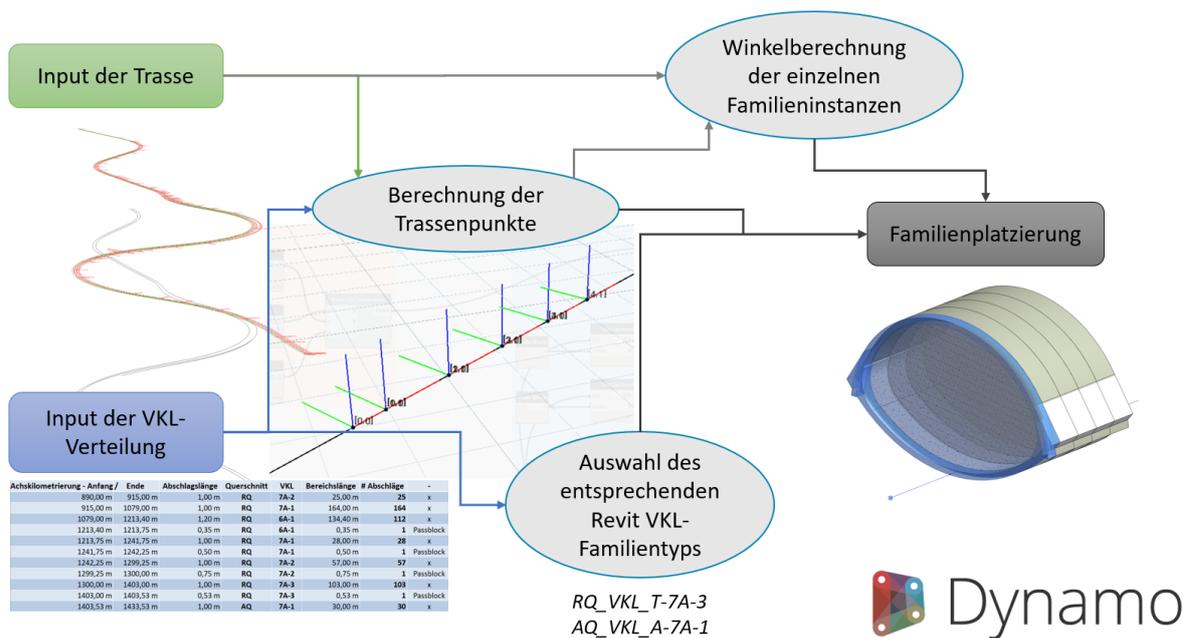


Abbildung 2.5: Flow-Chart des Erstellungsscripts in Dynamo für das Soll-Modell

Als Eingabe wird lediglich die Trasse und die Input-Tabelle 2.1 der VKL-Verteilung benötigt. Die Trasse (Hauptachse des späteren Verkehrswegs) wird in der Regel aus einer Softwareumgebung für die Verkehrswegeplanung exportiert und an Dynamo in Form einer angenäherten 3D-Spline oder Polylinie übergeben. In Sonderfällen müssen spezielle Achsen aus bestehenden Geometrien abgeleitet, im Raum berechnet oder neu festgelegt werden. Mit dem Anfangs- und Endwert der Achskilometrierung aus den ersten zwei Spalten der Input-Tabelle können die jeweiligen Stationierungen des Anfangs- und Endquerschnittsprofils der Revit-Familie berechnet werden.

In einem zweiten Schritt muss zu jedem Punkt eine Ebene gefunden werden, dessen Normalenvektor durch die Tangente im jeweiligen Achspunkt (positiv in Richtung der Kilometrierung) erzeugt wird. Mit der entsprechenden Ausrichtung des Normalenvektors gegenüber des globalen Projektkoordinatensystems lassen sich die Winkel jedes einzelnen Querschnittsprofils genau bestimmen.

Über die Querschnitts- und VKL-Bezeichnung in der Input-Tabelle (Spalte vier und fünf) lassen sich die zu platzierenden Familientypen für jeden Bereich abgreifen. Dieser Familienname wird anschließend im Revit-Projekt gesucht. Die Suche ist jedoch nur erfolgreich, wenn genau die selbe Zeichenfolge in einer Typenbenennung gefunden wird. Aus diesem Grund ist eine einheitliche Namenskonvention der Modellfamilien für jedes Projekt unerlässlich. In diesem Beispiel wird der Typenname aus folgenden Textbestandteilen kombiniert und als Zeichenkette zusammengesetzt:

$RQ(\text{Input Querschnitt}) + \text{„VKL-“} + T(\text{Bereichsbeschreibung}) + \text{„-“} + 7A-3(\text{Input VKL})$
 $\cong \mathbf{RQ_VKL_T-7A-3}$

Diese Benennung bildet beispielsweise einen Abschlag im Regelquerschnitt mit der Vortriebsklasse 7A-3 ab.

Ist ein Familientyp mit der identischen Namensbezeichnung in der Projektumgebung gefunden, wird der Abschlag zwischen den zwei Punktkoordinaten auf der Trasse erstellt.

Die berechneten Winkel aus der Richtung des Normalenvektors werden anschließend an das Bauteilelement in Form einer Änderung des entsprechenden Parameterwerts für die Profildrehung übergeben.

Dieser Vorgang wird anschließend für alle geometrischen Komponenten der Bauteilfamilie ausgeführt, die entsprechend der räumlichen Lage auf der Achse ausgerichtet werden müssen. Für unterschiedliche Hauptachsen und Ausbruchquerschnitte wird jeweils ein separates Skript mit eigenen Eingangsdateien ausgeführt. Damit ist die Rechenzeit des Dynamo-Skripts deutlich kürzer und die Struktur bleibt aufgrund der abschnittswisen Betrachtung eines einheitlichen Ausbruchquerschnitts übersichtlicher. Außerdem muss bei einer notwendigen Anpassung nicht das gesamte Modell neu aufgeföhren werden, sondern es genügt den betroffenen Abschnitt zu berücksichtigen.

Die einzelnen Abschlagselemente lassen sich für eine bessere Übersichtlichkeit im Modell in farblicher Darstellung, unterschiedlich nach Vortriebsklassenbezeichnung, darstellen.

In Abbildung 2.6 ist ein Teilabschnitt eines möglichen Soll-Modells dargestellt.

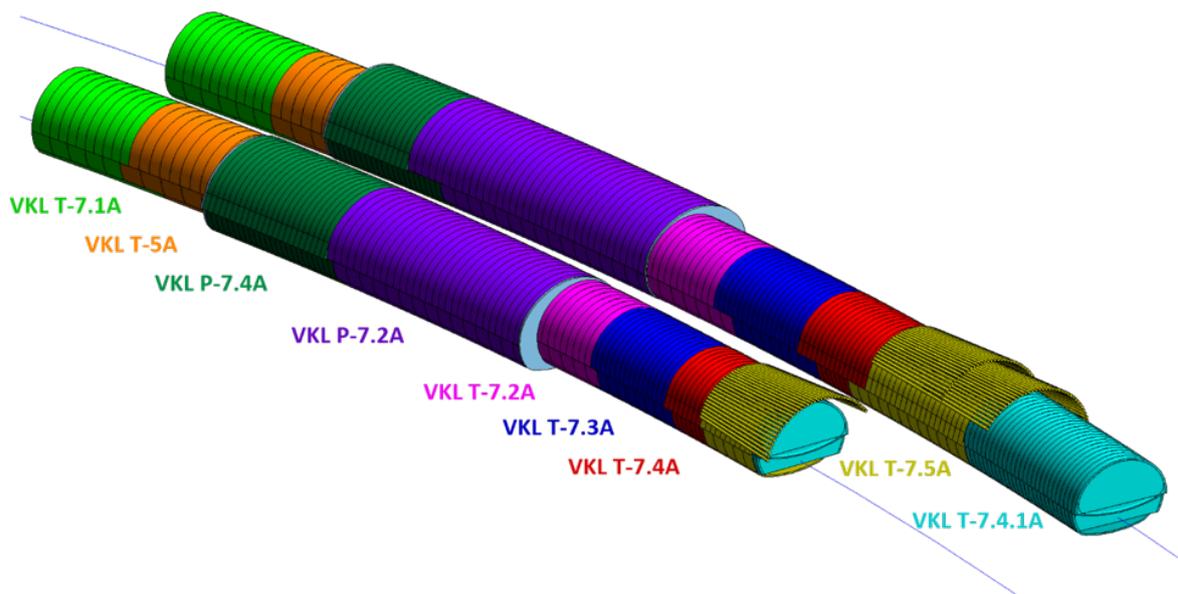


Abbildung 2.6: Visualisierung eines Teilabschnitts des Soll-Modells - Farben nach Vortriebsklassen

Die stationsbezogene Vortriebsklassenverteilung stammt aus einem etwa 200 Meter langen Bereich des geotechnischen Längsschnitts aus Abbildung 2.1. Außerdem wurde ein zweiter Längsschnitt für die Generierung einer parallel verlaufenden Tunnelröhre berücksichtigt.

Im mittleren Bereich des betrachteten Abschnitts wird eine Querschnittsaufweitung für die Pannenbucht erzeugt. Da das aufgeweitete Element andere Teilkreise im Querprofil und stark abweichende Bauteileigenschaften aufweist, wurde eine eigene Revit Familie verwendet. In der Vortriebsklassenbezeichnung ist diese Sonderfamilie durch ein „P“ für die Pannenbucht gekennzeichnet.

Außerdem wird bei der Vortriebsklasse „VKL T-7.5A“ ein seitlich orientierter Rohrschirm als vorausseilende Sicherung eingesetzt. Mit einer Rohrlänge von 15m und einem Übergreifen von fünf Metern muss der Rohrschirm bei einer Abschlagslänge von einem Meter jeden zehnten Abschlag gesetzt werden. Um diesen Sachverhalt für den Planungsprozess deutlich aufzeigen zu können, werden Rohrschirme in die Modellvisualisierung mit eingebunden. Somit ist auch eine visuelle Kontrolle möglich, ob die entsprechenden Parameterwerte richtig gesetzt sind.

2.2.5 Anpassungsmöglichkeiten im BIM Modell

In Kapitel 2.2.2 und 2.2.3 wurde bereits beim Erstellungsprozess der Revit-Familie darauf geachtet, dass möglichst alle Änderungsmöglichkeiten während der Planungs- oder Ausführungsphase im Modell stets abbildbar bleiben. Solange die Bauteilfamilie mit den richtigen Freiheitsgraden präzise ausgearbeitet wurde, lassen sich Anpassungen ohne Probleme im Nachhinein während der Projektumsetzungsphase realisieren.

Eine Modifizierung erfolgt entweder in den eingebauten Bauteilkomponenten über die Parametertabelle, oder in den geometrischen Kenngrößen über die Geometrieanpassung. Für beide Möglichkeiten soll im Folgenden anhand von ausgewählten Beispielen die Flexibilität der Revit-Bauteilfamilie aufgezeigt werden. Die Gesamtheit an Anpassungsmöglichkeiten ist allerdings um ein Vielfaches höher und erfordert im Verständnis intensive Fachkenntnisse im Prozess des Tunnelvortriebs, sodass nur die trivialsten Änderungen behandelt werden.

Sollte eine Änderung der stationsbezogenen Anordnung entlang der Trasse oder der Abschlagslänge innerhalb eines Abschlagelements erforderlich werden, muss die Eingabemaske überarbeitet und das Dynamo-Script erneut ausgeführt werden. Die bauteileigenen Attributwerte bleiben dabei erhalten, da jedes Modellelement über eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) einen Bezug zum Dynamo-Script hat.

Anpassung der Parameterwerte

Der genaue Aufbau der Parametertabelle und die damit verbundenen Anpassungen über die Auswahlmöglichkeiten oder Mengenänderungen wurde schon in Kapitel 2.2.3 thematisiert.

Die Abbildung 2.7 zeigt zusätzlich die Auswahlmöglichkeiten für andere Bauteilkomponenten

der Parametertabelle, die auf Grundlage eines typischen Leistungsverzeichnisses und den üblichen Bauteiltypen aus der Baupraxis abgeleitet wurden. Projektspezifische Anpassungen auf Basis des Leistungsverzeichnisses sind für die Definition der Listen unbedingt erforderlich.



Abbildung 2.7: Listenanpassungen in der Parametertabelle

Die Parameterwerte werden entweder automatisiert vom Erstellungsskript festgelegt (Stationierung, Abschlagsnummer, [...]), oder können durch eine manuelle Eingabe im entsprechenden Abschlag (Typen- oder Exemplarparameter) verändert werden.

Anpassung der Geometrie

Deutlich aufwändiger in der Implementierung ist die Änderung von geometrischen Eigenschaften einer Bauteilfamilie. Im Folgenden werden anhand von vier einfachen Beispielen die Möglichkeiten aufgezeigt und analysiert. Dabei findet jede geometrische Anpassung über die Parametereingabe oder geänderte Eintragungen in den Attributlisten statt.

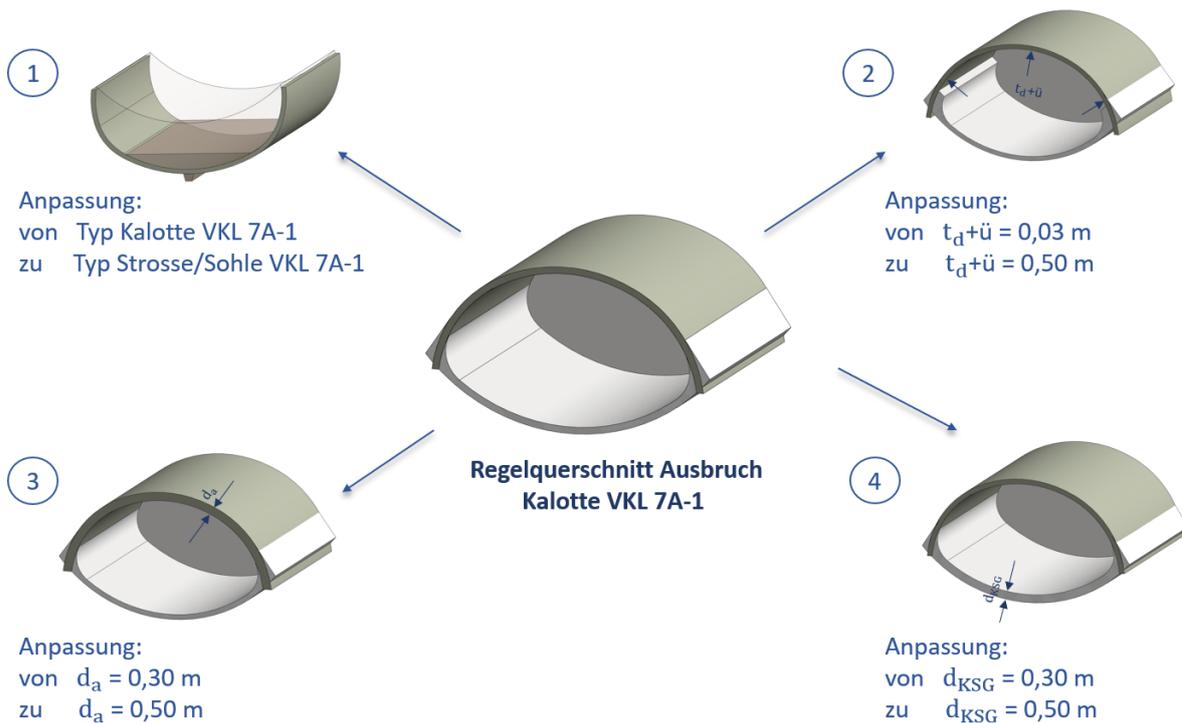


Abbildung 2.8: geometrische Anpassungsmöglichkeiten in der Revit Familie

Beispiel 1:

In dieser Anpassung wurde der Familientyp von „Kalotte VKL 7A-1“ zu „Strosse/Sohle VKL 7A-1“ geändert.

Für die Erstellung der einzelnen Familienexemplare muss es möglich sein, zwischen verschiedenen Ausbruchquerschnitten entsprechend der Eingabemaske in Abbildung 2.1 zu wechseln. Diese Änderung ist vielmehr für die automatische Modellgenerierung im Erstellungsskript von Bedeutung, als für Modifizierungen im bestehenden Modell.

Diese adaptive Komponente ist fast ausschließlich über die Modifizierung von sogenannten „Sichtbarkeitsparametern“ in der Revit-Familie realisiert.

Beispiel 2:

Hier wurden die Toleranzwerte $t_d + \ddot{u}$ (gemeinsames Maß nach Kapitel 2.2.1) von 3cm auf 50cm erhöht. Eine solch starke Erhöhung in den Toleranzwerten ist sehr unrealistisch. In der Regel liegt dieser Wert zwischen fünf und fünfzehn Zentimeter. Allerdings kann durch ein höheres Maß der geometrische Effekt eindeutiger aufgezeigt und visualisiert werden.

Ein Praxisbeispiel für eine notwendige Anpassung von $t_d + \ddot{u}$ wäre folgender Sachverhalt:

Im Projekt ist der Gebirgsdruck durch anders angetroffene physikalische Verhältnisse der Geologie deutlich erhöht. Aus diesem Grund kommt es zu größeren unvermeidbaren Verformungen die durch eine Überhöhung der Außenschale ausgeglichen werden

müssen.

Die Modifizierung des Parameters $t_d + \ddot{u}$ bewirkt eine konzentrische Aufweitung der gesamten Außenschale. Dabei muss sich der **KF** tangential zum Teilkreissegment mit verschieben. Außerdem weitet sich das Kalottensohlgewölbe (**KSG**) nach außen hin auf. Die Kreisradien des **KSG** bleiben allerdings erhalten. Die Ortsbrust muss sich über den gesamten resultierenden Querschnitt mit aufweiten.

Beispiel 3:

Bei dieser Anpassung wurde der Parameter d_a von 30cm auf 50cm erhöht. Diese Notwendigkeit besteht beispielsweise bei der Situation, dass erhöhte Sicherungsmaßnahmen aufgrund neuer physikalischer Erkenntnisse im Vortriebsverlauf erforderlich werden. Eine dickere Spritzbetonschale bewirkt einen stabileren Ausbau der Außenschale.

Geometrisch wird diese Modifizierung durch eine konzentrische Bewegung der bergseitigen Fläche der Außenschalenlaibung erzeugt. Der Kalottenfuß muss sich auch hier tangential zum Teilkreis der Laibung mit verformen.

Beispiel 4:

In einem letzten Beispiel wurde das Kalottensohlgewölbe (**KSG**) mit einer Dicke von 30cm auf 50cm durch eine Anpassung des Parameterwerts d_{KSG} verstärkt. Auch in diesem Fall kann eine ähnliche Praxissituation wie aus Beispiel 3 ausschlaggebend sein. Das Kalottensohlgewölbe bewirkt durch die Tragwirkung im Ringschluss in erster Linie eine erhöhte Stabilität gegenüber dem horizontal eingeleiteten Gebirgsdruck. Eine Veränderung von d_{KSG} kann bei unvorhersehbar anderen Verhältnissen erforderlich werden.

Verändert sich der untere Teilkreis des **KSG** im Querschnitt muss die Unterkante des Kalottenfußes und damit das gesamte **KF**-Volumen ebenfalls verändert werden.

Letztendlich muss jede denkbare Modifizierung der Bauteilfamilie im Zeitraum von Planung bis Ausführung möglich sein. Die ausgewählten Querschnitte eines Tunnelprojekts sind allerdings im Detail oft so komplex, dass nicht jeder beliebige Freiheitsgrad parametrisiert werden kann. Sollte dennoch der Fall eintreten, dass solch eine unvorhersehbare, nicht abbildbare Anpassung erforderlich wird, ist eine Modifizierung der geometrisch adaptiven Modellierung in der Regel mit sehr hohem Aufwand verbunden.

Da alle einzelnen Familienexemplare einer gemeinsamen Bauteilfamilie angehören, ist die individuellste Ausprägung eines Elements für die übergeordnete Revit-Familie maßgebend. Eine neue Bauteilfamilie aufgrund geänderter Anforderungen ist innerhalb eines Ausbruchquerschnitts in der Regel nicht zulässig und würde die systematische Datenstruktur verletzen.

Die Richtigkeit von geometrischen Änderungsprozessen kann gerade bei einer Kombination von mehreren Teilanpassungen nicht mehr auf die Schnelle nachvollzogen werden. Da aller-

dings aus den geometrischen Kenngrößen für jedes Element der Bauteilfamilie **Abrechnungsmengen** abgeleitet werden (Kapitel 4.2), muss eine einfache Überprüfung der Querschnitte für jeden Projektbeteiligten möglich sein. (König *et al.*, 2017, S.228)

Hierfür lässt sich ein zusätzlich konstruierter 2D-Kontrollquerschnitt an jeder Stationierung im 3D-Modell über die annähernd vertikale Fläche eines Abschlagelements legen. Durch die Überlagerung beider Geometrien und der anschließenden visuellen Kontrolle von Abmessungen, Flächen und Volumen kann so eine Überprüfung zu jedem Zeitpunkt und an jedem Abschlag erfolgen. Dieser Prozess wird in Abbildung 2.9 verdeutlicht und wurde auch so für die Kontrolle des Soll-Modells praktiziert. Der Kontrollquerschnitt wurde dabei als 2D-Datei im dwg-Format (natives Dateiformat für CAD-Anwendungen) in die Modellierungssoftware Revit in der 3D-Umgebung eingefügt. Da die Mengenbeschriftungen nur aus „eindimensionalen“ Geometriekurven bestehen, wird der Text nicht immer richtig abgebildet. Es reicht jedoch die Referenz auf die Bezugsmengen und die geometrischen Abmessungen aus, um die Plausibilitätsprüfung bewerten zu können.

