

Entwicklung eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells

Konzeptentwicklung und Anwendungsbeispiel

Hans Exenberger, BSc

Innsbruck, Oktober 2020

Masterarbeit

eingereicht an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für
Technische Wissenschaften zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Diese Masterarbeit ist der Vertiefungsrichtung „Baustoffe, Baubetrieb
und Projektmanagement“ des Masterstudiums
Umweltingenieurwissenschaften zugeordnet.

Beurteiler:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Matthias Flora

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Arbeitsbereich für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Matthias Flora
Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und
Materialwissenschaften, Arbeitsbereich für Baubetrieb,
Bauwirtschaft und Baumanagement

Mitbetreuer: Univ. Ass. Dipl.-Ing. Werner Gächter
Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und
Materialwissenschaften, Arbeitsbereich für Baubetrieb,
Bauwirtschaft und Baumanagement

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst geht mein Dank an meinen Betreuer Univ.-Prof. DI Dr. Matthias Flora, welcher Ideengeber für diese Masterarbeit war und mich fortlaufend mit hilfreichen Anregungen unterstützt hat.

Im Besonderen ein großes Dankeschön an DI Werner Gächter und DI Dr. Georg Fröch, die mir bei der Verfassung meiner Masterarbeit unermüdlich zur Seite gestanden sind.

Allen Beteiligten des Pilotprojektes Neubaustrecke Köstendorf-Salzburg und dabei speziell der Projektleitung der ÖBB-Infrastruktur AG für das Ermöglichen dieser Masterarbeit.

Meiner Freundin Corinna danke ich für ihre laufende Unterstützung während des Verfassens dieser Arbeit sowie das Korrekturlesen.

Abschließend möchte ich mich herzlich bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung erst ermöglicht haben.

Danke!

Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit war es, ein Konzept für ein digitales parametergestütztes Baugrundmodell zu liefern. Der Anwendungsschwerpunkt liegt dabei in der geotechnischen Planung für Untertagebauten.

Zuerst wird ein Überblick über die grundlegenden Methoden gegeben. Dies betrifft neben baugrundbezogenen Informationen zur Methode Building Information Modeling (BIM), auch die Beschreibung der derzeitigen analogen Herangehensweise in der geotechnischen Planung für Untertagebauten.

Mit dem Anwendungsbeispiel Neubaustrecke Köstendorf - Salzburg, einem BIM-Pilotprojekt der ÖBB, ist ausgelotet worden, inwieweit sich die geotechnische Planung bereits jetzt in einem digitalen Baugrundmodell abbilden lässt. Das Ergebnis ist ein Workflow zur Integration von standardisierten Parametern in ein Baugrundmodell, sowie eine layerbasierte Methode zur Einbringung von konkreten Werten. Es sind dabei explizite Werkzeuge und Workflows zur Umsetzung, mit gleichzeitig größtmöglicher Rücksicht auf bewährte Arbeitsweisen, angeführt.

Die Erkenntnisse aus dem Anwendungsbeispiel, verknüpft mit Anforderungen aus einschlägiger Literatur, haben zur Entwicklung des Konzeptes der Tunnelpixel geführt. Diese Form eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells basiert auf der Idee der kleinsten zu modellierenden Einheit – dem Tunnelpixel. Diese automatisiert erstellten, parametrisierten Pixel ermöglichen eine flexible Zuordnung sämtlicher bauprozessrelevanter Baugrundeigenschaften. Weiters ist eine Darstellung der Gebirgs- und Homogenbereiche sowie Tunnelabschnitte ohne weitere Modellerschritte, möglich. Durch die große Variabilität dieses Konzeptes, ist eine Erweiterung über den aufgezeigten Umfang hinaus vorstellbar.

Abstract

This thesis pursues the aim of integrating the digital processes of building information modeling (BIM) into a digital ground model. The scope therefore lies within the geotechnical design of underground structures.

It begins with an overview of fundamental methods within the research area. These include subsoil-related informations regarding the method BIM as well as the currently used analogue methods for the geotechnical design of underground structures.

The BIM pilot project of the Austrian Federal Railways, Neubaustrecke Köstendorf - Salzburg, was then used to gather knowledge, how the geotechnical design process can already be implemented into a digital ground model. This lead to creating a workflow which demonstrates a way to integrate standardised parameters and layer-based specific properties in a ground model. Doing so, precise and – more importantly – currently available tools were used whilst still trying to integrate proven workflows as much as possible.

Taking these findings and linking them with specifications for a digital ground model from the relevant literature, the concept of the Tunnelpixel was created. Coming from the requirement of the smallest unit to be modelled, these automatically created Tunnelpixel allow for flexible mapping of all relevant subsoil-parameters needed for construction. Furthermore, the concept facilitates the option to represent ground zones, homogeneous areas and tunnel sections, without the need for further modeling. Due to the flexibility and variability of this concept, it can be seen as a basis for further enhancements and research.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Thema	1
1.2 Ausgangssituation	1
2 Ausgangssituation und Grundlagen	3
2.1 Building Information Modeling - BIM	3
2.1.1 Allgemeines zu BIM im Infrastrukturbau	3
2.1.2 Auftraggeber Informationsanforderungen - AIA	4
2.1.3 BIM-Abwicklungsplan - BAP	5
2.1.4 Fachmodelle und Ausarbeitungsgrad	5
2.1.5 Datenaustausch	7
2.2 Normen	10
2.2.1 Normen mit BIM-Bezug	10
2.2.2 Normative Grundlagen für den Baugrund im Tunnelbau .	11
2.3 Derzeitige analoge geotechnische Planung	12
2.3.1 Geotechnisch relevante Parameter	14
2.3.2 Bestimmung der Gebirgsarten	14
2.3.3 Bestimmung des Gebirgsverhaltens	15
3 Anwendungsbeispiel KÖSA	19
3.1 Ausgangssituation	20
3.2 Prozess der Vorgangsweise	20
3.3 Grundlagendaten	21
3.3.1 Tunnelachse und Querprofil	22
3.3.2 Baugrundsichtenmodell	22
3.3.3 PSETs und Eigenschaften	24
3.4 Modellierung	28
3.4.1 Tunnelumhüllende	28
3.4.2 Tunnelausbruch	29
3.5 Parametrisierung	30
3.5.1 Parametrisierung des Baugrunds	30

3.5.2	Einbringung konkreter Werte	33
3.6	Auswertung	35
3.7	Ergebnisse des Anwendungsbeispiels	38
3.7.1	Gewonnene Erkenntnisse	38
3.7.2	Optimierungspotentiale	40
4	Entwicklung eines digitalen Baugrundmodells	43
4.1	Konzeptgrundlagen	44
4.2	Konzeptionelle Umsetzung	46
4.3	Vorteile	51
4.4	Anwendungsfälle	53
	Zusammenfassung und Ausblick	55
	Zusammenfassung	55
	Ausblick	56
	Literaturverzeichnis	57
	Anhang	59