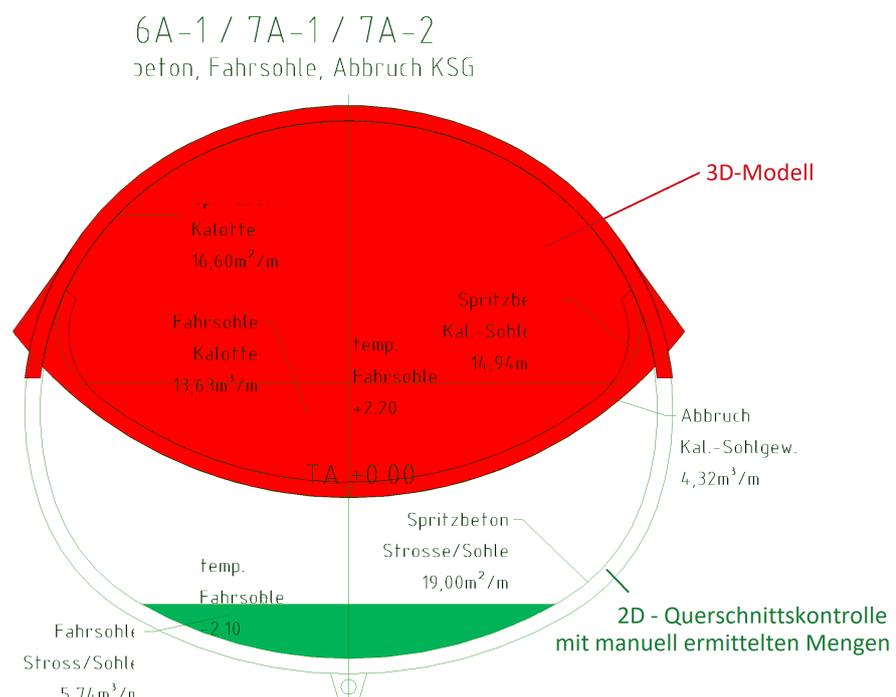


Abbildung 2.9: Kontrollquerschnitt für die Richtigkeitsprüfung des BIM-Modells

Kapitel 3

Erzeugung eines Ausführungsmodells

Im Zuge der Bauausführung wird vortriebsbegleitend ein weiteres BIM-Modell erzeugt. Der prognostizierte geologische Zustand unterscheidet sich in der Regel von den tatsächlich angetroffenen Verhältnissen. Aus diesem Grund werden begleitend zum Vortrieb sogenannte Ausbaufestlegungen für die nächsten Tunnelmeter festgelegt, in denen über die Verwendung bestimmter Vortriebsklassen im weiteren Verlauf entschieden wird (Wagner *et al.*, 2016). Die entworfenen Vortriebsklassen aus der Planung funktionieren dabei wie ein Werkzeugkasten, aus dem sich die Baustelle nach Erfordernissen bedienen kann. Dieser Prozess wird in Kapitel 3.2 noch genauer beleuchtet.

Die tatsächlich aufgefahrenen Vortriebsklassen mit entsprechenden Ausbruchs- und Sicherungsmittel werden in einem separaten BIM-Modell im sogenannten IST-Zustand dokumentiert. Das Modell soll dabei möglichst alle Bauteilkomponenten und Abrechnungsgrößen des tatsächlichen Tunnelvortriebs parallel zum Baubetrieb erfassen. Allerdings unterscheidet sich die Datenbankstruktur der Projektausführung von der der Planung an einigen Stellen, da entweder zusätzliche Informationen im Modell enthalten sein müssen, oder die Informationen in einer anderen Art und Weise abgebildet werden müssen (Schreyer, 2016). Die erarbeiteten Revit-Familien aus Kapitel 2 bleiben allerdings erhalten, da abweichende Geometriezustände durch Parameteranpassungen der adaptiven Bauteilkomponenten berücksichtigt und zusätzliche Informationen durch Modifizierungen angepasst werden können.

In der Bauindustrie wurde der Mehrwert von BIM-Methoden während der Ausführungsphase durchaus schon erkannt. Das modellbasierte Reporting in Kombination mit einem baubegleitenden Soll-Ist-Vergleich (König *et al.*, 2017, S.229) oder die mobile Bereitstellung von Modelldaten auf der Baustelle (Schreyer, 2016, S.43) gehören zu den Kernvorteilen der modellbasierten Arbeitsweise während der Bauausführung im Tunnelbau. Allerdings wurde bisher im bergmännischen Tunnelvortrieb die tatsächliche Anwendung solcher Methoden in

der Praxis nur bedingt untersucht. Die genaue Herangehensweise und Implementierung im Ausführungsmodell richtet sich aus diesem Grund nach den Bedürfnissen und Erfahrungen im täglichen Baubetrieb.

Die Generierung des IST-Modells erfordert einen intensiven Austausch mit der Baustelle. Auf der einen Seite müssen geprüfte Protokolle umgehend in digitaler Form für die Modellerstellung vorliegen. Andererseits dient das Modell in erster Linie der Mengenermittlung und ist damit fester Bestandteil der monatlichen Abrechnung. Auf dieser Grundlage müssen Abrechnungsvereinbarungen und Abweichungen zwischen Modell und Baubetrieb umgehend kommuniziert werden.

Für die bessere Zusammenarbeit wurde deshalb folgender BIM-Ausführungsplan entworfen. Die Vorgänge sind dabei von links nach rechts logisch aufeinander aufbauend gegliedert. Die vertikale Unterteilung in Auftraggeber, BIM-Spezialist, Bauüberwachung und Auftragnehmer geben die Zuständigkeiten für die Teilvorgänge vor. Der Vorgangsinhalt ist dabei weitestgehend selbsterklärend oder wird im Zuge dieser Arbeit noch genauer erläutert. Der BIM-Ausführungsplan (BEP) während dem Bauprojekt dient damit als Leitgrafik für alle Arbeitsschritte, die das IST-Modell betreffen. Er bildet die Datengenerierung und den -transfer zwischen allen Projektbeteiligten während der Ausführungsphase ab.

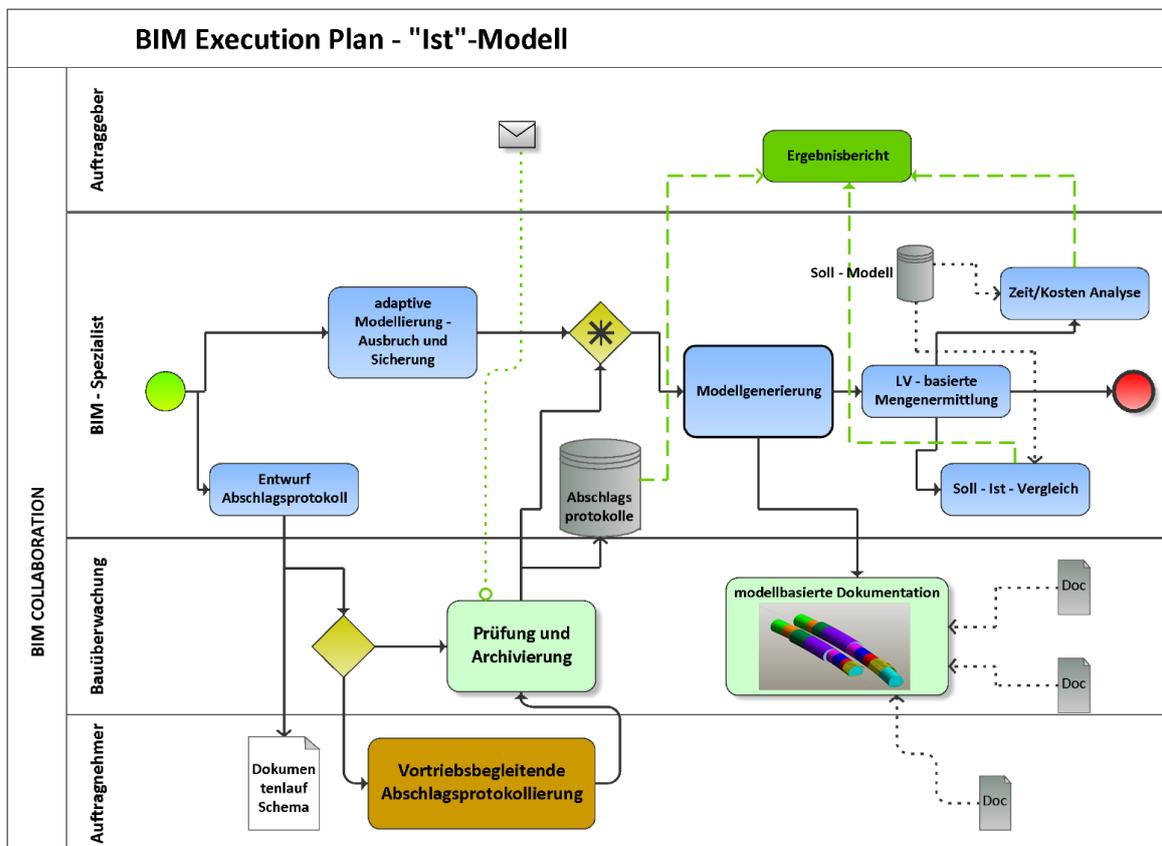


Abbildung 3.1: BEP für die Zusammenarbeit während der Projektausführung

Im folgenden Kapitel sollen die notwendigen Veränderungen in der grundlegenden Datenbankstruktur beschrieben werden. Außerdem wird ein System vorgestellt, wie die dokumentierten Daten auf der Baustelle direkt für die BIM-Modellgenerierung verwendet werden können.

3.1 Modifizierung der Datenbankgrundlage

Für die Erzeugung eines IST-Modells müssen in erster Linie die Parameter der Revit-Familien angepasst werden. Oberste Priorität ist dabei jedoch, dass die grundlegende Struktur und die Parameternamen in der Datenbank aus dem SOLL-Modell erhalten bleiben. In Folgeapplikationen können mit diesem Grundsatz alle Vortriebsmodelle in der Projektumgebung direkt miteinander verglichen und analysiert werden.

Hinzufügen von Parametern

Auf Grundlage des Leistungsverzeichnisses und der Planung sind in der Regel alle Einbauteile fest definiert, die im Projekt zum Einsatz kommen können. Demnach werden beispielsweise für einen Anker verschiedene Typen in Kombination mit charakteristischen Längen für das Bauvorhaben ausgeschrieben. Diese Bauteilvarianten werden, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, mit Auswahllisten im Prognosemodell abgebildet. Die Praxis zeigt jedoch, dass die ausgeschrieben Einbauteile entweder für die Projektrealisierung nicht ausreichen können oder es für die tatsächlich angetroffenen Umstände vorteilhaftere Alternativen geben kann. Für die Erzeugung des IST-Modells müssen demnach eventuell die Auswahllisten mit weiteren Optionen ergänzt werden.

Zusätzlich gibt es im SOLL-Modell einige Abrechnungsmengen, die auf Basis einer anderen Mengenposition nur prozentual abgeschätzt werden. Diese Prognosen müssen während der Bauausführung durch tatsächlich dokumentierte Mengen ersetzt werden. Für die Abbildung im Modell werden somit zusätzliche Parameter in der Revit-Familie benötigt.

Dieser Sachverhalt wird beispielhaft am Mehrausbruch im Zuge der Vortriebsarbeiten erklärt. Der geologisch bedingte Mehrausbruch ist das unvermeidbare Zusatzmaterial, das die Baufirma über ein bestimmtes Toleranzmaß hinaus zu viel ausbricht. Der Grund hierfür kann unter anderem in der geologischen Zusammensetzung des Gesteinsmaterials und dessen Bruchverhalten liegen (Müller-Salzburg, 2018, S.434f.).

In der Planung wird dieses Volumen je nach Homogenbereich und Vortriebsklasse prozentual zum Ausbruchsvolumen einer Bodenart abgeschätzt. Demnach ist kein eigener Parameter für die Erfassung im Modell notwendig. In der Ausführung wird der geologisch bedingte Mehrausbruch jedoch direkt als Feldaufmaß erfasst und dokumentiert (Müller-Salzburg, 2018, S.427-448). Da diese Menge in einer separaten Leistungsposition vergütet wird, ist sie in das

Abrechnungsmodell mit einzubeziehen und damit ein zusätzlicher Parameter im Modell zu erzeugen.

Eine Ergänzung von Informationen muss ebenfalls für die folgenden Themenbereiche erfolgen:

- Zeitliche Dokumentation des Vortriebs
- Bezug zu ausführungsrelevanten Dokumenten
- Außerplanliche Leistungen
- Wasserandrang
- Entwässerungsbohrungen
- Überprofil im Spritzbeton

Für besondere Vorkommnisse werden außerdem Zusatzbemerkungen in der Protokollierung vermerkt. Das zentrale BIM-Modell soll dem Anspruch gerecht werden, alle relevanten Informationen transparent und gebündelt für jedes Bauteil zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grund werden auch zusätzliche Anmerkungen in die Datenbank integriert. Für diesen Zweck wird ein eigener Parameter „Bemerkungen“ für jedes Bauteil vergeben, der diese relevanten Informationen speichert.

Änderung der Parametereigenschaften

Im SOLL-Modell wurden die Familienparameter überwiegend als Typenparameter angelegt, da sie für eine bestimmte Vortriebsklasse immer den selben Wert annehmen und somit den Vortriebsklassentyp charakterisieren. Im IST-Modell kann diese eindeutige Typenbeziehung nicht mehr sichergestellt werden. Denn ein einheitlicher Vortriebsklassentyp erhält in der Projektausführung nicht immer die selben Typen und Anzahlen der Einbauteile. Die tatsächlich ausgeführten Ausbruchs- und Sicherungsmittel werden in der Ausbaufestlegung abgestimmt oder direkt im Vortriebsprozess bei außergewöhnlichen Situationen nachgerüstet. Die Vortriebsklassenbezeichnung ändert sich allerdings nur bei eklatanten Unterschieden zur Ausführungsplanung. Um für jedes einzelne Modellelement die Informationen flexibel vergeben zu können, müssen die Eigenschaften vieler Familienparameter von Typen- zu Exemplarparametern modifiziert werden.

Im Folgenden wird beispielhaft eine Auswahl von anzupassenden Parametern aus [Abbildung 2.3](#) mit kurzer Begründung der Modifikation von Typen- zu Exemplarparameter zusammengestellt.

00Deformationstoleranz&Ueberhoehung_(td+ue): Die Überhöhungen und Toleranzen können sich im Vortriebsverlauf **VKL**-unabhängig aufgrund der erwähnten Ursachen aus Kapitel 2.2.1 ändern.

07_Spiessschirm_Typ1: Im Zuge der Ausbaufestlegung kann die Verwendung von anderen Spießen beschlossen werden. Für den vorliegenden Baugrund ist beispielsweise ein anderer Typ logistisch oder bautechnisch von Vorteil. Der Bauteiltyp kann sich demnach innerhalb einer Vortriebsklasse ändern.

07_Spiessschirm_Typ1_Anzahl: Die Spieße dienen im Tunnelvortrieb der Voraussicherung und damit der Sicherung des Arbeitsraums. Sollten aufgrund geologischer Begebenheiten erhöhte Maßnahmen als geplant erforderlich werden, kann die Anzahl der Spieße in den Abschlügen variieren.

4Vortriebsart: Für die Vortriebsart können im Verlauf des tatsächlichen Tunnelvortriebs unterschiedliche Lösemechanismen zum Einsatz kommen. Je nach Baugrund sind die Verfahren Baggervortrieb, Mixed-Face, Sprengvortrieb und Teilschnitt-/Fräsvortrieb im bergmännischen Bereich möglich und können sich innerhalb einer Vortriebsklasse unterscheiden (Thuro & Plinninger, 2001).

3.2 Datenerfassung parallel zum Tunnelvortrieb

Während der Ausführung des Tunnelprojekts werden in der Regel alle Entscheidungsprozesse und Bauvorgänge sehr genau dokumentiert. Gerade im Tunnelvortrieb kommt es immer wieder zu unvorhersehbaren Ereignissen, auf die umgehend reagiert werden muss. Beim Antreffen von anderen geologischen Verhältnissen müssen beispielsweise unter Umständen der Baubetrieb und die bisher verwendeten Ressourcenarten und Maschinen angepasst werden. Die zu verwendenden Ausbruchs- und Sicherungsmittel werden während des Tunnelvortriebs abschnittsweise in einer sogenannten Ausbaufestlegung definiert.

Allerdings kann sich jeder Abschlag innerhalb eines Homogenbereichs durch außergewöhnliche Anforderungen nochmals vom Regelvortrieb unterscheiden. Aus diesem Grund wird gesondert für jeden Abschlag ein sogenanntes Abschlagsprotokoll erstellt (Judmaier & Zsifkovits, 2014, S.107f.). Der Inhalt dieses Protokolls wird mit Vertretern des Auftraggeber (**AG**) und Auftragnehmer (**AN**) abgestimmt und dient als Basis für die Abrechnung der Ausbruchs- und Sicherungsmittel.

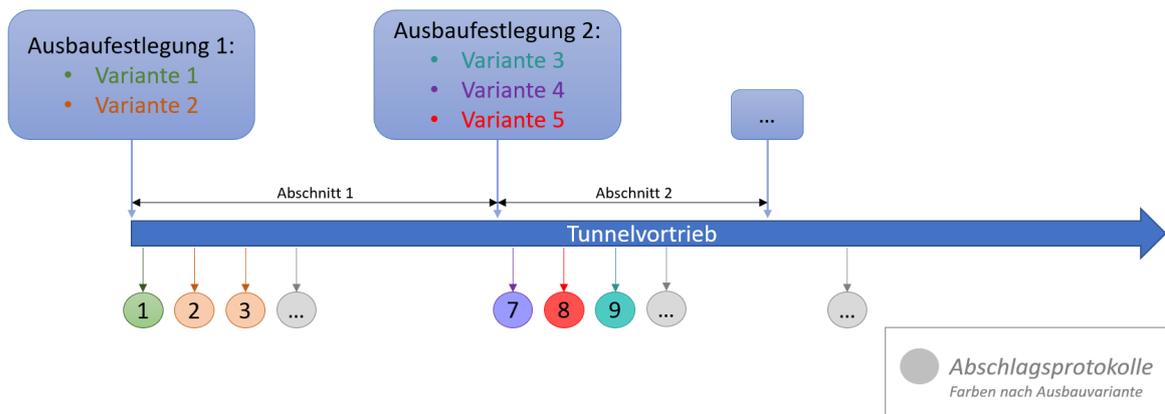


Abbildung 3.2: Wahl der Vortriebsklassen im Tunnelbetrieb

In Abbildung 3.2 wird dieser Prozess nochmals genauer dargestellt. In der Ausbaufestlegung können mehrere Möglichkeiten an Vortriebsklassen und spezifischen Sondervereinbarungen für den kommenden Abschnitt im Vortriebsverlauf vereinbart werden. In der Regel sind in dieser Abstimmung die entscheidenden Experten des Auftraggebers, Auftragnehmers, Bauüberwachung und gegebenenfalls Weitere vertreten. Die einzelnen Varianten der Ausbaufestlegung können von der Baufirma nach gegebenen Erfordernissen für den nächsten Abschnitt verwendet und realisiert werden. Sobald die Ausbaufestlegung aufgrund sich geänderter Verhältnisse nicht mehr zutrifft oder neue Absprachen und Anweisungen erforderlich werden, wird eine neue Ausbaufestlegung beschlossen. Die genaue Dokumentation und Abrechnungsgrundlage erfolgt allerdings nach den Abschlagsprotokollen die gesondert für jeden Abschlag angefertigt werden müssen. Durch die Unterschrift von Auftragnehmer und Auftraggeber (in der Regel stellvertretend durch die Bauüberwachung) wird das Dokument vertragsbindend für die Abrechnung.

Für einen Tunnel von einem Kilometer Länge entstehen bei Vortriebsklassen mit kleineren Abschlagslängen schon mal weit mehr als tausend Abschlagsprotokolle. Diese werden im herkömmlichen Prozess auf einer Papiervorlage ausgefüllt und anschließend, nach einem Prüflauf durch mehrere Instanzen, in einem Ordner abgeheftet. Für die monatliche Abrechnung werden dann die händischen Eintragungen in eine Excel-Liste überführt und die Gesamtmenge berechnet.

Diese Prozesse sind sehr arbeitsintensiv und fehleranfällig. Die Durchgängigkeit und Transparenz der Informationen geht bei händischen Übertragungen verloren. Zudem stehen die Informationen den Projektverantwortlichen/ -beteiligten erst sehr spät zur Verfügung (Judmaier & Zsifkovits, 2014, S.103-109).

Die Datenbasis für das BIM-Modell bilden diese Abschlagsprotokolle. Im Zuge dieser Arbeit wurde aus diesem Grund ein digitales Protokoll im Portable Document Format ((trans)portales Dokumentenformat) (PDF) angefertigt.

Im Zuge eines Pilotversuchs wurde an einigen Baustellen ebenfalls die Einführung eines solchen digitalen Abschlagprotokolls untersucht (Judmaier & Zsifkovits, 2014, S.103-109). Für eine Linienbaustelle, dessen Teilprozesse sich ständig wiederholen, ist die Entwicklung von standardisierten, digitalen Dokumentationsstrukturen unumgänglich. Neben der Reduktion von Fehleranfälligkeiten im Dokument ist der größte Mehrwert „die zeitnahe und medienbruchfreie Bereitstellung von [b]aubetriebs- und logistikrelevanten Daten“. (Judmaier & Zsifkovits, 2014, S.108) Allerdings sind digitale Standardprozesse im Tunnelbau noch nicht weit verbreitet (Judmaier & Zsifkovits, 2014, S.109).

Ein beispielhaft ausgefülltes Abschlagsprotokoll auf Basis der vorgestellten Datenbankgrundlage ist in [Abbildung 3.3](#) dargestellt.

Abschlagsprotokoll		Datum:	24/03/19	If. Nr.:	15	
Ausbaufestlegungs-Nr.:		N-K. 003		Datum Ausbaufestlegung:		20/03/19
Grunddaten:	Angriffsort:	Nord		Bearbeitungsdatum:		26/03/19
	Tunnelröhre:	RQ		Vortriebsklasse:		6A-1
	Querschnitt:	Kalotte		Abschlagslänge:		1,20 m
von Tunnelmeter:		20,10 m	bis	21,30 m	t _a + ü:	8,0 cm
Beschreibung		Bemerkung/Hinweise				
Spritzbeton:	30 cm	Ulmenstiel:			cm	
Bewehrung:	1.Lage bergseitig:	Q257A				
	2.Lage luftseitig:	Q257A				
Ausbaubogen:	Typ:	3-Gurt Gitterträger 145/20/30				
	Typ Ulmenstiel:					
Radialanker:	Typ:	Gebirgsanker L = 6,0 m	2 St.			
Vorauselende Sicherung:	Spießschirm:	VS L = 4,0m	43 St.		Rammvollspieße R32	
	Pfändbleche:	-	0 St.			
	Ortsbrustanker setzen:	-	0 St.			
	Rohrschirm:	-	0 St.			
Ortsbrust:	Spritzbeton:	5 cm				
	Bewehrung:	-				
	Lastverteilungsschienen:		0 St.			
	Teilflächen:		2			
Kalottenfußverbreiterung:	Kalottenfuß:	<input checked="" type="checkbox"/>				
	Typ:	50 cm				
Temporäres Kalottensohlgewölbe (KSG):	Kalottensohlgewölbe:		<input checked="" type="checkbox"/>			
	Spritzbetondicke:		30 cm			
	1.Lage bergseitig:	Q257A				
	2.Lage luftseitig:	Q257A				
	Länge KSG:		1,20 m			
Wasserhaltung:	Baudrainage:					
	Entwässerungsrohr:		-		m	
<input type="checkbox"/> Zusatzmengen:	Typ 1:				St.	
	Typ 2:				St.	
Bemerkungen:						
3x Messbolzen setzen						
Unterschriften:						
Auftragnehmer			Auftraggeber - Bauüberwachung:			
Ort / Datum / Unterschrift			Ort / Datum / Unterschrift			

Version 1.5

Abbildung 3.3: Digitales Abschlagsprotokoll am Beispiel Abschlag Nr. 15

Das Protokoll wurde mit der Software „Adobe Acrobat DC Pro“ erstellt. Hier besteht die Möglichkeit, mit der Skriptsprache „JavaScript“ individuelle Eingabe- und Interaktionsfelder zu erstellen und miteinander zu verlinken. Da dieses Dokument auf der Baustelle direkt vom Baupersonal ausgefüllt wird, sollte es schnelle, fehlerfreie und einfache Eingabestrukturen ermöglichen.