Abbildungsverzeichnis

2.1	LOIN des Bauwerksmodells im maschinellen Vortrieb	7
2.2	BIM-Einsatz Matrix	8
2.3	Entwicklungsrahmen IFC 5	9
2.4	Einordnung der Klasse <i>IfcGeotechnicalElement</i> in die IFC-Struktur inklusive der geplanten Subklassen	9
2.5	Schematischer Ablauf der geotechnischen Planung	13
3.1	Gesamte Prozessgrafik der Vorgangsweise	21
3.2	Grundlagen im Prozess	22
3.3	Detailansicht des Baugrundsichtenmodells	23
3.4	Teilung des Baugrundsichtenmodells in Gebirgsbereiche	24
3.5	Drei am MMS abgebildete Komponenten als Test-PSETs für das Anwendungsbeispiel inklusive der jeweiligen Parameter	26
3.6	Modellierung im Prozess	28
3.7	Umhüllende Fläche eines Tunnelabschnittes	29
3.8	Gesamte Umhüllende eines Tunnelabschnittes	29
3.9	Teiltunnelausbruch im Baugrundsichtenmodell	30
3.10	Abschnitt des Tunnelausbruchs als Volumenkörper	30
3.11	Parametrisierung im Prozess	30
3.12	Startfenster des European BIM Standards Tool	31
3.13	Abrufen der Inforamations-Anforderungen vom MMS	31
3.14	Zuordnung der PSETs zu den Autodesk Civil 3D [®] Bauteilkategorien	32
3.15	Erzeugung des PSET <i>Koesa_Pset_GeotechnicalStratum</i> für die DXF-Klasse 3D-Volumenkörper	32
3.16	Hinzufügen eines PSET in Autodesk Civil 3D [®]	33
3.17	Prozess zum Hinzufügen der konkreten Werte	33
3.18	Autodesk Civil 3D [®] - Eigenschaften eines Tunnelausbruchskörpers, dem alle drei Test-PSETs zugefügt sind	35
3.19	Auswertung in der Prozessstruktur	35
3.20	BIM-Prozessschema des Zusammenwirkens von MMS, Parameter und Modell	39
4.1	Relevante Schritte aus dem schematischen Ablauf der geotechnischen Planung	45
4.2	Vereinfacht dargestellter Prozess als Grundlage für die Konzeptentwicklung	46
4.3	Konzept zur Umsetzung der Tunnelpixel	47

4.4	Detaildarstellung eines Tunnelpixels	48
4.5	Sonderfall mehrerer Tunnelabschnitte im selben Gebirgsbereich . . .	49

Tabellenverzeichnis

2.1	Übergeordnete Kategorien von Gebirgsverhaltenstypen	16
2.2	Mindestangaben für jeden Gebirgsverhaltenstyp	17
3.1	Zuordnung der projektinternen Gebirgsarten zu den definierten Gebirgsbereichen	27
3.2	Zuordnung der GVTs und des Ortsbrustverhaltens zu definierten Gebirgsbereichen	27
3.3	Ausschnitt einer Excel Tabelle zum Befüllen eines PSET mit konkreten Werten	34
3.4	Auswertung der Gesamtausbruchsmassen je Gebirgsbereich und Bau- grundsicht inklusive Gebirgsartenparameter	36
3.5	Verteilung der Gebirgsverhaltenstypen je Homogenbereich inklusive dazugehörige Gesamtvolumen	37
3.6	Kategorisierte Betrachtung des Anteils einzelner GVT-Kombinationen am Gesamtvolumen	37
3.7	Verteilung des Ortsbrustverhaltens je Homogenbereich	38
3.8	Kategorisierte Betrachtung des Anteils einzelner Ortsbrustverhaltens- kombinationen am Gesamtvolumen	38

Abkürzungsverzeichnis

AIA	Auftraggeber-Informationsanforderungen
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BIM	Building Information Modeling
CEN	European Committee for Standardization
DACH	Deutschland, Österreich, Schweiz
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen
DB	Deutsche Bahn
EBIM	European BIM Standards Tool
FFG	Forschungsförderungsgesellschaft
GVT	Gebirgsverhaltenstyp
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
IFC	Industry Foundation Classes
iim	Infrastruktur-Informationsmodell
i3b	Arbeitsbereich für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement
KÖSA	Neubaustrecke Köstendorf - Salzburg
LOD	Level of Development
LOG	Level of Geometry
LOI	Level of Information
LOIN	Level of Information Need
MMS	Merkmalsserver
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
PSET	Property Set
SBB	Schweizer Bundesbahnen
SSOT	Single Source of Truth
TIM	Tunnel Information Modeling
TVM	Tunnelvortriebsmaschine
UIBK	Universität Innsbruck
UVE	Umweltverträglichkeitserklärung

Gender Erklärung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Masterarbeit die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll.

1 Einleitung

„Es ist keine Frage mehr, ob BIM kommt oder nicht, sondern nur wie schnell und wie durchgehend.“ [21]

An Building Information Modeling (BIM) führt in der Baubranche kein Weg mehr vorbei, wie dieses Zitat von Univ.-Prof. Christoph M. Achhammer zeigt. In einigen Bereichen ist es bereits etabliert, in vielen Teilgebieten wird mit Nachdruck an einer Implementierung gearbeitet und nur mehr die Allerwenigsten verschließen sich komplett vor dem Thema. Um diese Transformation der gesamten Baubranche in das digitale Zeitalter mit einem Beitrag zu unterstützen, widmet sich diese Arbeit der Entwicklung eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells. Sie entsteht im Rahmen der Lehrveranstaltung „Angewandter Tunnelbau“ und ist dem Spezialgebiet der FFG-Stiftungsprofessur für Tunnel Information Modeling (TIM) zugeordnet.

1.1 Motivation und Thema

Die Motivation für diese Arbeit gründet sich einerseits in dem Interesse des Autors am grundlegenden Thema des Tunnelbaus und andererseits an der omnipräsenten, fortschreitenden Digitalisierung im Bauwesen, die in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen wird. Mit der FFG-Stiftungsprofessur für Tunnel Information Modeling an der Universität Innsbruck (UIBK) hat sich die Verknüpfung genau dieser beiden Themenbereiche ergeben und Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Matthias Flora wurde als Betreuer für diese Arbeit gewonnen. Ziel der Arbeit ist es, ein digitales Baugrundmodell zu entwickeln, das neben geometrischen Daten auch semantische Daten geologischer und geotechnischer Natur beinhaltet. In Hinblick auf die Entwicklung eines digitalen Infrastruktur-Informationsmodells ist ein solches digitales parametergestütztes Baugrundmodell, neben den Teilmodellen für das Bauwerk und die Baustelle, einer von drei wesentlichen Grundpfeilern. [24]

1.2 Ausgangssituation

Diese Arbeit baut auf der Masterarbeit von DI Florian Harpf „BIM-basierte Massenermittlung als Grundlage für die Kalkulation im Infrastrukturbau“ auf, welche in einer Kooperation mit dem BIM-Pilotprojekt der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) für die Neubaustrecke Köstendorf - Salzburg (KÖSA) entstanden

ist. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass jene Grundlagen und Vorgehensweisen, die in der Masterarbeit von DI Harpf ausführlich dokumentiert und beschrieben sind, in dieser Arbeit nur teilweise und der Vollständigkeit halber aufgeführt werden. Für alles andere sei auf „BIM basierte Massenermittlung als Grundlage für die Kalkulation im Infrastrukturbau“ verwiesen. [29]

In ähnlicher Art und Weise wurde für diese Arbeit eine Kooperation mit dem BIM-Pilotprojekt KÖSA der ÖBB eingegangen, um das gewählte Thema praxisnah auszuarbeiten und die Möglichkeit zu nutzen, die Ergebnisse direkt in einem realen Projekt anzuwenden und validieren zu können. Diese Herangehensweise hat sich bewährt, da beide Seiten – Wissenschaft und Praxis – davon profitieren und ein Mehrwert generiert werden kann. Somit ist diese Thesis als Fortführung dieser erfolgreichen Arbeit, am Arbeitsbereich für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement (i3b), zu sehen.

Der thematische Schwerpunkt dieser Arbeit liegt folglich auf der Entwicklung eines Baugrundmodells für eine transparente Anwendung im Tunnelbau. Die Methode, die entwickelt werden soll, beschränkt sich jedoch nicht auf diese Anwendung, sondern versteht sich als Vorschlag für den gesamten Infrastrukturbau. In diesem ist die Interaktion vom Baugrund mit der Oberfläche und den zu errichtenden Bauwerken von enormer Bedeutung. Darin liegt einer der wesentlichen Unterschiede zwischen der Anwendung der BIM-Methode für Hochbau- oder Tiefbauprojekte. Ein weiteres Spezifika des Infrastrukturbaus ist die lineare, geografische Ausdehnung mit all den damit verbundenen Schwierigkeiten, wie die notwendige Aufteilung in zusammenhängende Teilmodelle oder die Integration eines geografischen Bezugssystems. [25]

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die genannten Themen wissenschaftlich zu bearbeiten.

Sämtliche in dieser Arbeit verwendeten Markennamen und Markenzeichen sind Eigentum der jeweiligen Markeninhaber.