Eine Schrift in blauer Farbe kennzeichnet eine Nutzereingabe. Allerdings sind die Textfelder in der Regel nicht händisch einzugeben, sondern es kann anhand von Auswahllisten das zutreffende Element ausgewählt werden. Ein „-“ bedeutet dabei, dass das entsprechende Bauteil in dem protokollierten Abschlag nicht enthalten ist. Die Auswahllisten sind genau so gestaltet, dass sie den einzelnen Bauteilbeschreibungen im Leistungsverzeichnis entsprechen. Damit ist sichergestellt, dass auch nur Elemente in Rechnung gestellt werden können, zu denen eine vertragliche Abrechnungs- und Preisvereinbarung existiert. Sollte der Fall eintreten, dass ein neues Bauteil für die Projektrealisierung benötigt wird, kann die Auswahlliste von Seiten des Auftraggebers erweitert werden. Auf diese Weise erlangen alle Beteiligten frühzeitig Kenntnis über geänderte Einbauteile.

Für die einzutragenden Zahlenwerte gibt es entweder auch Auswahllisten, oder die Zellen werden „händisch“ befüllt. Im Bearbeitungsprozess erfolgt allerdings umgehend eine Validierung der Eintragungen. Beispielsweise kann die Zelle „von Tunnelmeter“ nur mit einer Stationierung befüllt werden, die auch im Bereich des Tunnels liegt. Der Wert „Tunnelmeter bis“ wird dann automatisch anhand der Anfangsstationierung und der Abschlagslänge berechnet.

Ein weiteres Beispiel ist das Toleranzmaß „ $t_d + \ddot{u}$ “, das wie bereits in Kapitel 2.2.1 beschrieben mit jedem Abschlag variieren kann. Hier wurde ein zu prüfender Bereich von 5-15cm in der Zelle hinterlegt. Wird eine Zahl eingegeben, die außerhalb dieser Grenzen liegt, erscheint eine Fehlermeldung und der Wert wird wieder zurückgesetzt.

Lediglich die Zellen im Bereich „Bemerkung/Hinweise“ und „Bemerkungen“ unterliegen keinen weiteren Prüfregelein. Allerdings werden die hier eingefügten Metadaten auch nicht für die Abrechnung weiterverwendet. Sie bieten nur die Möglichkeit einer ausführlicheren Dokumentation bei Sondervorkommnissen.

Zusätzlich sind im Dokument Regeln für das Erscheinen einer Eingabemöglichkeit definiert. Beispielsweise kann das Feld „Baudrainage“ nur existieren, wenn bei den Grunddaten der Querschnitt „Strosse/Sohle“ ausgewählt ist. Oder im Bereich „Ortsbrust“ kann nur eine Bewehrung eingetragen werden, wenn eine Spritzbetondicke $>0\text{cm}$ existiert.

Alle Validierungsmechanismen dienen dazu, potenzielle Eingabefehler zu verhindern. Allerdings darf nicht außer Acht gelassen werden, dass das Protokoll dafür gedacht ist, die eingebauten Komponenten für jeden Abschlag festzuhalten und zu überprüfen. Würde sich das Protokoll schon „von alleine“ nach den bauvertraglichen Regeln einer geplanten Vortriebs-

klasse oder nach den Entscheidungen in der Ausbaufestlegung ausfüllen, ginge die Kontrolle und damit die Dokumentation aller tatsächlich eingebauten Bauteilkomponenten verloren.

Ein besonderes Feld ist die optionale Eingabe von „Zusatzmengen“ im unteren Teil des Abschlagprotokolls. Dieser Abschnitt wurde zusätzlich in die Protokollierung mit einbezogen, falls mehrere Typen des gleichen Bauteilelements innerhalb eines Abschlags eingebaut werden. Eine Erfassung von mehreren Einbauteilen einer Funktion ist mit den Standardzellen nämlich nicht möglich.

Beispielsweise könnten in einem Abschlag zwei verschiedene Radialanker eingebaut werden - fünf Stück vom Typ „Gebirgsanker L = 6,0 m“ und zwei Stück vom Typ „Gebirgsanker L = 4,0 m“. Dieses Ereignis tritt in der Praxis zwar nur sehr selten auf, muss aber trotzdem im Abschlagsprotokoll abbildbar sein. In einem solchen Fall aktiviert man das Kästchen für die Zusatzmengen. Anschließend lässt sich der zusätzliche Bauteiltyp sowie die verwendete Stückzahl eintragen.

Die Anzahl von zwei Zusatzmengen sollte in der Regel ausreichen. Treten dennoch im Zuge eines Spezialfalls mehrere Ausnahmen der verwendeten Bauteile ein, muss die Tabellenstruktur an dieser Stelle erweitert werden.

Dokumentenlaufschema

Im Bereich „Unterschriften“ wird das Dokument von Seiten des Auftragnehmers und des Auftraggebers/Bauüberwachung digital unterschrieben. Um einen reibungslosen Kontrolllauf zwischen den beiden Parteien zu schaffen, muss für jedes Projekt ein automatisiertes Dokumentenlaufschema in Abstimmung mit der Baustelle entworfen und abgesprochen werden.

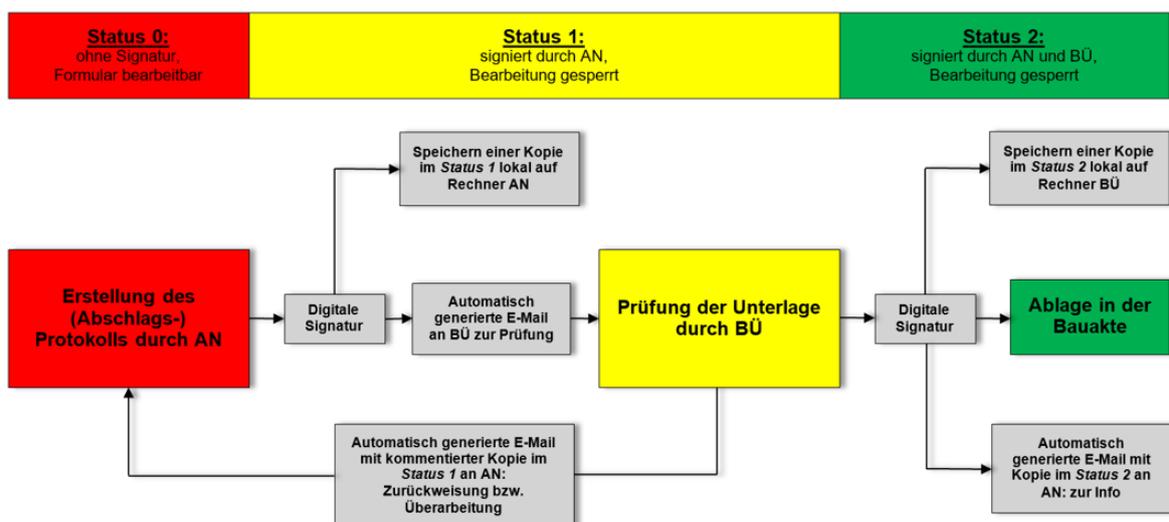


Abbildung 3.4: Dokumentenlauf Schema

Die Abbildung 3.4 zeigt ein mögliches Ablaufschema, wie die Eintragungen geprüft und gegebenenfalls korrigiert werden können.

Unterschreibt ein Vertreter der Ausführungsfirma (AN) das Formular, werden umgehend alle Eintragungsfelder gesperrt. Durch eine automatische und einheitliche Dateibenennung, die durch eine Kombination der eingetragenen Metadaten erstellt wird, kann der Nutzer die Datei in einem ausgewählten Ordner speichern. Anschließend erscheint eine Schaltfläche, mit der er die Datei, in Form einer automatisch generierten E-mail, an den Auftraggeber/-Bauüberwachung zur Überprüfung und Kenntnisnahme versenden kann.

Der Auftraggeber/Bauüberwachung hat nun die Möglichkeit, Korrekturen vorzunehmen, oder kann bei Richtigkeit aller Eintragungen durch seine Unterschrift das Dokument ebenfalls digital unterschreiben.

Stimmen die Daten nicht mit der Praxis überein oder wurden falsch eingetragen, kann er das nicht direkt im Dokument ändern, da die Felder durch die Unterschrift des Auftragnehmers gesperrt sind. Allerdings lassen sich über Notizen an den Eintragungsfeldern Unstimmigkeiten kommunizieren. Über eine weitere Schaltfläche lässt sich das Dokument wieder zurück zum Auftragnehmer mit einer automatisch generierten Email senden. Dieser kann nun seine Unterschrift durch ein individuelles Passwort entfernen, womit alle Felder wieder bearbeitbar werden. Danach beginnt der Prozess im Prinzip von Neuem.

Unterschreibt der Auftraggeber/Bauüberwachung nach Richtigkeit aller eingetragenen Werte das Dokument, wird es einerseits zum Auftragnehmer zur Kenntnisnahme zurückgesendet. Andererseits findet eine automatische Speicherung auf einem gemeinsamen Server für die Ablage in der Bauakte statt.

Ab diesem Zeitpunkt ist das Protokoll von allen Parteien vertragsgültig abgesegnet und kann nicht mehr verändert werden. Allerdings lassen sich die Metadaten von der Gesamtheit aller Abschlagsprotokolle in Form einer geordneten Tabellenform zu jeder Zeit auslesen.

Diese Tabelle bildet den wichtigsten Bestandteil der Eingangsdaten für die automatische Modellgenerierung.

3.3 Automatische Modellgenerierung auf Grundlage des Abschlagsprotokolls

Auf Basis der zahlreichen Abschlagsprotokolle kann nun zu jedem Zeitpunkt im Vortriebsprozess ein Bestandsmodell erzeugt werden. Dabei entspricht ein Abschlagsprotokoll genau einer Bauteilgruppe in der Modellierungssoftware. Da die Geometrien und Informationen im Modell nach den tatsächlich erstellten Eigenschaften der einzelnen Bauteilkomponenten erzeugt werden, kann von einem „IST-Modell“ gesprochen werden.

Für die automatische Generierung müssen zu Beginn alle Metadaten der abzubildenden Abschlagsprotokolle in einer Tabelle zusammengeführt werden. Dieser Vorgang ist mit mehreren Softwarelösungen für die PDF-Bearbeitung mit einem geringen Zeitaufwand möglich.

Name_Abschlagsprotokoll	Datum_des Abschlags	If Nr	Ausbau festlegung	Angriffs ort	Tunnel röhre	VKL	Quersch nitt	Abschl ags länge	TM_ von	TM_ bis	td_ ue	da
Nord_1_Kalotte_4.5_m.pdf	16.03.2019	1	N-K. 002	Nord	RQ	6A-1	Kalotte	0,55	3,95	4,5	8	30
Nord_2_Kalotte_5.7_m.pdf	17.03.2019	2	N-K. 002	Nord	RQ	6A-1	Kalotte	1,2	4,5	5,7	8	30
Nord_3_Kalotte_6.9_m.pdf	17.03.2019	3	N-K. 002	Nord	RQ	6A-1	Kalotte	1,2	5,7	6,9	8	30
Nord_4_Kalotte_8.1_m.pdf	17.03.2019	4	N-K. 002	Nord	RQ	6A-1	Kalotte	1,2	6,9	8,1	8	30
Nord_5_Kalotte_9.3_m.pdf	18.03.2019	5	N-K. 002	Nord	RQ	6A-1	Kalotte	1,2	8,1	9,3	8	30

Tabelle 3.1: Dokumentenlauf Schema

In Abbildung 3.1 ist ein kleiner Ausschnitt der gesamten Tabellenstruktur für die ersten fünf Abschlagsprotokolle eines Beispielprojekts dargestellt.

Jede Zeile bildet die Metadaten eines Protokolldokuments ab. Die einzelnen Spalten werden auf Grundlage der Bereiche für die Eingabemöglichkeiten innerhalb des Protokolls generiert. Die Spaltenüberschrift trägt dabei den Namen der jeweiligen Eingabezeile im PDF-Dokument.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass solch eine Datenzusammenstellung für den Baubetrieb ohnehin von großer Wichtigkeit ist. Für die Dokumentation und Rechnungsstellung werden Tabellen mit genau dieser Struktur erarbeitet und eingereicht, indem zum Beispiel die in Papierform vorliegenden Abschlagsdokumentationen von Hand in ein digitales Format überführt werden. Wie bereits angesprochen, sind die Anfälligkeit für Tippfehler oder der verloren gegangene Bezug zum eigentlichen Abschlagsprotokoll dabei nicht selten Schwierigkeiten in der Qualitätssicherung und im Management des Bauprojekts. Mit der Digitalisierung und Automatisierung dieses Arbeitsablaufs wird die Durchgängigkeit und Transparenz der Daten deutlich verbessert.

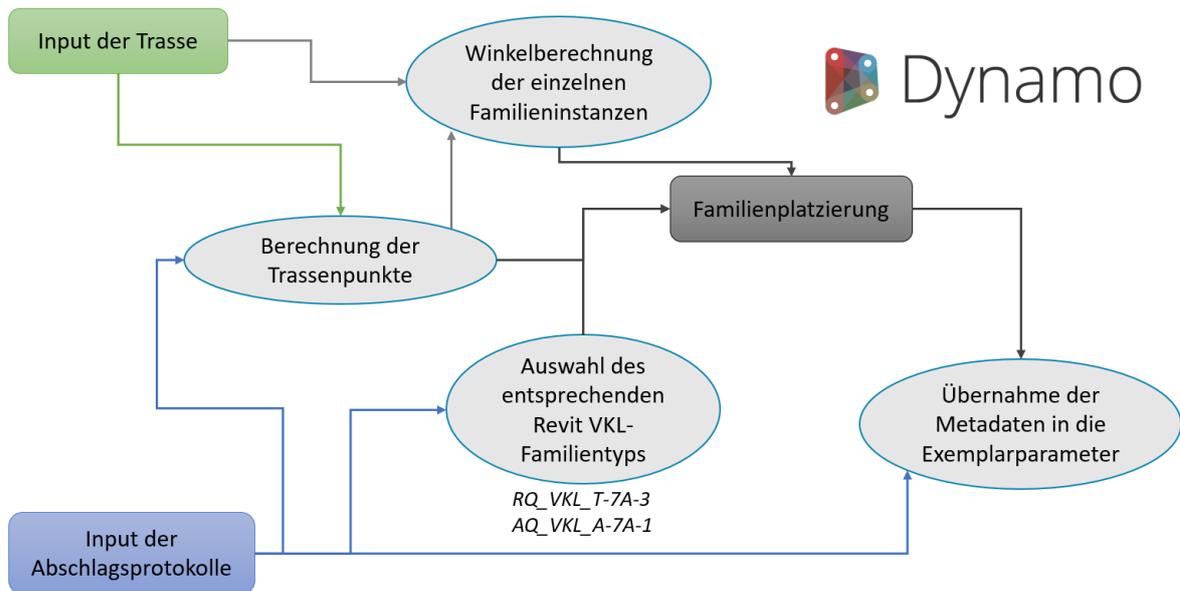


Abbildung 3.5: Flow-Chart des Erstellungsscripts in Dynamo für das Ist-Modell

Das Flussdiagramm 3.5 beschreibt die Vorgehensweise im Dynamo-Skript für die automatische Modellgenerierung des Ist-Zustandes auf Basis der Protokoll Daten.

Bei der Erzeugung des SOLL-Modells kamen alle notwendigen Informationen für die Generierung einer Abschlagsgeometrie in Revit aus der Eingabetabelle 2.1. Diese Eingangsdaten werden nun durch bestimmte Zellen im Abschlagsprotokoll ersetzt.

Aus den Grunddaten im Abschlagsprotokoll können die Informationen für die Bestimmung des Familientyps in Revit gewonnen werden. Durch die Kombination der Werte in den Zellen „Tunnelröhre“, „Querschnitt“ und „Vortriebsklasse“ kann eine Zeichenkette erzeugt werden, die mit einer Familienbezeichnung aus Revit übereinstimmt. Im Beispiel des Abschlagsprotokolls aus Abbildung 3.3 würde mit der Zeichenkette „Kalotte_VKL_RQ 6A-1“ der entsprechende Familientyp in Revit gefunden werden.

Über die Zellen „von Tunnelmeter“ und „bis Tunnelmeter“ können die Anfangs- und Endstationierungspunkte auf der Tunnelachse berechnet werden.

Ansonsten bleibt der Berechnungsprozess bis zur Familienplatzierung identisch mit den Schritten aus Kapitel 2.2.4.

Zusätzlich werden die in Kapitel 3.1 erzeugten Exemplarparameter mit den restlichen Zellenwerten des Abschlagsprotokolls befüllt. Dabei stimmt die Bezeichnung der Zelle aus dem PDF-Formular mit dem Parameternamen aus der Revit-Datenbank überein. Über diese „eins zu eins“-Beziehung lässt sich eine Eintragung im Protokoll eindeutig in das Ist-Modell überführen.

Die Eintragungen aus dem Protokoll werden nicht frei übernommen, sondern anhand der Freiheitsgrade im Bauvertrag und der Planung auf Plausibilität in der Modellumgebung überprüft. Sollte ein Wert nicht den Regeln im Modell entsprechen, wird entweder von Dy-

namo ein Übertragungsfehler, oder von Revit ein Geometrie-/Datenbankfehler gemeldet. Folgendes Szenario zeigt eine mögliche Unstimmigkeit bei der Modellgenerierung auf Grundlage der Baustellenprotokolle:

Im Abschlagsprotokoll wurde die Zelle „Zusatzmengen - Typ 1“ um eine neue Eingabemöglichkeit „Baustahlmatten: Schubzulage KSG“ seitens der Bauüberwachung erweitert und der Wert eingetragen. Bei der Modellgenerierung wird beim Übertragungsprozess im gleichnamigen Revit-Attribut versucht, einen Listeneintrag im Bereich „Baustahlmatten“ mit dem Namen „Schubzulage KSG“ zu finden. Da dieses Bauteil im Bauvertrag und in der Planung nicht enthalten ist, fehlt dieser Wert im Modell und es kommt zu einer Fehlermeldung bei der IST-Modellgenerierung. Dieses Ereignis erzwingt eine sofortige Kommunikation mit den Projektverantwortlichen und der Baustelle über weitere Vorgehensweisen.

Dieser Sachverhalt zeigt außerdem, dass bei einer modellorientierten Arbeitsweise in der Ausführung das BIM-Modell eine zentrale, übergeordnete Stellung bei der Projektrealisierung haben muss. Somit können mögliche Modifizierungen der Datenbank sofort für die weitere Projektsteuerung und Abrechnung mitberücksichtigt werden.

###Bemerkungen###	Rammvollspieße R32 ### 3x Messbolzen setzen ###	1Angriffsort	Nord
00Aussentoleranz_(ta)	200 mm	2Tunnelroehre	RQ
00Deformationstoleranz&Ueberhoehebung_(td+ue)	80 mm	4Vortriebsart	Baggervortrieb
00Innentoleranz_(ti)	100 mm	5VKL	6A-1
00dak	40 mm	6Ausbaufestlegungs-Nr.	N-K. 003
01_Datum	24.03.2019	Abschlagslaenge	1,20 m
01_Teilflaechen	2	Abschlagslaenge_IST	1,20 m
01_Allgemeine Parameter###	###	Abschlagsnummer	15
02_AusbaubogenTyp	List_Ausbaubögen: 3-Gurt Gitterträger 145/20/30	KilometrierungAnfang	20,1
02_Ausbaubogen_Anzahl	1	KilometrierungEnde	21,3
02_Ausbaubogen###	###		
03_Baustahlmatte_bergseitig	List_Baustahlmatten: Q257A		
03_Baustahlmatte_luftseitig	List_Baustahlmatten: Q257A		
03_Baustahlmatten###	###		
04_Anzahl_Lagen_Baustahlmatten	1		
04_O	Wahr		
04_O_Dicke	50 mm		
04_Ortsbrust###	###		
05_KSG	Wahr		
05_KSG_Baustahlmatte_bergseitig	List_Baustahlmatten: Q257A		
05_KSG_Baustahlmatte_luftseitig	List_Baustahlmatten: Q257A		
05_KSG_Dicke	300 mm		
05_KSG###	###		
06_AnkerAnzahl	2		
06_AnkerTyp	List_Anker: Gebirgsanker L = 6,0 m		
06_Anker_radial###	###		
07_SpiessschirmAnzahl	43		
07_SpiessschirmTyp	List_Spieße: Rammspieß L = 4,0 m		
07_Spiessschirm###	###		

Abbildung 3.6: Charakteristische IST-Datenbank des Abschlags Nummer 15

Abbildung 3.6 zeigt einen Ausschnitt des IST-Modells nach dem Vortrieb der Kalotte. In hellblau sind alle Abschlüge markiert, in denen eine Entwässerungsbohrung ausgeführt wurde. Der grüne und blaue Bereich wird zu einem späteren Zeitpunkt noch durch Nischen erweitert. Somit ist in der Regel ein erhöhtes Maß an Sicherungsmittel in der Außenschale erforderlich.

Die farbliche Kennzeichnung unterstützt die Orientierung und hilft bei der Überprüfung der Attributwerte im Modell.