2 Ausgangssituation und Grundlagen

Eingangs wurde erwähnt, dass das Basiswissen in „BIM basierte Massenermittlung als Grundlage für die Kalkulation im Infrastrukturbau“ bereits ausführlich erörtert wurde. Ergänzend dazu sind in den nachfolgenden Kapiteln einige grundlegende Erläuterungen, Definitionen und Normen weiter ausgeführt. Begonnen wird mit einigen Grundlagen zur Methode BIM, die unter anderem die Themen Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA), BIM-Abwicklungsplan (BAP), Fachmodelle und auch die Problematik des Datenaustausches behandeln. Darauf aufbauend werden die derzeitigen normativen Regelungen, vor allem mit Bezug zu Österreich, analysiert. Das letzte Kapitel beschreibt die derzeitige Vorgehensweise bei der geologischen und geotechnischen Planung im Tunnelbau, für die mit dieser Arbeit eine moderne digitale Lösung – dem digitalen parametergestützten Baugrundmodell – erarbeitet wird. [29]

2.1 Building Information Modeling - BIM

2.1.1 Allgemeines zu BIM im Infrastrukturbau

Als grundlegende Definitionen für BIM seien an dieser Stelle zwei Zitate angeführt. Flora et al. schreiben in „Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle“:

„Building Information Modeling [...] bedeutet im Wesentlichen, möglichst viele Prozesse im Lebenszyklus von Bauwerken unter Zuhilfenahme von digitaler Bauwerksmodellierung abzuwickeln.“ [24, S. 2]

Und im Teil 1 der Handreichungen und Leitfäden der deutschen BIM4INFRA2020 steht geschrieben:

„BIM steht für eine zunehmend an Bedeutung gewinnende Arbeitsmethode im Bauwesen, bei der Projektbeteiligte ihre Leistungen mit oder aufgrund digitaler Daten erbringen. Digitale Daten sind hierbei in der Regel geometrische, bauteilorientiert modellierte 3D-Modelle (BIM-Modelle), die mit weiteren Informationen, etwa zu Material, Beschaffenheit, Terminen und Kostenkennungen oder für den späteren Betrieb verknüpft sowie angereichert werden.“ [13, S. 8]

In vielen Ländern gibt es seit geraumer Zeit Vorgaben, um die Umsetzung dieser Arbeitsmethode zu erreichen. Diese Vorgaben reichen von Handlungsempfehlungen, wie sie in Österreich in Form der noch relativ unkonkreten *Roadmap Digitalisierung* vorliegen, bis hin zu den zehnteiligen *Handreichungen und Leitfäden* der deutschen BIM4INFRA 2020, welche das Ergebnis des *Stufenplan Digitales Planen und Bauen* vom deutschen Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur darstellen und sehr ausführlich ausgearbeitet sind. Im DACH-Raum haben sich daraufhin viele Initiativen gebildet, um sich den gesteckten Zielen in möglichst vielen Pilotprojekten anzunähern und in weiterer Folge die Umsetzung für die gesamte Branche zu vereinfachen. Diese Forschungsprojekte reichen von BIM-Pilotprojekten der großen Infrastrukturbetreiber, wie den ÖBB und der Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG) in Österreich oder der Deutschen Bahn (DB) und der Schweizer Bundesbahnen (SBB) bis hin zu Initiativen in Städten wie Hamburg, welche einen eigenen Leitfaden zur Implementierung von BIM entwickelt hat. [5, 13, 28]

Das erklärte gemeinsame Ziel all dieser Initiativen ist es, die nötige Erfahrung mit BIM-Pilotprojekten aus verschiedenen Projektphasen zu sammeln, um die Umsetzung auf möglichst viele Projekte auszurollen. In Deutschland wurden im Rahmen des *Stufenplans Digitales Planen und Bauen* BIM-Anwendungsfälle definiert, die in weiterer Folge in der Handreichung - Teil 06 genauer beschrieben sind. Darauf aufbauend wurden in Deutschland Projekte für jeden dieser BIM-Anwendungsfälle durchgeführt. [16]