Bei den Kalotten-Abschlägen ist der Abschlag Nr. 15 gesondert gekennzeichnet. Diese geometrische Bauteilgruppe wurde zusammen mit den modellgebundenen Informationen (Listenabbildungen neben dem Modell) aus dem Abschlagsprotokoll in Abbildung 3.3 generiert. Nachdem der gesamte Vortrieb abgeschlossen ist, entsteht auf diese Weise ein „As-Built“-Modell aller realisierten Ausbruchs- und Sicherungsmittel. Das As-Built-Modell bildet den tatsächlich gebauten Bestand ab und wird unter anderem dazu genutzt, die für den Betrieb relevanten Daten mit dem entsprechenden Level of Information (LOI) zu übergeben (König *et al.*, 2017). Außerdem können die abschlagsbezogenen IST-Datenbanken als Grundlage für Nachverhandlungen oder zur flächendeckenden Dokumentation der Ausführung genutzt werden (Borrmann *et al.*, 2018, S.475).

Kapitel 4

Auswertung der BIM-Modelle mittels RIB iTWO

Für die Mengenerfassung und Datenanalyse werden die Modelldaten mit der Softwareumgebung **iTWO 5D** des Herstellers **RIB** verknüpft. **iTWO 5D** ist ein Planungs- und Projektmanagementtool für die Prozesse der **AVA**. Die Software erfüllt im Tiefbau die Richtlinien des Standardleistungskatalogs und wird für einen Großteil der Bauprojekte in der **DACH**-Region verwendet. Mit der modellorientierten und visuellen Arbeitsweise erlauben die einzelnen Module der Mengen-, Kosten- und Bauzeitermittlung eine durchgängige Projektsteuerung vom Entwurf bis zur Abnahme (RIB, 2017).

RIB hat mit dieser Softwarelösung ein Werkzeug geschaffen, das jegliche Ressourcen (Baustoffe, Maschinen oder Personal) sowie Termine und Prozesse anhand einer Geometriedatenbasis zusammenführt.

iTWO 5D wurde wie auch Revit in erster Linie für den Hochbau entwickelt. Daher ist auch die Umgebung sehr stark auf die Projektstruktur und Denkweise des Hochbaus ausgelegt. Anders als Revit verfügt **iTWO 5D** allerdings nicht über offene Programmierschnittstellen, die jede denkbare Kombination von Modellinformationen bei der Auswertung und Analyse ermöglichen würden.

Aus diesem Grund müssen an einigen Stellen Workarounds (Problemumgehungen) gefunden werden, die ein richtiges Abbilden der Modelldaten auf den Bauvertrag zulassen.

Im Folgenden Abschnitt wird die Verknüpfung des **BIM**-Modells mit dem **LV** genauer erläutert. Mit der Kombination von Modellmengen und bauvertraglichen Kalkulationswerten lassen sich ebenfalls die Kosten und die theoretische Bauzeit ermitteln.

Allerdings wird im Zuge dieser Arbeit nicht auf die grundlegenden Arbeitsweisen mit der Software **iTWO 5D** eingegangen. Das Hauptaugenmerk wird auf die Abbildung und Berechnung der spezifischen Prozesse im Tunnelbau und die Interaktion zwischen dem **BIM**-Modell und

dem Bauvertrag gelegt. Grundlegende Funktionen werden beispielsweise in Strotmann(2018) beschrieben.

4.1 Datenaustausch zwischen Revit und iTWO 5D

Für den Austausch der Bauwerksmodelle zwischen Revit und iTWO 5D bieten sich zwei Formate in der Infrastrukturplanung an.

Die **Industry Foundation Classes (IFC)** sind ein offenes Standardformat für geometriegebundene Datenbanken. „Innerhalb des IFC-Formats sind fachliche Objekte festgelegt und deren Attribute vordefiniert. Eine freie Modellierung von 3D-Volumenkörpern ohne fachlichen Bezug ist nicht vorgesehen.“ (Interaktive Grafik Milde GmbH, 2016)

Außerdem soll die IFC-Schnittstelle für möglichst viele Programme kompatibel sein, weshalb die exportierte Datenmenge sehr umfangreich sein kann. „Dies kann oft zu Problemen bei der Weiterverwendung in iTWO führen, weil Informationen, Attribute oder Beschreibungen ggf. nicht lesbar sind oder nicht an der richtigen Stelle übergeben werden.“ (Strotmann, 2018)

Für die Format-fremden Geometrien im Vortriebsmodell kann es aus diesem Grund theoretisch durchaus vorkommen, dass Teilkörper falsch oder gar nicht im ifc-Format exportiert werden. Auch die Zeichenkodierung (zum Beispiel das UTF-8-Format) kann beim Export der Parameternamen und -werte zu Fehlern führen.

Mit der richtigen Implementierung der IFC-Exportdatei konnte jedoch festgestellt werden, dass die gesamten Informationen und Geometrien des Außenschalenmodells fehlerfrei in iTWO 5D ankommen. Die IFC-Schnittstelle bleibt damit ein mögliches Austauschformat der BIM-Daten zwischen Revit und iTWO, auch für kompliziertere 3D-Volumenkörper ohne fachlichen Bezug.

Das **cpiXML-Format** hingegen ist ein herstellerabhängiges Austauschformat, welches auf den Export von bauteileigenen Geometrien und Attributen spezialisiert ist (Strotmann, 2018). Analog zum IFC-Standard wurden hierbei neben der Standardbibliothek für den Hochbau auch geometrische Objekte für Straßen- und Tiefbauprojekte definiert. Außerdem lassen sich im cpiXML-Format 3D-Flächen, 3D-Linien und 3D-Punkte frei attribuieren, wobei immer der Fokus auf die richtige Mengenübergabe der Geometrien gelegt wird (Interaktive Grafik Milde GmbH, 2016).

Aufgrund der Vorteile wurde in der vorliegenden Arbeit die cpiXML-Schnittstelle als Austauschformat zwischen Revit und iTWO 5D verwendet, obwohl mit beiden Varianten eine fehlerfreie Übernahme beobachtet werden konnte.

Datenexport aus Revit

Für den Export des Bauwerkmodells aus Revit bietet iTWO 5D ein eigenes Zusatzmodul als Plugin für Revit an (Strotmann, 2018). Über eine projektinterne Konfigurationsdatei können die Exporteinstellungen bezüglich Attributierung, Geometrieinterpretation und Detaillierungsgrad angepasst werden. Die genauen Vorgehensweisen beim Austausch eines Modells von Revit nach iTWO 5D werden in Strotmann(2018) genauer erläutert.

Auf diese Weise lässt sich das Vortriebsmodell fehlerfrei in die Softwareumgebung iTWO 5D importieren.

Allerdings wird bei der Gliederung der einzelnen Bauteilkomponenten in der cpiXML-Struktur die Anlehnung der Software an den Hochbau deutlich:

Die oberste Hierarchiestufe der Bauteilgliederung bildet standardmäßig das Geschoss/die Ebenen ab. Jede Bauteilkomponente innerhalb eines Geschosses kann weiter nach dem Gewerk/der Fachdisziplin gegliedert werden. Anschließend unterscheidet man zwischen den unterschiedlichen Bauteiltypen im Hochbau. Jedes Bauteil ist dabei in der Regel automatisch durch eine semantische Zuordnung einer Gruppe zugewiesen (Wand, Dach, Fundament, (...)). Diese Container beinhalten die zusammengesetzten Bauteilgruppen oder Einzelbauteile, eingeschlossen den Bauteildatenbanken.

Für den Tunnelbau ist diese Hierarchiestruktur nicht zutreffend und würde zu einer Vielzahl an Problemen bei der Datenverarbeitung und -analyse in iTWO 5D führen.

Beispielsweise können die zeitlichen 4D-Bauvorgänge analog zur Elementstruktur geordnet werden. Da im Vortriebsmodell die Abschlagsgeometrien auf einer Geschossebene liegen würden, erhält man nur die Gesamtbauzeit aller aufgefahrenen Tunnelelemente. Allerdings erfordert die Datenauswertung eine Analyse auf Basis der unterschiedlichen Querschnitte, Angriffsorte und Vortriebsklassen. Diese hierarchische Ordnung ist mit dem herkömmlichen cpiXML-Export aus Revit bisher nicht möglich.

Datenumstrukturierung der cpiXML-Datei

Abbildung 4.1 zeigt auf der linken Seite eine standardmäßige Gliederung der Bauteile im Hochbau. Für die Abbildung der Prozesse im Tunnelvortrieb muss die cpiXML-Datei so umgeschrieben werden, dass eine Struktur analog zur rechten Seite der Abbildung 4.1 entsteht.

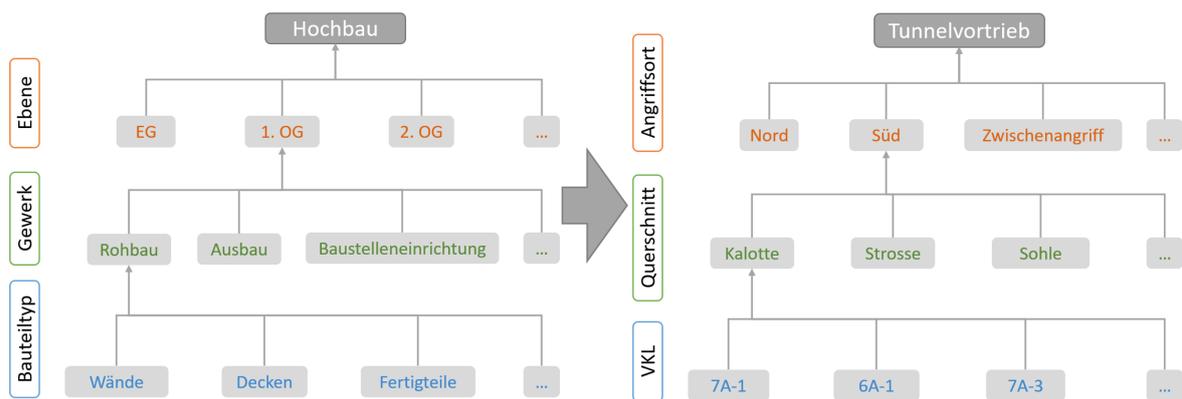


Abbildung 4.1: Vergleich der hierarchischen Modellstrukturierung im Hochbau und Tunnelvortrieb

In einem ersten Schritt werden alle Bauteile eines gemeinsamen Angriffsorts zusammengefasst. Für kleinere Projekte erfolgt die Benennung der einzelnen Vortriebe standardmäßig nach Himmelsrichtungen, denkbar wäre aber auch ein zusammengesetzter Name aus „Angriff“ kombiniert mit einer Ordnungszahl (z.B. Angriff1,Angriff2,...).

Die zweite Hierarchiestufe bestimmt der Ausbruchquerschnitt, also die einzelnen Teilvortriebe innerhalb eines Angriffsorts. In einer letzten Stufe ist die Zusammenfassung der Abschlüsse in die einzelnen Vortriebsklassen üblich. Die Bauteilgruppen sind innerhalb eines Containers nach ihrer Abschlagsnummer zu ordnen.

Für die Datenumstrukturierung des [XML-Trees](#) wurde im Zuge dieser Arbeit ein Berechnungsskript in der Programmiersprache „Python“ verfasst. Der Code wurde unabhängig von der Modellumgebung in Revit entwickelt und lässt prinzipiell den Import jeder [cpiXML](#)-Datei zu. Die Anwendungsdatei ist dieser Arbeit beigelegt.

Im Skript muss der Anwender zu Beginn festlegen, nach welchen Hierarchiestufen die geometriegebundene Datenbank geordnet werden soll. Dabei muss die Zeichenkette einer Gliederungsstufe mit einem Attribut im [BIM-Modell](#) übereinstimmen. Anschließend werden für jede Gliederungsebene alle möglichen Attributwerte in den Bauteilgruppen gefunden und auf einmalige Werte reduziert. Jeder Wert bestimmt dabei einen eigenen Container. Besonderes Augenmerk muss auf die verschachtelte Ordnung der Attributwerte gelegt werden. Der Angriffsort „Süd“ kann beispielsweise Elemente mit der Vortriebsklasse „7A-1“ enthalten, bei Angriff „Nord“ kann dieser Container unter Umständen gar nicht existieren, da kein Element die Kombination an Attributwerten erfüllt.

Nachdem jedes Bauteilelement einem Container erfolgreich zugewiesen wurde, kann der [XML-Tree](#) in einer neuen Datei ausgegeben und in [iTWO 5D](#) importiert werden. Der Export im Unicode-Zeichensatz „UTF-8“ ist essentiell für die Lesbarkeit der [cpiXML](#)-Datei in [iTWO 5D](#).

4.2 Mengenermittlung mit Bezug zum Leistungsverzeichnis

Das zentrale Modul für die Mengenberechnung in *iTWO 5D* ist das Ausstattungsverzeichnis. Es dient primär dazu, geometrische und informative Datensätze aus dem Modell herauszufiltern und mit den einzelnen Leistungspositionen zu verknüpfen (I.SBB(3), 2017, S.18f.).

Die iTWO-Ausstattung ist in einzelne Teilbereiche (Prozessschritte) unterteilt, die logisch aufeinander aufbauen und den Anwender von der geometriegebundenen Datenbank bis hin zur mengenberechneten LV-Struktur führen.

Der Abschnitt **Modell-Check** dient der Darstellung des Modells. Anhand einer hierarchischen Modellstruktur kann durch die einzelnen Bauteile navigiert und ggf. Attribute und Zusammenhänge überprüft werden (Strotmann, 2018).

Im Kontext der Modelle für Ausbruch und Sicherung spielen in dieser Oberfläche zusätzlich die dynamischen Auswahlgruppen eine zentrale Rolle. In einer dynamischen Auswahlgruppe kann durch eine Objektanfrage ein bestimmter Teil/Abschnitt des Gesamtmodells regelbasiert selektiert werden. Die so entstehenden Container werden in einem späteren Prozessschritt dafür benötigt, eine Auswahl an Objekten einer bestimmten Teilleistung zuzuordnen, aus der im Anschluss eine Mengenabfrage erfolgen kann. In der Regel macht es Sinn, die dynamischen Auswahlgruppen so anzulegen, dass sie mit dem Aufbau und der Struktur des Leistungsverzeichnisses übereinstimmen. Im Tunnelvortrieb sind die Teilleistungen normalerweise nach den Angriffsorten, Ausbruchquerschnitten, Vortriebsklassen oder Löseverfahren gegliedert. Eine beispielhafte LV-Struktur für die eingebauten Sicherungsmittel im Vortriebsverlauf ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

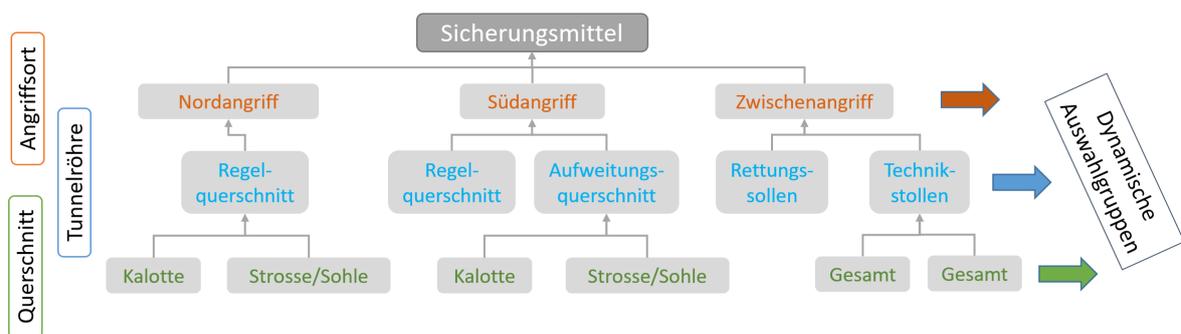


Abbildung 4.2: Struktur im Leistungsverzeichnis für die Abrechnung der Sicherungsmittel

Die erste Hierarchiestufe beschreibt in diesem Fall den Gesamtquerschnitt der Tunnelröhre. Falls vorhanden und erforderlich, lässt sich in einer weiteren Untergliederung nochmals genauer zwischen unterschiedlichen Angriffsorten unterscheiden. Die unterste Stufe in der Gliederung des Leistungsverzeichnisses ist in der Regel der Ausbruchquerschnitt. Letztendlich kann sich diese Hierarchie zwischen einzelnen Projekten unterscheiden und muss nach den speziellen Anforderungen im Projekt nach einer logischen Struktur aufgebaut werden. Die De-

Definition der dynamischen Auswahlgruppen ist mit einem sehr geringen Aufwand verbunden und kann somit auf die projektspezifische Gliederung umgehend angepasst werden. Um für jede Teilleistung einen passenden Bauteilcontainer zur Verfügung zu stellen, ist es sinnvoll für jedes Element in der Baumstruktur in Abbildung 4.2 eine eigene dynamische Auswahlgruppe zu definieren. Die Definition erfolgt durch eine selektive Objektabfrage mit einem speziellen Syntax für iTWO 5D. Beispielsweise werden bei folgender dynamischer Auswahlgruppe alle Modellelemente zusammengefasst, deren Attribute mit den Werten „Nord“, „RQ“ und „Kalotte“ übereinstimmt:

```
Object( @1Angriffsort=='Nord' && @2Tunnelroehre=='RQ' &&  
        @3BezeichnungAusbruchsquerschnitt=='Kalotte' )
```

Der nächste Teilbereich **Ausstattung** - gleichnamig zum iTWO-Modul selbst - gilt als das Herzstück des modellorientierten Arbeitens in iTWO 5D. Den Teilleistungen des Leistungsverzeichnisses können in diesem Abschnitt Bauteile aus dem Modell zugeordnet werden. Anschließend lässt sich eine Mengenabfrage definieren, die anhand von Attributen und geometrischen Kenngrößen festlegt, auf welche Weise die Menge der Teilleistungsposition berechnet werden soll (Strotmann, 2018).

Wenn bereits ein ausgearbeitetes Leistungsverzeichnis in der Projektumgebung vorliegt, lassen sich die Teilleistungen sehr einfach durch eine Übertragung der bestehenden Struktur erstellen.

Um Bauteile für die Mengenermittlung zur Verfügung zu stellen, muss jeder Teilleistungsposition anschließend eine Auswahl an Modellkomponenten zugeordnet werden. Im vorliegenden Projekt erfolgt diese Zuweisung über die erstellten dynamischen Auswahlgruppen.

Mengenabfrage

Im nächsten Schritt erfolgt die genaue Definition der Mengenabfrage innerhalb einer Teilleistungsposition.

Im Fall der umfangreichen geometriegebundenen Datenbank des Tunnelvortriebs erfordert diese Berechnungsanweisung umfassende Kenntnisse über die genaue Struktur im BIM-Modell. Das liegt einerseits an der ausführlichen Repräsentation einzelner Bauteilkomponenten im Modell und an den komplexen Volumenkörpern und geometrischen Zusammenhängen. Andererseits sind die expliziten Abrechnungsvorschriften im Tunnelvortrieb sehr aufwändig formuliert, da die Abrechnung im Rahmen des Vertrages auf den geleisteten Aufwand und den tatsächlichen Bauablauf flexibel erfolgen muss (Breidenstein *et al.*, 2016, S.12f.).

Aus diesem Grund werden die einzelnen Prozessschritte für die Formulierung der Mengenabfrage anhand von ausgewählten Beispielen erläutert.

Beispiel 1: Berechnung des Ausbruchsvolumens

Für den charakteristischen Abschlag Nr. 15 aus Abbildung 3.6 soll das Ausbruchsvolumen

gemäß den Vereinbarungen aus Planung, Bauvertrag und LV berechnet werden.

Im LV ist hierfür folgende Teilleistungsposition mit abrechnungsrelevanten Formulierungen aufgeführt:

3.1.30 Ausbruch Kalotte VKL 6A-1

Ausbruch der Vortriebsklasse 6A-1

vom Angriffsort Nord

mit einer ungesicherten Abschlagstiefe von 1,2 m

incl. der temporären Kalottensohle herstellen.

Abrechnung nach Festraummaß

innerhalb des Ausbruchsollprofils (L_{AS}-Linie nach DIN 18312).

Mehrausbruch bis zur äußeren Ausbruchtoleranz bzw. bis zum Spießschirm ist einzurechnen.

Geologisch bedingter, unvorhersehbarer, unvermeidbarer Mehrausbruch wird gesondert vergütet.¹

Die Position wird über die Mengeneinheit Volumen in [m³] abgerechnet.

Im Modell sind einzelne Volumenkörper für Teilkomponenten des Abschlags modelliert. Allerdings existiert im Abschlagselement weder ein einzelner Ausbruchskörper, noch ein Parameterwert, der für die Mengenermittlung innerhalb der Teilleistung eindeutig herangezogen werden kann.

Die Volumenberechnung muss demnach durch die Kombination von mehreren Einzelgeometrien im Abschlagselement erfolgen.

Natürlich wäre es durchaus möglich, einen Körper im Modell abzubilden, der das jeweilige Ausbruchsvolumen eindeutig repräsentiert. Allerdings fordert die Leistungsposition eine Volumenberechnung bis zur L_{AS}-Linie, welche eine flexible Überhöhung des Querschnittprofils nach DIN 18312 beinhaltet. Eine komplizierte, parametrisierte Modellierung der gesamten Ausbruchskubatur ist daher nicht sinnvoll, da das Volumen ohnehin durch bestehende Modellkörper abgebildet werden kann. Wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben, erfüllt jeder Volumenkörper im Modell die Forderung des parametrischen Geometrieverhaltens analog zu DIN 18312 und weiteren Steuerungsparametern.

¹Angelehnt an Position 3.1.30. des Ausschreibungsleistungsverzeichnisses des Projekts 20180627; 17-54-02 BW 1-1 Tunnel Bertoldshofen

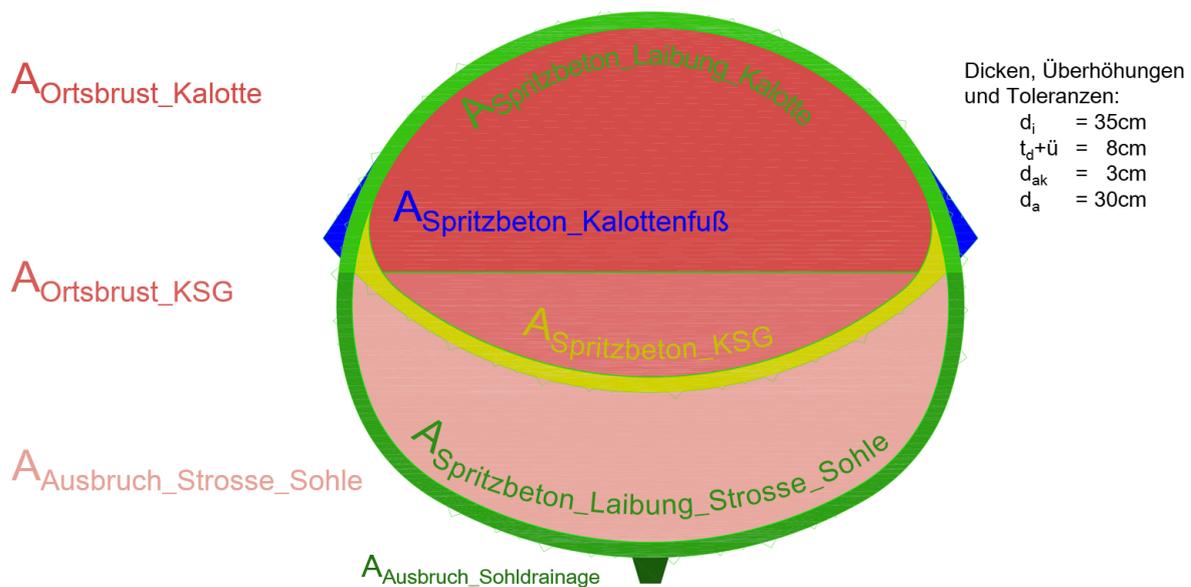


Abbildung 4.3: Ermittlung des Ausbruchsvolumen im Regelquerschnitt

In Abbildung 4.3 werden die Teilprofile der modellierten Volumenkörper über den gesamten Ausbruchsquerschnitt dargestellt. Die Mengenberechnung des Ausbruchsvolumens eines Abschlagelements der Kalotte erfolgt demnach über folgende Teilkomponenten:

$$Volumen_{3.1.30} = Ortsbrust + Spritzbetonlaibung + Kalottenfuß$$

Die Kubatur der Ortsbrustgeometrie umfasst dabei die Fläche „ $A_{Ortsbrust_Kalotte}$ “, „ $A_{Ortsbrust_KSG}$ “ und „ $A_{Spritzbeton_KSG}$ “.

Zusätzlich zur Erstellung der Berechnungsvorschrift muss die Auswahl der zu berücksichtigen Modellelemente weiter eingegrenzt werden. Der Teilleistungsposition wurde die dynamische Auswahlgruppe *Nordangriff* → *Regelquerschnitt* → *Kalotte* (analog zu Abbildung 4.2) zugeordnet. Da der Leistungstext die zusätzlichen Bedingungen $VKL == 6A-1$ und *Abschlagslänge* == 1,2m für ein Modellelement fordert, muss in der Mengenabfrage ein weiterer Filter nach diesen Eigenschaften eingebaut werden.

Die gesamte Mengenabfrage der Teilleistungsposition ergibt sich demnach wie folgt in vereinfachter iTWO 5D-Schreibweise:

$$\begin{aligned} & QTO(Volumen; \text{Attribut}\{VKL\} == 6A - 1 \text{ und } \text{Attribut}\{MaterialName\} == Ortsbrust) + \\ & QTO(Volumen; \text{Attribut}\{VKL\} == 6A - 1 \text{ und } \text{Attribut}\{MaterialName\} == Spritzbeton) + \\ & QTO(Volumen; \text{Attribut}\{VKL\} == 6A - 1 \text{ und } \text{Attribut}\{MaterialName\} == Kalottenfuß) \end{aligned}$$

Das Ausbruchsvolumen im Bereich der Ortsbrust ergibt sich dabei aus der Kombination der Querschnittsfläche und der Abschlagslänge. Eine direkte Volumenermittlung ist nicht möglich, da die Ortsbrust nicht im gesamten Abschlag definiert ist.

Beispiel 2: Berechnung der Bewehrung

In einem weiteren Szenario soll die Menge der Betonstahlmatten innerhalb eines Abschlag-elements berechnet werden. Im LV ist hierfür folgende Teilleistungsposition mit abrechnungsrelevanten Formulierungen aufgeführt:

3.3.10 Bewehrung aus Betonstahl herstellen (Matten)

Betonstahlbewehrung nach Planunterlagen herstellen.

Gilt für alle Vortriebsklassen des Ausbruchsquerschnitts 'Kalotte' und Angriff 'Nord'

Bauwerksteile: Ortsbrust, Außenschale und Kalottensohle²

Die Position wird über die Mengeneinheit [t] abgerechnet.

Das abrechenbare Mattengewicht ist zusätzlich in der Baubeschreibung geregelt und erfolgt nach folgender Formel:

$$\begin{aligned} \text{Abrechenbares Mattengewicht} = & (\text{tatsächliche Abschlagslänge} + 15\text{cm}) * \\ & (\text{theoretische Abwicklung der Innenkante Spritzbeton}) * \\ & (\text{spezifisches Mattengewicht [kg/m}^2\text{)}) \end{aligned}$$

Nach Bauvertrag und Norm sind die Abwicklungen für die Bauteilkomponenten im Regelquerschnitt wie folgt definiert:

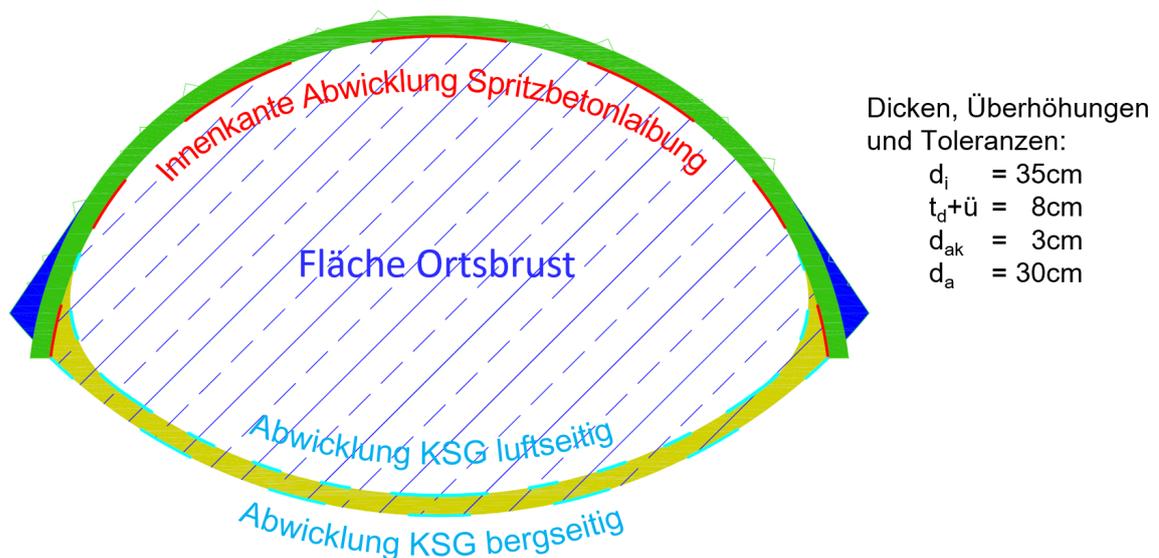


Abbildung 4.4: Abwicklungen für die Mengenberechnung im Regelquerschnitt Kalotte

Im Modell ist die Abschlagslänge sowie die Abwicklung der Innenkante Spritzbeton in Form eines Parameterwertes für jede Geometrie enthalten. Abbildung 4.4 zeigt dabei, welche Geometrieabwicklung für die jeweiligen Bauteilkomponenten bei der Mengenberechnung herangezogen wird. Die berg- und luftseitigen Matten in der Spritzbetonlaibung errechnen sich aus

²Angelehnt an Position 3.3.200. des Ausschreibungsleistungsverzeichnisses des Projekts 20180627; 17-54-02 BW 1-1 Tunnel Bertoldshofen

der rot markierten Innenkantenabwicklung. Für die Matten im Kalottensohlgewölbe muss zwischen der berg- und luftseitigen Abwicklung unterschieden werden. Wie aus der blauen Markierung hervorgeht, ergibt sich durch den tangentialen Anschluss des KSG an die Laibung für die luftseitige Matte ein größerer Wert als für die bergseitige Matte. Die Betonüberdeckung von 3cm wurde bei der Abrechnung der Spritzbetonlaibung und des KSG vereinfacht nicht berücksichtigt. Im Fall der Ortsbrust errechnet sich die Abrechnungsfläche über $\text{Volumen}_{\text{Ortsbrust}}/\text{Dicke}_{\text{Ortsbrust}}$. Die resultierende Fläche ist mit der dunkelblauen Schraffur dargestellt.

Das spezifische Mattengewicht hängt allerdings davon ab, welcher Mattentyp im jeweiligen Teilelement eingebaut wird. Aus diesem Grund sind folgende Bauteilattribute in der Modellfamilie zu prüfen und mit der jeweiligen bauteilspezifischen Dichte der Matte zu multiplizieren.

Attribut	mögliche Werte	spez. Dichte
Ortsbrust Mattentyp	Q188	3,02 kg/m ²
KSG Mattentyp bergseitig	Q257	4,12 kg/m ²
KSG Mattentyp luftseitig	Q335	5,38 kg/m ²
Laibung Mattentyp bergseitig	R188	2,43 kg/m ²
Laibung Mattentyp luftseitig	R257	2,99 kg/m ²

Tabelle 4.1: Kombinationen der Matteneigenschaften für die Mengenermittlung

Beispielsweise ergibt sich für einen Kalottenabschlag der Vortriebsklasse *6A-1* der Länge $1,00\text{m}$ und einer Abwicklung der Innenkante der Laibung von $16,38\text{m}$ bei einem berg- und luftseitigen Einbau einer *Baustahlmatte Q257* in die Spritzbetonlaibung folgende Abrechnungsmenge gemäß der Abrechnungsformel:

$$2 * (1,00\text{m} + 0,15\text{m}) * 16,38\text{m} * 4,12\text{kg/m}^2 = 155,217\text{kg} \approx 0,155\text{t}$$

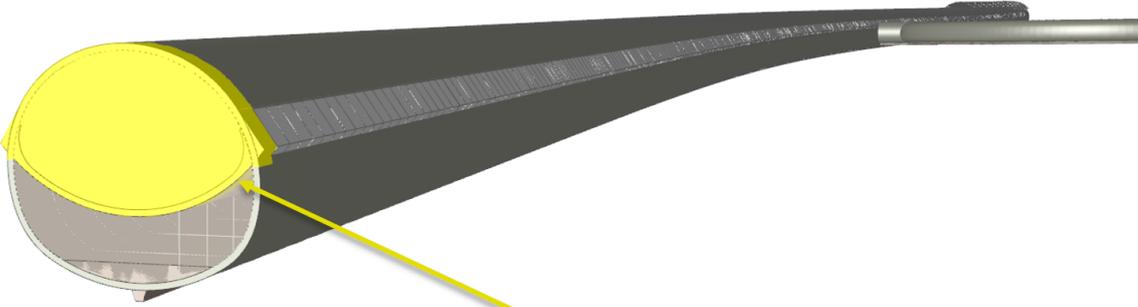
Die Implementierung in iTWO 5D kann je nach Anzahl an unterschiedlichen Matten im Projekt sehr umfangreich sein. Für jedes einzelne Attribut in Tabelle 4.1 muss überprüft werden, welcher Mattentyp eingebaut ist, um mit der zugehörigen Dichte die Gewichts Berechnung durchführen zu können. Kommen bei einem Projekt für jedes der fünf Attribute etwa drei Mattentypen in Frage, müssen schon 15 Teilabfragen für die Berechnung durchgeführt werden. iTWO 5D bietet hierbei leider keine einfachere Implementierungsoberfläche. Es ist durchaus möglich, dass die aufwendigen Mengenabfragen zeitintensiv und unübersichtlich werden. Nach eigener Erfahrung sind allerdings mehr als zwei Mattentypen für ein Bauteilelement innerhalb der gesamten Projektumgebung äußerst selten. Der Aufwand für die Definition der Mengenabfrage ist deshalb nicht unverhältnismäßig hoch.

Wie die selektiven Abfragen aus den beiden Beispielen genau in iTWO 5D zu definieren sind, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter thematisiert. Gerade für zusammengesetzte Abfragen ist in iTWO 5D ein weitreichendes Verständnis für die softwarespezifischen Abläufe

und Anforderungen erforderlich. Dieser Umfang würde den Rahmen der Arbeit sprengen.

Der nächste Teilbereich des Ausstattungsmoduls ist die sogenannte **Zuordnung**. Sollte den Teilleistungspositionen noch keine Modellelemente für die Mengenermittlung zugeordnet worden sein, lassen sich in diesem Abschnitt über einen Modellfilter einzelne Bauteile selektieren, visualisieren und anschließend der jeweiligen Position zuordnen (Strotmann, 2018). Da dieser Schritt bereits durch die flexiblere Variante der dynamischen Auswahlgruppen erfolgt ist, kann der Schritt der manuellen Zuordnung übersprungen werden.

Sind die Teilleistungspositionen durch die Zuordnung von Modellelementen und die Formulierung der Mengenabfragen ganzheitlich definiert, kann die Mengenermittlung erfolgen. Eine detaillierte Überprüfung der Ergebnisdaten lässt sich in der Oberfläche **Mengen** durchführen. In Abbildung 4.5 werden beispielhaft die einzelnen Teilleistungen für die Position 3.3.10 aus Beispiel 2 aufgeschlüsselt.



Variable	Mengenansatz	Wert	ME	Objekt
▶ S1	$((16.38) * ((1) + 0.15)) * 0.00412$	0,078		17.21.9.1 Kalotte_VKL_RQ 7A-2
S2	$((16.38) * ((1) + 0.15)) * 0.00412$	0,078		17.21.9.1 Kalotte_VKL_RQ 7A-2
S3	$(14.64 - 0.06 + 2 * (0.09)) * ((1)) * 0.00412$	0,061		17.21.9.1 Kalotte_VKL_RQ 7A-2
S4	$(12.85) * ((1)) * 0.00412$	0,053		17.21.9.1 Kalotte_VKL_RQ 7A-2
	0,015	0,015	t	17.21.9.1.6 Kalotte_VKL_RQ 7A-2
S6	$((5.1) / (1)) * 0.00302$	0,015		17.21.9.1.6 Kalotte_VKL_RQ 7A-2
	0,185	0,185	t	17.21.9.1.3 Kalotte_VKL_RQ 7A-2
S5	$((6.13) / (0.1)) * 0.00302$	0,185		17.21.9.1.3 Kalotte_VKL_RQ 7A-2
		$\Sigma = 0,470 \text{ t}$		

Abbildung 4.5: Mengenermittlung am Beispiel der Bewehrungsmatte aus Betonstahl

Die Gesamtmenge des ersten Abschlagelements von 0,470t resultiert aus den Teilmengen der Variablen S1 – S6. Die Zahlen der zusammengesetzten Berechnungsformeln kommen direkt aus den Bauteilinformationen im BIM-Modell. Die Mengensätze sind den Variablen wie folgt zugeordnet:

S1	Luftseitige Matte Laibung	Q257A
S2	Bergseitige Matte Laibung	Q257A
S3	Luftseitige Matte KSG	Q257A
S4	Bergseitige Matte KSG	Q257A
S5 + S6	Fläche der Ortsbrust	Q188A

Die Oberfläche für die Überprüfung der Berechnungsformeln und der Endmenge ist in einer voll vernetzten Umgebung aufgebaut.

In der Modellansicht lässt sich frei durch alle Modellelemente navigieren. Bei der Auswahl einer Komponente werden umgehend alle Teilrechnungen hervorgehoben, die aus der Geometrie oder den Bauteilinformationen hervorgehen. Auf diese Weise lässt sich für jedes Element die Ergebnismenge nachvollziehen und überprüfen.

Ebenfalls ist es möglich, eine Teilrechnung wie in Abbildung 4.5 anzuwählen. Das Modellelement, aus dem die Rechnung hervorgeht, wird daraufhin farblich markiert. Außerdem kann die Datenbank des Elements direkt eingesehen und überprüft werden.

Im Tunnelvortrieb sind die Abschlagselemente sehr ähnlich zueinander, weshalb die berechnete Menge für viele Komponenten oft identisch ist. Allerdings gibt es immer wieder atypische Bereiche oder Einzelbauteile, die bei herkömmlichen Abrechnungsmethoden oft zu Fehlrechnungen führen. Beispielsweise können in einem Abschlag zusätzliche Sicherungsmaßnahmen aufgrund einer geologischen Störzone notwendig sein, die im Zuge der Abrechnung nicht berücksichtigt werden.

Die freie Auswahl der Modellelemente mit dem Bezug zur Berechnungsvorschrift lässt eine Mengenüberprüfung durch die transparente Darstellungsweise für alle Projektbeteiligten zu. Sollte dennoch ein Wert aus dem Modell nicht nachvollzogen werden können, lässt sich die Ursprungsinformation durch eine Verknüpfung des Abschlagprotokolls und der Planungsunterlagen herbeiführen. Die entsprechende Datei des Plans/Protokolls ist dabei durch ein Attribut mit dem Dateinamen verlinkt.

Das Teilmodul Mengen stellt demnach ein Werkzeug dar, mit dem sich jede berechnete Menge bis hin zum Informationsursprung transparent überprüfen lässt.

Die Berechnungsergebnisse können im letzten Teilbereich **LV-Zuordnung** in das Leistungsverzeichnis übertragen werden. Da die Teilleistungen aus dem **LV** erstellt wurden und damit einen Bezug zu den **LV**-Positionen erhalten haben, werden die Mengen an der richtigen Stelle zugeordnet.

Automatische Neuberechnung bei der Aktualisierung von Eingangsdaten

Die Bauteilkomponenten der **BIM**-Modelle werden durchgängig nach den Regeln der Planung und des Bauvertrags modelliert und über einheitliche Namensgebungen und Attributierungsmöglichkeiten mit Informationen angereichert. Dabei werden die projektspezifischen

Freiheitsgrade berücksichtigt. Damit weisen alle Modelle innerhalb der Projektumgebung eine einheitliche geometriegebundene Datenbankstruktur auf.

Bei der Verknüpfung des universellen BIM-Modells mit den Leistungspositionen im Ausstattungsmodul wurde an jeder Stelle ein dynamischer Zuordnungsprozess implementiert. Somit wurde eigentlich kein Modell explizit mit iTWO verknüpft, sondern ein System geschaffen, dass bei einem beliebigen Modell nach den Regeln im Projekt zu jedem Zeitpunkt eine automatische Berechnung der Vortriebsmengen zulässt.

Mit dieser vernetzten Grundlage kann zum Beispiel das SOLL-Modell aus Kapitel 2 und das IST-Modell aus Kapitel 3 in das selbe Ausstattungsmodul eingefügt werden. Da in beiden Datenbanken die Strukturen bezüglich der geometrischen Repräsentation und der parametrischen Information einheitlich sind, werden die Modellelemente den Teilleistungen richtig zugeordnet und die Positionsmengen durchgängig berechnet.

Damit wurde ein System geschaffen, in dem zu jedem Projektzeitpunkt eine Mengenauswertung des BIM-Modells automatisch und in vollem Umfang erfolgen kann.

Gerade im Hochbau gibt es die verzahnte Denkweise einer regelbasierten Auswertung eines standardisierten Informationsmodells schon und wird in vielen Projekten und Gewerken bereits eingesetzt (Günthner & Borrmann, 2011; Scherer & Schapke, 2014). Eine standardisierte Grundlage für den bergmännischen Tunnelvortrieb ist allerdings noch nicht vorhanden. Durch vergleichbare Datenbankstrukturen in projektübergreifender Hinsicht ist das Potential solcher vernetzten und durchgängigen Auswertungssysteme enorm.

4.3 Transparente Mengenabbildung im modellorientierten Leistungsverzeichnis

Das LV gibt bei der modellorientierten Arbeitsweise die zentrale Struktur bzw. Gliederung für die Zusammenstellung und Visualisierung der Ergebnisdaten aus verschiedenen Teilmodulen vor.

Neben den Modellmengen lassen sich ebenfalls die kalkulierten Einheitspreise mit dem LV verknüpfen. Für die Arbeitskalkulation seitens der Baufirma wird in der Anwendungsoberfläche „iTWO-Bauen“ ein eigenes Modul zur Verfügung gestellt. Für jede Leistungsposition wird auf der Basis von direkt zuordenbaren Einzelkosten (Lohn, Material, Geräte etc.) sowie zusätzliche Anteile aus Gemeinkosten, Wagnis und Gewinn ein Baupreis als Einheitspreis ermittelt (Elwert & Flassak, 2008).

Zwischen der Ausschreibungs- und Angebotsphase kann die Baufirma die Preise flexibel auf Grundlage der Modellmengen kombinieren und berechnen. Wird der Zuschlag erteilt, wird der kalkulierte Einheitspreis fester Bestandteil des Bauvertrages und kann in der Regel nicht mehr geändert werden.

Mit dem Produkt aus der Menge und dem Einheitspreis erhält man die Kosten für jede Teil-

leistungsposition.

Im Folgenden wird die Oberfläche des modellorientierten Leistungsverzeichnisses vorgestellt.

Struktur	OZ	Kurztext	VA-Menge	ME	EP	Gesamtbetrag
		Geltungsbereich				
	3. 1.	Tunnelausbruch				2.116.040,72
		Abschnitt RQ, Kalottenvortrieb Nord				
	3. 1. 10.	Anschlagvorgang RQ Kalotte Nord	1,000	psch	14.350,00	14.350,00
	3. 1. 20.	Fahrsole Kalotte einbauen	5.531,169	m3	5,00	27.655,85
	3. 1. 30.	Ausbruch Kalotte VKL 6A-1, Teilflächen <=5 Stk.	6.321,763	m3	30,28	191.422,98
	3. 1. 40.	Ausbruch Kalotte VKL 6A-1 Teilflächen 6-10 Stk	2.709,327	m3	33,22	90.003,84
	3. 1. 50.	Ausbruch Kalotte VKL 7A-1, Teilflächen <=5 Stk.	9.031,561	m3	31,35	283.139,44
	3. 1. 60.	Ausbruch Kalotte VKL 7A-1 Teilflächen 6-10 Stk	3.870,669	m3	35,12	135.937,90
	3. 1. 70.	Ausbruch Kalotte VKL 7A-2, Teilflächen <=5 Stk.	3.697,092	m3	32,68	120.820,97
	3. 1. 80.	Ausbruch Kalotte VKL 7A-2 Teilflächen 6-10 Stk	1.584,468	m3	36,57	57.943,99

Mengensplit		VA-Menge
Objekte Bezeichnung		6.321,763
▶	Kalotte_VKL_RQ 6A-1	51,485
	Kalotte_VKL_RQ 6A-1	51,464
	Kalotte_VKL_RQ 6A-1	51,443
	Kalotte_VKL_RQ 6A-1	51,457
	Kalotte_VKL_RQ 6A-1	51,464
	Kalotte_VKL_RQ 6A-1	51,471
	Kalotte_VKL_RQ 6A-1	51,471
	Kalotte_VKL_RQ 6A-1	51,492
	Kalotte_VKL_RQ 6A-1	51,478

	Abschlag 1
	Abschlag 2
	Abschlag 3
	Abschlag 4
	...

Abbildung 4.6: Transparenter Bezug im Leistungsverzeichnis zu den berechneten Teilmengen

Das grundlegende Navigationswerkzeug sind in dieser Programmoberfläche die Teilleistungspositionen des LVs.

Im Kapitel 4.2 wurde anhand des Beispiels 1 bereits erläutert, wie sich die Mengenermittlung im Ausbruchvolumen zusammensetzt. In Abbildung 4.6 wird anhand dieser Position das modellorientierte Leistungsverzeichnis vorgestellt.

Mit der Auswahl der Ordnungszahl 3.1.30. werden in einem sogenannten „Mengensplit“ die Teilergebnisse aufgelistet, aus denen sich die gesamte Positionsmenge zusammensetzt. In Abbildung 4.6 ist dabei nur ein kleiner Ausschnitt der Einzelmengen aufgelistet, die in Summe zu einem Volumen von $6.321,763\text{m}^3$ führen. In einem weiteren Fenster für die Visualisierung werden außerdem nur die Modellelemente angezeigt, die einen Bezug zur Teilleistung haben. Im Fall der Position 3.1.30. sind das alle Modellelemente, die die Bedingungen „Nord“, „RQ“, „Kalotte“ und „6A-1“ erfüllen sowie eine Anzahl der Teilflächen von weniger gleich fünf aufweisen. Im Mengensplit lassen sich wiederum analog zu Abbildung 4.5 einzelne Teilergebnisse auswählen, woraufhin das zugehörige Element im Modellfenster farblich markiert wird.

Ähnlich wie in der Oberfläche Mengen des Ausstattungsmoduls kann im modellorientierten Leistungsverzeichnis eine transparente Mengenüberprüfung am BIM-Modell erfolgen.

Die Kosten der Teilleistungsposition errechnen sich aus der Ergebnismenge und dem Einheitspreis. Die Preise sind in Abbildung 4.6 zufällig gewählt und haben keinen Projektbezug. Aus Position 3.1.30. ergeben sich Kosten in Höhe von $191.422,98\text{ €}$.

4.4 Ermittlung der zu vergütenden Bauzeit

Die Bemessung der Tunnelaußenschale ist erheblich durch den Baugrund beeinflusst, der nur mit einer begrenzten Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Diese Tatsache betrifft allerdings nicht nur die Bemessung, sondern auch den für die Herstellung des Tunnelbauwerks benötigten **Zeitbedarf**.

In den Leistungspositionen werden in der Regel neben den zeitunabhängigen Kosten für Material auch zeitabhängige Lohnkosten, Gerätekosten und Baustellenkosten für die gesamte Leistungserbringung kalkuliert. Eine technische oder wirtschaftliche Anpassung im Vortriebsprozess kann leicht zu einer erheblichen Änderung des Zeitbedarfs bei fast gleichbleibenden Mengenpositionen führen. Aus diesem Grund werden die zeitgebundenen Kosten (**ZGK**) von den zeitunabhängigen Kosten im Tunnelbau abgekoppelt und in eigenen **LV**-Positionen vergütet. (Friebel *et al.*, 2017, S.5)

Für jede bauzeitrelevante Teilleistungsposition wird demnach zusätzlich zum Einheitspreis ein Leistungs- oder Lohnstundenansatz ausgewiesen. Bauzeitrelevante Vorgänge berücksichtigen die Bauphasen, die auf dem sogenannten „kritischen Weg“ liegen und damit eine vertraglich zu vergütende Gesamtbauzeit beeinflussen (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.(DGGT), 2017, S.38-41).

Der **Leistungsansatz** wird für jede bauzeitrelevante Teilleistungsposition gesondert ermittelt und weist die Bauzeit [h] aus, die pro Einheit [EH] der Position für die Erstellung des Bauteils benötigt wird. Beispielsweise könnte für die Leistungsposition 3.1.30 aus Beispiel 1 ein Leistungsansatz von $0,069h/EH$ ausgewiesen werden. Die Baufirma kalkuliert also damit, dass sie für den Ausbruch von $1m^3$ Baugrundmaterial der Position *Kalotte VKL 6A-1* eine Zeit von etwa vier Minuten benötigt.

Im **Lohnstundenansatz** wird der Leistungsansatz über die Kolonnenstärke umgerechnet und weist die Anzahl an Lohnstunden aus, die für das Herstellen einer Einheit anfallen. Bei einer Kolonnenstärke von fünf Mineuren entspricht das einem Lohnstundenansatz von $0,067h/EH * 5 = 0,335Lh/EH$.

Grundprinzip des flexiblen Bauzeitmodells ist die Gewährleistung, dass bei Mengenverschiebungen zwischen den einzelnen Leistungspositionen die Leistungsansätze erhalten bleiben (Friebel *et al.*, 2017, S.8).

Allerdings muss darauf geachtet werden, dass der Leistungsansatz und damit auch der Lohnstundenansatz ein kalkulatorischer Wert ist. Der Auftragnehmer verpflichtet sich mit seinem Angebot nicht, die Leistung auch in der angegebenen Zeit zu erbringen. Er bekommt lediglich für eine tatsächlich geleistete Menge eine bestimmte Bauzeit auf Basis der Lohn-/Leistungsansätze vergütet. (Friebel *et al.*, 2017)

Aus den theoretisch geleisteten Stunden ergeben sich die abrechenbaren Kosten über einen weiteren Einheitspreis speziell für die zeitgebundenen Kosten.

Die Implementierung der zeitgebundenen Kosten in iTWO 5D erfolgt im Zuge dieser Arbeit vereinfacht über die Leistungsansätze. Damit ist die differenzierte Betrachtung der Kolonnenstärken für die Einzelvorgänge überflüssig. Ist eine Leistungsposition Bestandteil des kritischen Weges, erhält sie im Leistungsverzeichnis neben dem Einheitspreis auch einen kalkulierten Leistungsansatz.

Struktur	OZ	Kurztext	VA-Menge	ME	Einheitspr...	h/ME	Stunden	Gesamtbetrag
[-]	3. 1.	Tunnelausbruch						2.116.040,72
		Abschnitt RQ, Kalottenvortrieb Nord						
§	3. 1. 10.	Anschlagvorgang RQ Kalotte Nord	1,000	psch	14.350,00	43,000	43,000	14.350,00
§	3. 1. 20.	Fahrsohle Kalotte einbauen	5.531,169	m3	5,00	0,003	16,594	27.655,85
§	3. 1. 30.	Ausbruch Kalotte VKL 6A-1, Teilflächen <=5 Stk.	6.321,763	m3	30,28	0,069	436,202	191.422,98
§	3. 1. 40.	Ausbruch Kalotte VKL 6A-1 Teilflächen 6-10 Stk	2.709,327	m3	33,22	0,070	190,737	90.003,84
§	3. 1. 50.	Ausbruch Kalotte VKL 7A-1, Teilflächen <=5 Stk.	9.031,561	m3	31,35	0,071	641,241	283.139,44
§	3. 1. 60.	Ausbruch Kalotte VKL 7A-1 Teilflächen 6-10 Stk	3.870,669	m3	35,12	0,072	278,688	135.937,90
§	3. 1. 70.	Ausbruch Kalotte VKL 7A-2, Teilflächen <=5 Stk.	3.697,092	m3	32,68	0,072	266,191	120.820,97
§	3. 1. 80.	Ausbruch Kalotte VKL 7A-2 Teilflächen 6-10 Stk	1.584,468	m3	36,57	0,073	115,666	57.943,99

Abbildung 4.7: Modellorientiertes LV mit Leistungsansätzen und ZGK

Das Leistungsverzeichnis in Abbildung 4.7 beinhaltet neben den kalkulierten Einheitspreisen ebenfalls die Leistungsansätze und die daraus resultierenden Gesamtstunden für die bauzeitrelevanten Positionen. Die Leistungsansätze sind ebenfalls frei erfunden und haben keinen Projektbezug. Für die Teilleistung 3.1.30 errechnet sich beispielsweise die zu vergütende Bauzeit zu 436,202 h bei einem kalkulierten Ansatz von 0,069 *Stunden/Mengeneinheit*.

Allerdings erfolgt die tatsächliche Berechnung der zeitgebundenen Kosten nicht im Leistungsverzeichnis. Die Stunden müssen für die jeweiligen Vortriebsklassen separat ausgewiesen werden, da unter Umständen ein anderer Faktor für die Stundenvergütung unterschiedlicher Bereiche im Vortriebsverlauf herangezogen wird.

Diese Untergliederung ist im Modul **Vorgangsmo**del des modellorientierten Arbeitens in iTWO 5D möglich.

Die Gesamtheit an Vorgängen ist analog zur Objektstruktur aus Abbildung 4.1 (rechte Seite) definiert. Jedes Abschlagselement bildet dabei einen eigenen Sammel- oder Einzelvorgang ab. Die theoretische Bauzeit für jeden Abschlag leitet sich aus den Mengen im Modellelement, kombiniert mit den zugehörigen Leistungsansätzen, ab. Auf diese Weise erhält man für jedes Element und damit auch für den gesamten Tunnel die zu vergütende Bauzeit im Vortriebsverlauf.

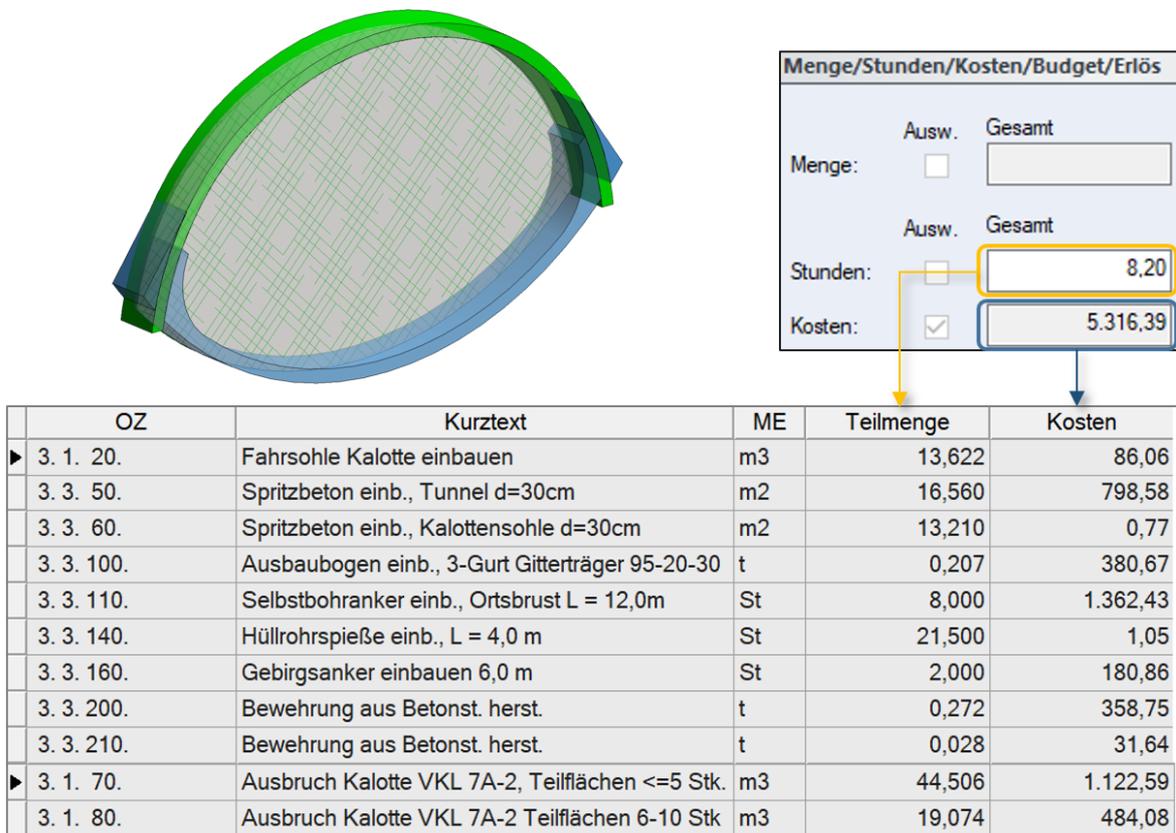


Abbildung 4.8: Modellorientierte Bauzeitermittlung für die Abrechnung der ZGK

In Abbildung 4.8 ist die vollständige Zeit- und Kostenauswertung eines charakteristischen Kalottenabschlags der Vortriebsklasse „7A-2“ dargestellt. In der Tabelle sind alle Vorgänge aufgelistet, die im Abschlagsselement berücksichtigt und zugleich Bestandteil der bauzeitlich relevanten Vorgänge sind. Multipliziert man die jeweilige Teilmengen der Leistungspositionen mit dem Einheitspreis, erhält man die Gesamtkosten von 5.316,39 € für den Abschlag. Der Fokus liegt hier aber auf der Bauzeit. Die Teilmengen in Kombination mit dem jeweiligen Leistungsansatz ergeben in Summe die zu vergütende Bauzeit von 8,20 h.

Letztendlich liegt neben der abrechenbaren Bauzeit im BIM-Modell die tatsächlich benötigte Zeit für den Vortrieb ebenfalls vor. Diese Information wird direkt aus dem Abschlagsprotokoll aus der Zelle „Datum“ übernommen und in den Bauteilinformationen eines Abschlags festgehalten.

Damit sind alle notwendigen Informationen für eine bauzeitliche Auswertung und Analyse des Vortriebprozesses im Modell abgebildet.

Simulation der Bauzeit (4D)

Aus den gesammelten Zeitdaten lässt sich eine 4D-Simulation verschiedener Modelle und Bauzustände durchführen. Um eine Zuordnung der Modellelemente zu Terminplanvorgängen und deren Verknüpfung untereinander sicherzustellen, bieten sich folgende Attribute an.

Über die Anfangs- und Endstationierung sowie die Abschlagsnummer kann die Aneinanderreihung der Teilvorgänge sehr einfach bestimmt werden. Das Attribut für die Dauer der einzelnen Vorgänge unterscheidet sich je nach Modell. Im SOLL-Modell sind die theoretisch ermittelten Bauzeiten auf Grundlage der Leistungsansätze relevant. Soll die zu vergütende Bauzeit im IST-Modell abgebildet und damit die kalkulierten Vortriebsleistungen simuliert werden, sind ebenfalls die Ergebnisdaten aus iTWO 5D in Kombination mit dem IST-Modell relevant. Die tatsächliche Vortriebsgeschwindigkeit wird auf Grundlage des Datumsattributs jedes einzelnen Abschlagelements simuliert.

Mit einer einfachen Informationsbasis erfolgt die Verknüpfung der Modellelemente mit einer zeitlichen Komponente aufgrund von definierten Regeln sehr schnell und effizient (Tschickardt *et al.*, 2018).

Die Softwarelösungen für die Implementierung einer 4D-Simulation sind dabei vorhanden, jedoch noch nicht in vollem Umfang flexibel ausgearbeitet. Nur in seltenen Fällen kann aus den Modellinformationen eine Hierarchiestruktur für die Gliederung der Vorgänge frei abgeleitet werden. Eine weitere Schwierigkeit ist die regelbasierte Verknüpfung der Vorgänge mit Anordnungsbeziehungen (Tschickardt *et al.*, 2018, S.461).

Im Vortriebsmodell sprengt die Anzahl der Elemente und damit auch die Anzahl der Teilvorgänge den Rahmen für eine manuelle Zuordnung. Die automatische Berechnung der 4D-Simulation anhand von durchdachten Regeln würde den Aufwand deutlich reduzieren und ein ständiges Modifizieren der Modelldatenbank ermöglichen.

Weitere Untersuchungen über die Möglichkeiten einer automatisierten Erstellung von 4D-Simulationen auf Basis von BIM-Modellen wären überaus interessant, würden jedoch über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen.

Für den zeitlichen Verlauf des Tunnelvortriebs ist eine 4D-Visualisierung des Bauwerkmodells für die Detailablaufplanung sinnvoll. Im Zuge dessen kann die Koordination und Kooperation zwischen den Projektbeteiligten und den ausführenden Unternehmen verbessert werden (Tschickardt *et al.*, 2018).

In einer zeitlichen Gegenüberstellung des Soll-Ist-Zustandes können bei Abweichungen außerdem die Ursachen und Konsequenzen erörtert werden. Die Baufortschrittskontrolle dient neben der Analyse auch der zeitlichen Dokumentation des Bauprojekts (Tschickardt *et al.*, 2018, S.462).

Ein exemplarischer Vergleich der Bauzeit wird in Kapitel 5.2 anhand von tabellarischen Ergebnisdaten verschiedener Modelle durchgeführt.

4.5 Fazit bei der Umsetzung in iTWO

Die Softwareumgebung **iTWO 5D** integriert die **BIM**-Methode in vielen Aufgaben und Prozessen der **AVA**. Dabei ist die Vernetzung der Modellinformationen sowie deren kontinuierliche Visualisierung die zentrale Basis für die Kommunikation in allen Projektphasen und Anwendungsbereichen.

Gerade im vorgestellten System des Tunnelvortriebs stellt die durchgängige Auswertung verschiedener **BIM**-Modelle eines einheitlichen Standards ein mächtiges Werkzeug für die Kostensteuerung und das Controlling während der Projektausführung dar. Im Fokus steht dabei die Zeit, in der die erfassten Daten auf der Baustelle in ein zentrales System überführt und ausgewertet werden können.

Allerdings stellten sich in einigen Arbeitsschritten deutliche Erschwernisse bei der Implementierung des **BIM**-Systems in **iTWO 5D** ein. Einerseits ist diese Tatsache natürlich den abweichenden Modell- und Vertragsstrukturen im Tunnelbau geschuldet, da die Software **iTWO 5D** in erster Linie für den Hochbau entwickelt wurde. Andererseits liegen die Ursachen auch im eigenen Anspruch der vollautomatisierten Mengenauswertung und Informationsverknüpfung. Im Folgenden werden die zentralen Schwierigkeiten bei der modellorientierten Verknüpfung des Vortriebmodells in **iTWO 5D** aufgezeigt. Im Zuge von passenden Lösungsstrategien konnten die Probleme jedoch weitestgehend gelöst werden.

Hierarchiestruktur der Objekte: Wie in Kapitel 4.1 bereits beschrieben, lässt die standardmäßige Hierarchieordnung der Objekte im iTWO-Import keine strukturierte Mengen-, Zeit- und Kostenauswertung zu. Dieses Problem musste mit einem Programmcode für die „manuelle“ Umstrukturierung der **cpixML**-Datei umgangen werden.

Definition der Mengenabfrage: Die Oberfläche und die Syntax für die Mengenabfragen sind gut strukturiert im Ausstattungsmodule aufgebaut. Bei umfangreicheren Auswertungen der **BIM**-Datenbank werden die Abfragen und Gliederungsebenen schnell unübersichtlich und fehleranfällig. Die Folge ist ein erhöhter Arbeitsaufwand bei der Implementierung der Abfragedefinitionen.

Vorgangserstellung: Für die zeitliche Auswertung und die **4D**-Simulation in **iTWO 5D** wurde ein Vorgangsmodell aus den Modelldaten abgeleitet. Die automatische Erstellung der Einzelvorgänge lässt keine Regeldefinitionen für die Gliederung der Vorgangsstruktur zu. Andererseits können die Anordnungsbeziehungen von bestehenden Vorgängen nicht regelbasiert oder teilautomatisch erstellt werden. Demnach war zwar eine zeitliche Auswertung der Bauteilgruppen in iTWO möglich, die Definition einer gesamten **4D**-Simulation würde allerdings bei einer manuellen Verknüpfung von > 1000 Elementen den Rahmen sprengen. Die Generierung einer **4D**-Simulation auf Grundlage solcher Datenbasis wäre zum Beispiel mit der Software „Synchro Pro“ auf Grundlage der

Modellinformationen ohne größeren Aufwand möglich. (Tschickardt *et al.*, 2018, S.460 f.)

Im Kontext dieser Arbeit wurde soweit wie möglich ein automatisches System geschaffen, bei dem jede BIM-Datenbank, die den Anforderungen in der Projektumgebung entspricht, in iTWO 5D bezüglich Mengen, Zeit und Kosten ausgewertet werden kann. Jeder „manuelle“ Handgriff in der AVA-Software würde die durchgängige Neuberechnung behindern. Mit dieser Denkweise stößt man in iTWO 5D gerade im Vorgangsmodell noch an so manche Grenzen. In der Modellierungssoftware Revit wurden beispielsweise scheinbare Begrenzungen der Standardfunktionen durch die Programmierschnittstellen Dynamo und die Revit API erweitert. Obwohl auch diese Modellierungsumgebung im Kern für den Hochbau entwickelt wurde, lassen die Schnittstellen eine Entwicklung von Werkzeugen für andere Disziplinen und Strukturen zu.

Auch für die Software iTWO 5D wäre eine Erweiterung der Möglichkeiten über eine Programmierschnittstelle für Anwender von großer Bedeutung. Der Entwicklerzugang wird jedoch bisher nur ausgewählten Firmen zur Verfügung gestellt.

Um die Ergebnisdaten frei miteinander kombinieren und visualisieren zu können, wird die Software „Microsoft Excel“ im weiteren Verlauf der Arbeit herangezogen.

Kapitel 5

Auswertung und Gegenüberstellung verschiedener Systeme in Planung und Ausführung

Im Planungs- und Ausführungsprozess ergeben sich aus den Unsicherheiten des Baugrunds verschiedene Randbedingungen für die Definition des Vortriebmodells (Friebe *et al.*, 2017, S.5 f.).

Aus diesem Grund entstehen von der Planung bis zum tatsächlich realisierten Bauzustand unterschiedliche BIM-Modelle, die in Kombination mit der Arbeits- und Preiskalkulation zu verschiedenen Annahmen von Bauzeiten und Projektkosten führen.

Im vorliegenden Kapitel werden die gängigsten Systeme aus BIM-Modell und bauvertraglichen Grundlagen analysiert und gegenübergestellt, wenngleich die Anzahl an Möglichkeiten für sinnvolle Variantenuntersuchungen im Projektverlauf des Tunnelvortriebs deutlich größer ist.

5.1 Systemdefinitionen in den einzelnen Projektphasen

In den Kapiteln 2 und 3 wurden bereits relevante BIM-Modelle im Planungs- und Ausführungsprozess dargestellt. Aus der Kombination mit den bauvertraglichen Bestimmungen und Einflussparametern ergeben sich unterschiedliche BIM-Systeme, die eine Relevanz im Projektverlauf haben. Im Folgenden werden die Randbedingungen der gängigsten Systeme definiert, sodass die Basis für eine entsprechende Interpretation und Gegenüberstellung gegeben ist.

Soll-System

Auf Grundlage eines geotechnischen Berichts und eines tunnelbautechnischen Gutachtens wird eine Prognose der Vortriebsklassenverteilung vom Auftraggeber erstellt (vgl. Kapitel 2.1) (Friebel *et al.*, 2017, S. 6).

Das BIM-Modell mit der stationsbezogenen Einteilung der Vortriebsklassen bestimmt dabei einen Prognosezustand, der für die Berechnung der Ausschreibungsmengen und die Generierung der LV-Struktur verwendet wird. Das zugrundeliegende Modell entspricht dem sogenannten SOLL-Modell, da es den gewünschten Zustand nach bisher bestmöglichem Wissen abbildet.

Die Abschätzung der Einheitspreise und der zeitlichen Leistungsansätze erfolgt in diesem Stadium auf Grundlage vergleichbarer Projekte und Erfahrungswerte. Mit der Kombination von Prognosemenge und Zeit-, Kostenfaktor lässt sich eine Einschätzung über die zu erwartende Projektdauer und -kosten treffen.

Nachdem ein AN den Zuschlag für das Bauvorhaben erhalten hat, ergeben sich aus den Einheitspreisen und Leistungsansätzen vertraglich festgelegte Werte. Auf Grundlage dieser Kalkulation ergibt sich die vertragliche Soll-Vortriebsdauer (Regelvortrieb) und Soll-Kosten bei einer vorerst angenommenen Vortriebsklassenverteilung (Girmscheid, 2008).

Der AN ist allerdings in der Regel verpflichtet, seine Bieterangaben bei Mengenverschiebungen (z.B. geänderte Vortriebsklassenverteilung) bis zu einem bestimmten Grad zu garantieren (Friebel *et al.*, 2017, S. 13).

Letztendlich bildet der Soll-Zustand im Tunnelvortrieb also den prognostizierten Leistungsumfang mit den dafür vertraglich vereinbarten Einheitspreisen und mengenspezifischen Bauzeitfaktoren ab.

Soll"-System

In der Projektausführung können sich die jeweiligen Anteile der prognostizierten Vortriebsklassen infolge der tatsächlich festgestellten Baugrundverhältnisse verschieben. Das sogenannte Soll'-System bildet die tatsächliche Vortriebsklassenverteilung ab, woraufhin jedoch in den einzelnen Abschlüssen innerhalb einer Vortriebsklasse die Bauzeit und -kosten nach Regelvortrieb für Berechnungen angenommen werden. Erst in einer Soll"-Betrachtung wird ausgehend vom Soll' über Mehr- oder Mindermengen zum Regelvortrieb die tatsächlich ausgeführte Menge und die zu vergütende Leistung abgebildet (Friebel *et al.*, 2017, S. 7).

Da das BIM-Modell keine Betrachtung nach „Regelvortrieb“ im Ausführungsmodell (IST-Modell) zulässt und die einzelnen Abschlüsse die tatsächlich ausgeführten und abrechnungsrelevanten Mengen beinhalten (vgl. Kapitel 3), ist die Unterscheidung von Soll' und Soll" mit dem vorgestellten BIM-System nicht möglich.

Für den weiteren Verlauf wird daher nur das Soll"-System einbezogen, das die tatsächlich

ausgeführten Mengen (IST-Modell) in Kombination mit den bauvertraglichen Kosten- und Leistungsansätzen beinhaltet. Damit ist Soll" auch das Maß für die tatsächlich zu vergütende Leistung und die vertraglich relevante Bauzeit (Friebel *et al.*, 2017, S.7).

Ist-Zustand

Der Ist-Zustand entspricht bezüglich der Mengenbetrachtung dem IST-Modell. Allerdings wird hier die tatsächlich benötigte Zeit für die Vortriebsarbeiten abgebildet. Sie ist im Rahmen der regulären Abrechnung aber nicht relevant und erzeugt keine finanziellen Ansprüche des AN gegenüber dem AG (Friebel *et al.*, 2017, S. 7).

Für die Dokumentation und den tatsächlichen Verlauf des Projekts ist der Ist-Zustand allerdings essentiell und für die Projektsteuerung maßgebend.

5.2 Vergleich der BIM-Systeme von Planung und Ausführung

Die Abbildung aller Teilprozesse in Planung und Ausführung mit Hilfe der BIM-Methodik stellt baubegleitend ein unersetzbares Werkzeug für die Projektsteuerung dar.

Steuerungsprozesse beinhalten unter anderem die Tätigkeiten der Koordination, Initiierung und Steuerung. Bei der Projektsteuerung wird ausgehend von einem „Soll-Ist-Vergleich“ und anschließender Szenarienanalyse versucht, eine effiziente und optimierte Leistungserbringung hinsichtlich Kosten, Terminen und Qualität zu erbringen (Zimmermann, 2014, Kapitel 7, S. 15-22).

Hierbei ist der „Soll-Ist-Vergleich“ als die Gegenüberstellung der Planung und Ausführung zu verstehen. Der Vergleich liefert die zentrale Grundlage für den Entscheidungsvorgang von Maßnahmen jeglicher Art während des Baubetriebs.

Die BIM-Modelle des Tunnelvortriebs bilden zu jedem Projektzeitpunkt die Mengen aus Planung und Ausführung für jedes Element ab. Unter Berücksichtigung des Bauvertrages können, wie in Kapitel 4 beschrieben, die Bauzeit und -kosten baubegleitend, transparent und automatisiert aufgezeigt werden. Dabei kann jede Information bis auf ihren Ursprung in der geometriengebundenen Datenbank zurückverfolgt werden. Bei jedem Teilleistungsprozess kann auf diese Weise eine Analyse und Gegenüberstellung von erwarteter zu tatsächlicher Leistung durchgeführt werden.

Für das Prognosemodell wurde analog zu Kapitel 2 ein SOLL-Modell mit den entsprechenden Einbauteilen und Geometrien nach der Ausschreibungsplanung erstellt. Die Verknüpfung mit der Software iTWO 5D und der anschließenden Ermittlung von Bauzeit und -kosten (vgl. Kapitel 4) bildet den Soll-Zustand ab.

Die tatsächlich ausgeführten Mengen in der Projektrealisierung wurden auf Grundlage des Abschlagprotokolls in einem weiteren BIM-Modell erfasst. Die realisierte Menge in Kombina-

tion mit den vertraglich geregelten Faktoren für Kosten und zu vergütende Bauzeit werden unter dem Soll"-Zustand zusammengefasst.

Die Ist-Zeit wird im IST-Modell durch ein Datumsattribut aus dem Abschlagsprotokoll abgebildet. In einer detaillierteren Betrachtung lassen sich für den Ist-Zustand Vortriebsprotokolle (Felddokumentation der einzelnen Vortriebsprozesse) oder Maschinendaten heranziehen.

Im Folgenden wird anhand von verschiedenen Szenarien ein beispielhafter Vergleich zwischen den Modellen der einzelnen Projektphasen durchgeführt. Die Mengen, Kosten und Bauzeiten sind dabei an ein Praxisprojekt angelehnt, bei dem diese Methodik schon erfolgreich getestet wurde. Allerdings wurden die Werte aus datenschutzrechtlichen Gründen verändert und bilden damit nicht die tatsächlichen Projektdaten ab. Die Analyse und Interpretation erfolgt demnach auf Basis theoretischer Szenarien.

Soll-Soll"-Vergleich

Für den Steuerungsprozess der Projektkosten liegt das Hauptaugenmerk auf dem Vergleich zwischen den geplanten und bauvertraglich geregelten Baumaßnahmen sowie den tatsächlich durchgeführten und zu vergütenden Leistungsprozessen. Im Tunnelvortrieb werden diese beiden Zustände durch die Soll- und Soll"-Betrachtungsweise abgebildet.

Kosten

Projekt bezogene Soll- Soll'' Baukosten Verfolgung	EP	SOLL- SOLL''-Vergleich - Baukosten						
		Menge SOLL- Modell	ME	Menge IST- Modell	ME	Soll-Kosten	Soll''-Kosten	relative Kostenabweichung in %
Voreinschnitt Nord		Tunnelmeter zw.						
Tunnel Regelquerschnitt (RQ)		3,95m und ~40,00m				348.211,27 €	244.382,42 €	30%
Tunnelausbruch						96.142,03 €	100.107,65 €	4%
Abschnitt RQ, Kalotte vortrieb Nord								
Anschlagvorgang RQ Kalotte Nord	14.000,00 €		1,000 psch		1,000 psch	14.000,00 €	14.000,000 €	
Fahrschle Kalotte einbauen	7,00 €		490,680 m3		490,680 m3	3.434,76 €	3.434,760 €	0%
Ausbruch Kalotte VKL 6A-1, Teilflächen <=5 Stk.	30,00 €		0,000 m3		2446,089 m3	- €	73.382,670 €	100%
Ausbruch Kalotte VKL 6A-1 Teilflächen 6-10 Stk	31,00 €		0,000 m3		0,000 m3	- €	- €	0%
Ausbruch Kalotte VKL 7A-1, Teilflächen <=5 Stk.	27,50 €		1387,440 m3		0,000 m3	38.154,60 €	- €	100%
Ausbruch Kalotte VKL 7A-1 Teilflächen 6-10 Stk	28,00 €		1109,946 m3		0,000 m3	31.078,49 €	- €	100%
Sicherungsmittel						252.069,24 €	144.274,76 €	43%
Abschnitt RQ, Kalotte vortrieb								
Luftbogenstrecke herstellen Anschlagwand	21.000,00 €		1,000 psch		1,000 psch	21.000,00 €	21.000,000 €	
Spritzbeton einb., Ortsbrust, d=5 cm	0,70 €		0,000 m2		1908,000 m2	- €	1.335,600 €	100%
Spritzbeton einb., Ortsbrust, d=10 cm	1,30 €		2293,200 m2		0,000 m2	2.981,16 €	- €	100%
Spritzbeton einb., Tunnel d=30cm	50,00 €		596,520 m2		585,750 m2	29.826,00 €	29.287,500 €	2%
Spritzbeton einb., Kalottensohle d=30cm	36,00 €		476,280 m2		466,974 m2	17.146,08 €	16.811,064 €	2%
Ausbaubogen einb., 3-Gurt Gitterträger 95-20-30	1.900,00 €		7,452 t		6,210 t	14.158,80 €	11.799,000 €	17%
Selbstbohranker einb., Ortsbrust L = 12,0m	150,00 €		288,000 St		0,000 St	43.200,00 €	- €	100%
Lastverteilungsschiene einb., Ortsbrust	7,00 €		0,000 St		0,000 St	- €	- €	0%
Hüllrohrspieße einb., L = 6,0 m	60,00 €		1548,000 St		0,000 St	92.880,00 €	- €	100%
Hüllrohrspieße einb., L = 4,0 m	50,00 €		0,000 St		899,000 St	- €	44.950,000 €	100%
Gebirgsanker einbauen 6,0 m	80,00 €		72,000 St		58,000 St	5.760,00 €	4.640,000 €	19%
Bewehrung aus Betonst. herst.	1.500,00 €		15,768 t		8,662 t	23.652,00 €	12.993,000 €	45%
Bewehrung aus Betonst. herst.	1.100,00 €		1,332 t		1,326 t	1.465,20 €	1.458,600 €	0%

Abbildung 5.1: Vergleich der Baukosten von Soll-Modell und Soll''-Modell

In Abbildung 5.1 sind die Mengen und Baukosten aus dem SOLL- und IST-Modell in einem ausgewählten Projektzwischenstand gegenübergestellt.

Das SOLL-Modell wurde dabei mit der stationsbezogenen Vortriebsklassenverteilung bis zu Tunnelmeter 40 aufgefahren. Auf Grundlage der Abschlagsprotokolle für die ersten 40m wurde ebenfalls das IST-Modell generiert und die Mengen ausgewertet. Auf diese Weise erhält man eine vergleichbare Datengrundlage aus Planung und Ausführung.

Die grün markierten Spalten beinhalten eine Auswahl der Mengen, die untergliedert in die entsprechenden Teilleistungspositionen aus den Modellinformationen in iTWO 5D generiert wurden. Durch die Multiplikation der Teilmenge mit dem vertraglichen Einheitspreis entstehen die positionsbezogenen Kosten. Über den Vergleich zwischen SOLL-Modell und IST-Modell oder zwischen Soll-Kosten und Soll''-Kosten können Mengenverschiebungen im Tunnelverlauf nachvollzogen werden. Die relative Kostenabweichung gibt dabei ein Prozentmaß für den Unterschied zwischen der tatsächlich aufgefahrenen Positionsmenge und der prognostizierten Menge an.

Beispielsweise war im abgebildeten Szenario für den ersten Bereich die Vortriebsklasse „7A-1“ mit einer variablen Teilflächenanzahl prognostiziert. Tatsächlich wurde allerdings im gesamten Abschnitt die Vortriebsklasse „6A-1“ mit weniger als fünf Teilflächen verwendet. Die relative Kostenabweichung liegt demnach in allen betroffenen Positionen bei 100%.

In der Vortriebsklasse „7A-1“ werden erhöhte Sicherungsmaßnahmen bezüglich Spieße, Anker und Bewehrung eingeplant. Im realisierten Vortrieb konnte allerdings aufgrund der kleineren Vortriebsklasse auf einige Sicherungen verzichtet werden.

Durch die Mengenverschiebungen und die damit verbundenen Einheitspreise lässt sich eine deutliche Reduzierung der Kosten um etwa 30% für den ersten Tunnelabschnitt erkennen. Eine solche Gegenüberstellung lässt sich zu jedem Zeitpunkt im Projektverlauf mit dem BIM-System ohne großen Aufwand erzeugen. Die umgehend vorliegenden Ergebnisdaten unterstützen die Projektverantwortlichen bei Entscheidungsprozessen für den weiteren Projektverlauf und dem Kostenmanagement.

Bauzeit

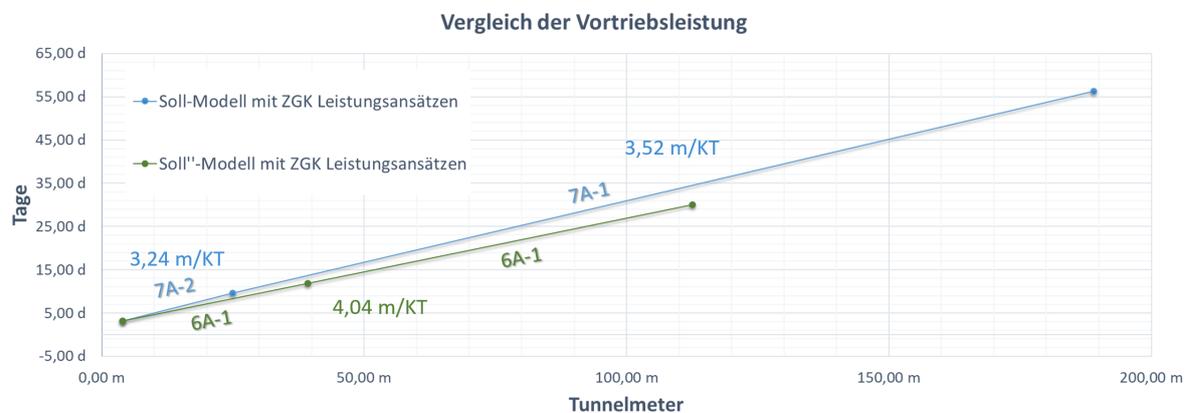


Abbildung 5.2: Vergleich der Bauzeit von Soll-Modell und Soll''-Modell

Die prognostizierte Vortriebsleistung setzt sich aus der angenommenen Vortriebsklassenverteilung und den bauvertraglichen Leistungsansätzen für die Ermittlung der zeitgebundenen Kosten zusammen. Die Berechnung der Bauzeit erfolgt also auf Basis des SOLL-Modells und den zeitlichen Bieterangaben. Die Vortriebsleistung dieses Soll-Systems ist in Abbildung 5.2 blau dargestellt.

Das Soll''-System berücksichtigt die tatsächliche Vortriebsklassenverteilung und damit die Mengenverschiebungen im Leistungsverzeichnis. Über die unterschiedlichen Leistungsansätze in den Teilleistungspositionen und den abweichenden Mengen zum SOLL-Modell kommt es auch zu einer theoretischen Verschiebung der Bauzeit. Das Soll''-System ist in Abbildung 5.2 grün dargestellt.

Aus den frei gewählten Annahmen für Ausbruchs- und Sicherungsmittel sowie den beispielhaften Leistungsansätzen ergeben sich theoretische Vortriebsgeschwindigkeiten (in Metern pro Kalendertag [m/KT]) von

6A-1: 4,04 m/KT, **7A-1:** 3,52 m/KT und **7A-2:** 3,24 m/KT.

Gemäß der vertraglich kalkulierten Leistung müsste der Vortrieb demnach durch die tatsächliche Verwendung der Klasse „6A-1“ für den Ausbau deutlich schneller erfolgen.

Außerdem ergeben sich für eine höhere theoretische Vortriebsleistung auf das Gesamtprojekt betrachtet geringere zeitgebundene Kosten.

Soll"-Ist-Vergleich

In einem weiteren Schritt wird die tatsächlich benötigte Bauzeit für die Vortriebsarbeiten der theoretischen Zeit gegenübergestellt.

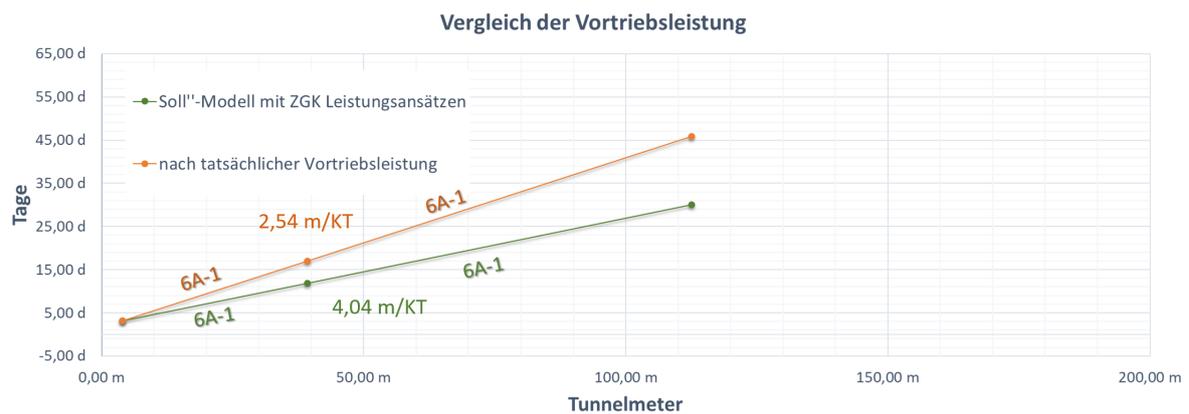


Abbildung 5.3: Vergleich der Bauzeit von Soll"-Modell und Ist-Modell

Die tatsächliche Dauer der Vortriebsarbeiten ist in Abbildung 5.3 durch die orangene Kurve abgebildet. Die einzelnen Punkte werden dabei aus den Informationen im Abschlagsprotokoll generiert. Der Tunnelmeter ergibt sich aus der Anfangs- und Endstationierung sowie die Anzahl der benötigten Tage aus der Differenz verschiedener Protokolle.

Das grüne Soll"-System ist identisch zur Abbildung 5.2.

Gegensätzlich zur theoretisch berechneten Leistung aus den Zeitansätzen im Bauvertrag verläuft die Kurve der tatsächlichen Vortriebsleistung deutlich oberhalb des Soll"-Systems. Mit einer Leistung von $2,54 \text{ m/KT}$ erfolgt der Vortrieb in diesem Beispiel deutlich langsamer, als die Dauerberechnung auf Grundlage der Mengen vermuten ließ.

Eine Minderleistung auf der Baustelle kann verschiedenste Ursachen haben. In diesem Fall wäre zum Beispiel denkbar, dass ein Vorgang im zyklischen Prozess des Tunnelvortriebs bedeutend mehr Zeit als ursprünglich angenommen in Anspruch nimmt.

Auch diese Erkenntnis kann für den Baubetrieb und die Entscheidungsprozesse der Verantwortlichen von Vorteil sein.

Durch eine weitere Aufschlüsselung der Vorgangsdauern kann der zyklische Vortrieb noch genauer analysiert werden. Mit den Positionsmengen eines Abschlags aus Abbildung 4.8 in Kombination mit den kalkulierten Leistungsansätzen lässt sich die theoretische Dauer in die Einzelvorgänge untergliedern.

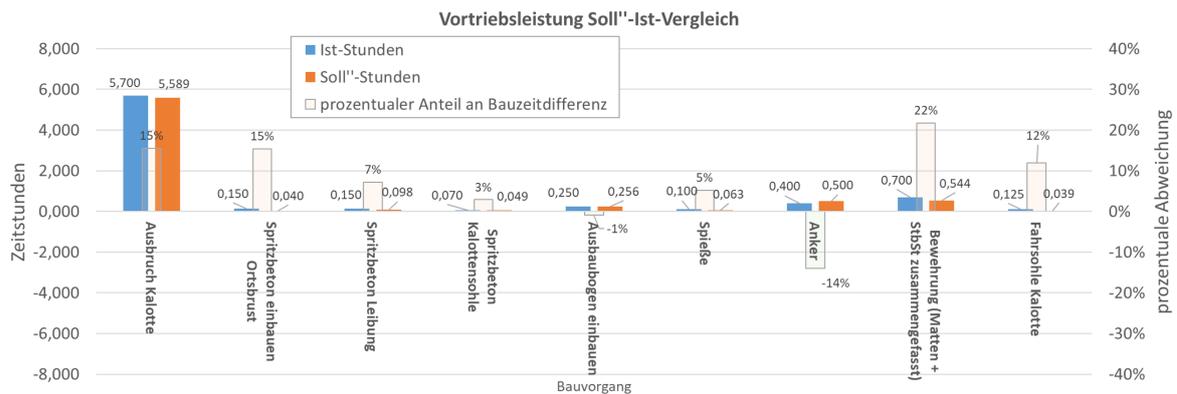


Abbildung 5.4: Aufschlüsselung der Mehr- oder Minderleistung in Einzelvorgänge

In Abbildung 5.4 bildet der orangene Balken die theoretische Bauzeit eines charakteristischen Elements der Vortriebsklasse „6A-1“ im Soll“-System ab, die in iTWO 5D anhand der Leistungsansätze berechnet wurden. Die beispielhaften Ist-Daten können auf Grundlage von Vortriebsprotokollen oder Maschinendaten vorgangsbasiert gewonnen werden. Bei der Gegenüberstellung der Zeitstunden für jede bauzeitrelevante Position lässt sich auf diese Weise ein prozentualer Anteil an der gesamten Bauzeitdifferenz/Mehr- oder Minderleistung berechnen.

Eine Interpretation der Zeitaufstellung muss mit großer Vorsicht erfolgen. Einerseits sind die Leistungsansätze und damit die theoretischen Vorgangszeiten kalkulatorischen Ursprungs und binden den Auftragnehmer nicht, die Zeiten für einen Einzelvorgang einzuhalten. Andererseits ist die Dokumentation und Definition der Ist-Stunden nicht klar geregelt. Selbst präzise Maschinendaten lassen bei Parallelvorgängen keine separate Betrachtung der Einzelvorgänge zu. Aus diesen Gründen ist aus Abbildung 5.4 nicht eindeutig ersichtlich, welcher Vorgang an einer Veränderung der tatsächlichen Bauzeit verantwortlich ist.

Nichtsdestotrotz ist die Gegenüberstellung des Zeitbedarfs für die relevanten Positionen auf dem kritischen Weg von höchstem Interesse für die Projektverantwortlichen.

5.3 Fazit bei der Analyse von Bauzeit und -kosten

Die vorgestellten Auswertungsmethoden bieten einen Einblick über die Ergebnisdaten, die im Zuge einer Modellauswertung in iTWO 5D entstehen.

Neben den vorgestellten Systemen aus Modell und Bauvertrag erzeugt die Analyse von weiteren Modellvarianten und Prognosen im Projektverlauf ebenso einen Mehrwert bei der Projektsteuerung.

Beispielsweise könnten während den Vortriebsarbeiten Mischsysteme aus bereits realisierten Bauzuständen und Prognosen nach neuestem Informationsstand im Projekt eine gute Grundlage für die Abschätzung von tatsächlichen Bauzeit und anfallender Kosten bieten. Ein solches

Szenario wäre jedoch deutlich interessanter in der Praxis statt in der Theorie zu behandeln und wurde deshalb in diesem Abschnitt nicht thematisiert.

Letztendlich können rein theoretisch die generierten Ergebnisdaten natürlich auch ohne die modellorientierte Auswertung berechnet werden. Allerdings liegt der Vorteil des vernetzten BIM-Systems ganz klar in der Schnelligkeit, Transparenz und Durchgängigkeit, mit der jedes Modell im Rahmen des Bauvertrags analysiert und ausgewertet werden kann.

Nach eigenen Erfahrungen kann eine manuelle Berechnung unter Umständen mehrere Wochen dauern.

Kapitel 6

Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die **BIM**-Methode als ein Werkzeug für die modellorientierte Ermittlung von Zeit und Kosten im Bereich des bergmännischen Tunnelvortriebs vorgestellt. Obwohl die Umgebung der Modellierungssoftware auf die Grundlagen des Hochbaus ausgerichtet ist, lassen sich mit adaptiven Familien und visuellen Programmierschnittstellen komplexe **BIM**-Datenbanken flexibel für jede Planungs- und Ausführungsphase abbilden.

Dabei wurden die räumlichen Modellelemente mit allen relevanten Informationen für die leistungsorientierte Mengenermittlung verknüpft.

Die zentrale Datenbasis erfordert im Kontext der Planungsphasen eine interdisziplinäre und vernetzte Arbeitsweise, bei der widersprüchliche Informationen umgehend offengelegt werden. Ist eine geometrische oder informative Angabe der Planung unklar oder unstimmig im Kontext des **BIM**-Gesamtsystems und passt damit nicht zur ursprünglichen Planung oder Bestimmung des Bauvertrags, wird für weitere Vorgehensweisen umgehend eine Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten forciert. Auf diese Weise lässt sich die Qualität und Transparenz im Planungsprozess steigern und reduziert den Interpretationsspielraum für etwaige Annahmen oder Lücken in Planung und Bauvertrag.

Für jedes **BIM**-Modell, das zur vorgegebenen Datenbankstruktur der Projektumgebung passt, können im Anschluss die resultierende Bauzeit und -kosten automatisiert und transparent ermittelt werden. Die Abbildung der zeitgebundenen Kosten gilt dabei als die größte Herausforderung, da sie zur Ermittlung die Stimmigkeit aller Informationen im Modell und der Mengenberechnung voraussetzen.

Die Analyse und Interpretation der Ergebnisdaten liefert eine gute Datengrundlage für die Steuerungs- und Entscheidungsprozesse im Projektverlauf.

Aus dem IST-Modell entsteht nach Fertigstellung des Vortriebs ein Bestandsmodell, das alle Ausbruchs- und Sicherungsmethoden in jedem Abschlag dokumentiert. Für den Projektnachlauf und den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks kann diese Datengrundlage noch eine tragende Rolle spielen.

Für die Weiterentwicklung des Systems ist es angedacht, alle anfallenden Dokumente und

Informationen im Ausführungsbetrieb mit entsprechenden Modellelementen direkt zu verknüpfen. Ortsbrustaufnahmen, Wartungs- und Abnahmeprotokolle, Mängelberichte oder Vermessungsdaten könnten somit für jedes Bauteil modell-gesteuert abgerufen werden (König *et al.*, 2017, S. 229).

Außerdem wäre es durchaus interessant, das vorgestellte BIM-System schon ab der Entwurfsplanung projektbegleitend mitzuführen, sodass sich die Methode in den Kontext der Gesamtplanung stellen lässt. Zu jeder Projektphase ließe sich dann analysieren, ob der Mehrwert und Nutzen von BIM den damit verbundenen zusätzlichen Aufwand rechtfertigt. Die Optimierung der Planung, Kalkulation und bauvertraglichen Abrechnung von Tunnelbau- und ähnlichen Tiefbaumaßnahmen wird sich durch die vorgestellte BIM-Methode allerdings nur dann für die einzelnen Parteien einstellen, wenn das System als ein zentrales Werkzeug zwischen allen Beteiligten im Projekt positioniert wird.

Anhang A

Digitaler Anhang

Bei der Abgabe werden dieser Arbeit folgende Dokumente in **digitaler Form** beigefügt:

- Erstelltes SOLL-Modell im IFC-Format
- Ein Zwischenstand eines charakteristische IST-Modells im IFC-Format
- Die vorliegende schriftliche Ausarbeitung im PDF-Format
- Python-Script für die Umstrukturierung der cpiXML-Datei

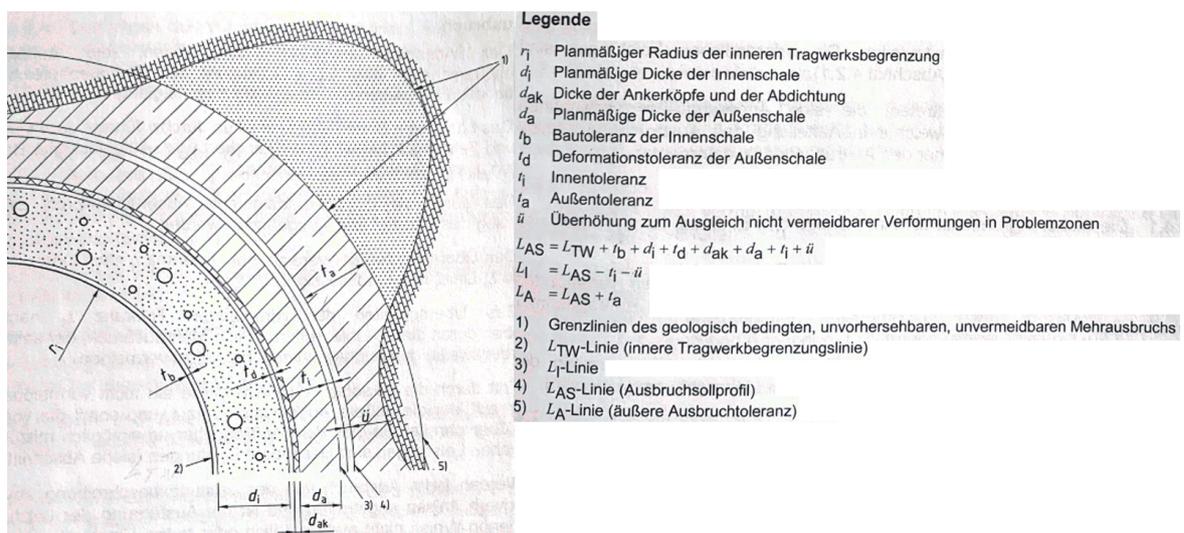


Abbildung A.1: Abbildung zur Norm Untertagebau, DIN 18312 (Deutscher Vergabe- und Vertragsausschuss für Bauleistungen, 2016, S.293)

Literaturverzeichnis

- Abedin, M. S. (2016, oct). *Anwenden von grafischen Programmiermethoden für die parametrische Brücken Modellierung und Generierung von Modellvarianten*. Master Thesis, Technische Universität Dresden.
- Allplan Schweiz AG (2016). ALLPLAN ENGINEERING IN DER PRAXIS: Der Tunnel der Superlative. https://www.allplan.com/fileadmin/user_upload/countries/switzerland-de/pdfs/references/CaseStudy_Gaehler_Gotthard-Basistunnel.pdf. Accessed: 2019-07-18.
- Autobahndirektion Südbayern (2018). B 16 - B 476 - OU Marktoberdorf und Bertoldshofen; BW 1-1 Tunnel Bertoldshofen: Baubeschreibung 17-54-02.
- Autodesk GmbH (2019, jul). Autodesk Knowledge Network. <http://help.autodesk.com/view/RVT/2018/DEU/?guid=GUID-6E0ECA27-AF40-4B1D-9E0B-1DE5FBBD45F2>. Accessed: 2019-07-18.
- Bernat, G., Brodbeck, A. & Maier, S. (2018). Methodischer Ansatz zur Mengenermittlung im Spezialtiefbau und Tunnelbau in offener Bauweise im BIM-Standard. In: *Tagungsband zum 29. BBB-Assistententreffen – Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Bauwirtschaft — Baubetrieb — Bauverfahrenstechnik*. Braunschweig. ISBN: 978-3-927115-81-1.
- b.i.m.m GmbH (2012). b.i.m.m PARAMETERTOOL 2013 - Benutzerhandbuch. https://bimm.eu/wp-content/uploads/2016/03/00205_b.i.m.m_ParameterTool_HANDBUCH_2013.pdf. Accessed: 2019-07-15.
- BMVI(Hrsg.) (2015). Stufenplan Digitales Planen und Bauen. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf>. Accessed: 2019-07-13.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C. & Beetz, J. (2015). *Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer Vieweg. Heidelberg. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C. & Beetz, J. (2018). *Building Information Modeling - Technology Foundations and Industry Practice*. Springer. ISBN: 978-3-319-92861-6.

- Brandt, T. & Franssen, S. (2013). *Basics Ausschreibung*. Basel: Birkenhäuser Verlag GmbH. ISBN: 978-3-03821-518-9.
- Breidenstein, M., Handke, D., Frieztzsche, W. & Gärtner, B. (2016, feb). Diskussionspapier zur Erarbeitung konfliktarmer Bauverträge im Tunnelbau. *Tunnel 1*, S. 7.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (2018, jan). *ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5*. Verlag Borgmann GmbH & Co KG.
- Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.(DGGT) (2017). *Tunnelbau 2017*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn. ISBN: 978-3-433-03168-1.
- Deutscher Vergabe- und Vertragsausschuss für Bauleistungen (2016). *VOB: Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen*. DIN: Deutsches Institut für Normung e.V. ISBN: 978-3-410-61293-3.
- dynamobim.org (2019). Dynamo Primer. <https://primer.dynamobim.org>. Accessed: 2019-05-31.
- Ehrbar, H. (2016). BIM BEI DER DEUTSCHEN BAHN: Herausforderungen für den digitalen Infrastrukturbau über- und untertags. In: *ETH Zürich, Kolloquium Untertagbau 1. Dezember 2016*. Zürich.
- Elwert, U. & Flassak, A. (2008). *Nachtragsmanagement in der Baupraxis Grundlagen - Beispiele - Anwendung*. Vieweg & Sohn Verlag. Wiesbaden. Germany. ISBN: 978-3-8348-0193-7.
- Flurl, M., Singer, D., Mundani, R.-P., Rank, E. & Borrmann, A. (2015, Jun). A Rule-based Collaborative Modelling System for Infrastructure Design. In: *Proc. of the 22th EG-ICE International Workshop*.
- Friebel, W., Biber, U., Eickmeier, D., Franz, S. & Gramer, J. (2017). *Leitfaden für die Behandlung von zeitgebundenen Kosten (ZGK) im Tunnelbau*. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Georgoula, V. (2019, mar). *Development of an Autodesk Revit Add-in for the Parametric Modeling of Bridge Abutments for BIM in Infrastructure*. Master Thesis, Technische Universität München.
- Girmscheid, G. (2000). *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH. ISBN: 3-433-01350-0.
- Girmscheid, G. (2008). *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau* (2 Aufl.). Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH. ISBN: 978-3-433-01852-1.

- Gruber, C., Weiner, T. & Zuchtriegel, R. (2018, aug). BIM for tunnelling for a company – Approaches and strategies. *Geomechanics and Tunnelling* 11, S. 366–373.
- Günthner, W. A. & Borrmann, A. (2011). *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen*. Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-16485-9.
- Hausknecht, K. & Liebich, T. (2016). *BIM-Kompendium: Building Information Modeling als neue Planungsmethode*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Interaktive Grafik Milde GmbH (2016). Datenaustauschformate für BIM. <https://www.igmilde.de/datenaustauschformate-fuer-bim>. Accessed: 2019-06-05.
- I.SBB(3) (2017). Modellbasierte LV-Erstellung mit iTWO 5D Kurzanleitung BIM–Methodik Digitales Planen und Bauen. <https://www1.deutschebahn.com/resource/blob/3217224/fb09e44728f65c8338f82e571fd01da6/Modellbasierte-LV-Erstellung-mit-iTWO-5D-data.pdf>. Accessed: 2019-06-17.
- Ji, Y. (2014, jul). *Durchgängige Trassen- und Brückenplanung auf Basis eines integrieren parametrischen 3D-Infrastrukturbauproduktmodells*. Dissertation, Technische Universität München.
- Jodl, H. G. (2012, dec). Tunnel projects require cooperation / Tunnelprojekte brauchen Kooperation. *Geomechanics and Tunnelling* 5, S. 702–707.
- Judmaier, G. & Zsifkovits, H. (2014). *Prozessstandardisierung in der Tunnelbaulogistik*. In: *Logistische Modellierung: 2. Wissenschaftlicher Industrielogistik-Dialog in Leoben (WiLD)*. Mering: Rainer Hampp Verlag München und Mering. ISBN: 978-3-95710-015-3.
- König, M., Rahm, T., Nagel, F. & Speier, L. (2017). BIM-Anwendungen im Tunnelbau: Digitale Planung und Ausführung von Tunnelbauprojekten. *Bautechnik* 4, S. 227–231.
- Linder, K. (2017, mar). *Geometrische Darstellung der As-Built Informationen eines maschinellen Tunnelvortriebs*. Bachelor Thesis, Ruhr-Universität Bochum.
- Maidl, B. (2004a). *Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 1* (3 Aufl.). Essen: Verlag Glückauf GmbH. ISBN: 3-7739-1331-1.
- Maidl, B. (2004b). *Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 2* (3 Aufl.). Essen: Verlag Glückauf GmbH. ISBN: 3-7739-1332-X.
- Miedel, F. (2014, sep). *Modellierung des Stadtbahntunnels Augsburg mit Hilfe von Siemens NX 9*. Bachelor Thesis, Technische Universität München.
- Mirtschin, J. (2011). Engaging generative BIM workflows. In: *Proceedings of LSAA 2011 Conference Collaborative Design of Lightweight Structures*.

- Müller-Salzburg, L. (2018). *Der Felsbau, Band 3 - Tunnelbau*. Berlin: Springer Spektrum. ISBN: 978-3-662-58197-1.
- Naumann, J. & Brem, G. (2004). Empfehlungen des Deutschen Ausschusses fuer Unterirdisches Bauen (DAUB) zu Planung und Bau von Tunnelbauwerken. *Tunnel* 4, S. 73–79.
- Papantonakis, D.-S. (2018, jan). *Entwicklung eines Konzepts zur Beschreibung der Level of Detail zur Anwendung der Building Information Modeling Methode für Tunnelbauwerke*. Master Thesis, Ruhr-Universität Bochum.
- Poppinga, H. (2013). *VOB im Bild - Tiefbau- und Erdarbeiten* (20 Aufl.). Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG. ISBN: 978-3-481-02994-4.
- RIB (2017). iTWO für AVA, Planung, Kostenmanagement Modellbasierte Projektsteuerung. https://www.rib-software.com/fileadmin/user_upload/service-support/downloads/iTwo/RIB-iTWO-Plänen-2017-WEB.pdf. Accessed: 2019-05-14.
- Ritter, F., Preidel, C., Singer, D. & Kaufmann, S. (2015). *Visuelle Programmiersprachen im Bauwesen: Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen*. Aachen, Germany: Proceedings of the 27th Forum Bauinformatik.
- Ruse, N. M. (2004). *Räumliche Betrachtung der Standsicherheit der Ortsbrust beim Tunnelvortrieb*. Stuttgart: Eigenverlag des Instituts für Geotechnik. ISBN: 3-921837-51-0.
- Scherer, J. R. & Schapke, S.-E. (2014). *Informationssysteme im Bauwesen 2: Anwendung*. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-44759-8.
- Schreyer, M. (2016). *BIM - Einstieg kompakt für Bauunternehmer*. Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin Wien Zürich. ISBN: 978-3-410-25702-8.
- Strotmann, H. (2018). *AVA – modellbasiert mit iTWO unter Verwendung eines Revitmodells*. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-23288-7.
- Thuro, K. & Plinninger, R. (2001). Bohren, Sprengen, Fräsen - Können die geologischen Faktoren der Gebirgslösung quantifiziert werden? *Felsbau* 19, S. 114–121.
- Tschickardt, T., Krause, D. & Akkermann, J. (2018). Entwicklung und Evaluation von BIM-4-D-Methoden am Beispielprojekt Gateway Gardens Los 2, Frankfurt/Main. *Bautechnik* 95 Heft 7, S. 453–462.
- Vilgertshofer, S. & Borrmann, A. (2016). A Graph Transformation Based Method for the Semi-Automatic Generation of Parametric Models of Shield Tunnels. In: *EG-ICE Workshop on Intelligent Computing in Engineering*. Krakow, Poland.
- Wagner, O. K., Gobiet, G. & Druckfeuchter, H. (2016, oct). Semmering Base Tunnel completely under construction – Geotechnical prediction transforms to framework plan / Der

-
- Semmering-Basistunnel: Von der geotechnischen Prognose zur tunnelbautechnischen Rahmenplanung. *Geomechanics and Tunnelling* 9, S. 382–390.
- Zhou, W., Qin, H., Qiu, J., Fan, H., Lai, J., Wang, K. & Wang, L. (2017). Building information modelling review with potential applications in tunnel engineering of China. *Royal Society Open Science* 4, S. 1–16.
- Zimmermann, J. (2014, Okt). Grundlagen prozessorientierter Planung und Organisation. Vorlesungsskript, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Ermittlung der Zeit und Kosten anhand von projektspezifischen Eingangsdaten	4
2.1	Geotechnischer Längsschnitt mit VKL Einteilung	7
2.2	Geotechnischer Längsschnitt mit stationsbezogener VKL-Einteilung	10
2.3	Detailelemente im Kalottenausbruch	12
2.4	Detailelemente im Strossen- und Sohlausbruch	14
2.5	Flow-Chart des Erstellungsscripts in Dynamo für das Soll-Modell	27
2.6	Visualisierung eines Teilabschnitts des Soll-Modells - Farben nach Vortriebs- klassen	28
2.7	Listenanpassungen in der Parametertabelle	30
2.8	geometrische Anpassungsmöglichkeiten in der Revit Familie	31
2.9	Kontrollquerschnitt für die Richtigkeitsprüfung des BIM-Modells	33
3.1	BEP für die Zusammenarbeit während der Projektausführung	35
3.2	Wahl der Vortriebsklassen im Tunnelbetrieb	39
3.3	Digitales Abschlagsprotokoll am Beispiel Abschlag Nr. 15	41
3.4	Dokumentenlauf Schema	43
3.5	Flow-Chart des Erstellungsscripts in Dynamo für das Ist-Modell	46
3.6	Charakteristische IST-Datenbank des Abschlags Nummer 15	47
4.1	Vergleich der hierarchischen Modellstrukturierung im Hochbau und Tunnel- vortrieb	52

4.2	Struktur im Leistungsverzeichnis für die Abrechnung der Sicherungsmittel	53
4.3	Ermittlung des Ausbruchsvolumen im Regelquerschnitt	56
4.4	Abwicklungen für die Mengenermittlung im Regelquerschnitt Kalotte	57
4.5	Mengenermittlung am Beispiel der Bewehrungsmatte aus Betonstahl	59
4.6	Transparenter Bezug im Leistungsverzeichnis zu den berechneten Teilmengen	62
4.7	Modellorientiertes LV mit Leistungsansätzen und ZGK	64
4.8	Modellorientierte Bauzeitermittlung für die Abrechnung der ZGK	65
5.1	Vergleich der Baukosten von Soll-Modell und Soll'-Modell	73
5.2	Vergleich der Bauzeit von Soll-Modell und Soll"-Modell	74
5.3	Vergleich der Bauzeit von Soll"-Modell und Ist-Modell	75
5.4	Aufschlüsselung der Mehr- oder Minderleistung in Einzelvorgänge	76
A.1	Abbildung zur Norm Untertagebau, DIN 18312 (Deutscher Vergabe- und Vertragsausschuss für Bauleistungen, 2016, S.293)	80