Die grundlegende Anwendung der BIM-Methode ist in all diesen Fällen des Infrastrukturbaus jedoch dieselbe, wie sie bereits im Hochbau erprobt ist. Dem Willen zur Optimierung des Lebenszykluses und dem daraus resultierenden holistischen Ansatz der Lebenszyklusbetrachtung kommen aufgrund der hohen Lebensdauer von Infrastrukturprojekten – dazu sei die geplante Lebensdauer aktueller Tunnelbauprojekte mit 200 Jahren genannt – eine besonders hohe Bedeutung zu. Gerade bei diesen Projekten kann ein digitaler Zwilling enorme Vorteile für Instandhaltungskonzepte und Ähnliches bereithalten. [24]

Zur genaueren Definition einer projektspezifischen Anwendung der Methode BIM sind vorab und laufend grundlegende Regeln und Definitionen niederzuschreiben. Daraus resultieren zwei Dokumente, welche in den nächsten beiden Kapiteln genauer beschrieben werden.

2.1.2 Auftraggeber Informationsanforderungen - AIA

Die Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA) sind vereinfacht gesagt alle BIM-bezogenen Anforderungen eines Auftraggebers an einen potentiellen Auftragnehmer. Sie sind Teil der Ausschreibung und die geforderten BIM-Leistungen sind, angepasst an die Projekt- und Vergabeart, bereits sehr detailliert zu beschreiben. Weiters ist es erforderlich jene BIM-Anwendungsfälle, welche zur Ausführung kommen, entsprechend genau zu definieren. Durch eine teilweise Zuordnung der BIM-Anwendungsfälle zu den Leistungsphasen gemäß der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI), wird unter anderem die Abrechnung erleichtert. [14]

Die AIA beschreiben somit, welche die genauen vertraglichen Festlegungen sind,

die einen Werkerfolg des Auftragnehmers beschreiben. Dabei gibt es drei verschiedene Ansätze zur Beschreibung. [13, 14]

- Die *funktionale Beschreibung*, bei der keine genauen Angaben zu geometrischer und semantischer Ausführung von Modellelementen gemacht werden, sondern eine Beschreibung der Aufgaben und Funktionen, welche Modellelemente zu erfüllen haben, erfolgt. Dabei ist es Aufgabe eines Auftragnehmers, sinnvolle und nachvollziehbare Levels of Information vorzuschlagen. Dadurch wird eine enge Abstimmung zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber zu Projektbeginn zwingend erforderlich.
- Bei der *semi-detaillierten Beschreibung* ist die Vorgehensweise ähnlich zur funktionalen Beschreibung, mit dem Zusatz, dass für kritische Modellelemente eine genau Vorgabe zur Klassifikation und Attribuierung gemacht wird.
- Wird der Ansatz einer *detaillierten Beschreibung* gewählt, so sind vom Auftraggeber Vorgaben zu Objekttypen, Klassifikation, Attribuierung und geometrischer Detaillierung erforderlich. Dem Auftragnehmer fällt dabei die Aufgabe zu, die Informationsanforderungen zu überprüfen und nachzuweisen wie diese in der Ausführung erreicht werden können.

Zusammengefasst, entsprechen die AIA einem Lastenheft im Ausschreibungswesen. [24]

2.1.3 BIM-Abwicklungsplan - BAP

Der BIM-Abwicklungsplan (BAP) ist als Konkretisierung der Vorgaben aus den AIA zu sehen und wird in der Regel nach Vertragsabschluss erstellt. Damit wird geklärt, wie die BIM-basierte Zusammenarbeit und die darauf aufbauende Projektabwicklung realisiert werden kann.

Konkret wird der BAP vor allem in Hinblick auf die methodische Zusammenarbeit in allen BIM-Belangen, aber speziell bei der Festlegung von einzelnen Abläufen. Die verschiedensten Vertragsvarianten lassen prinzipiell sowohl eine Vorgabe des BAP durch den Auftraggeber zu, als auch eine Erstellung des BAP durch den Auftragnehmer und kann auch aus standardisierten Vorlagen bestehen. In allen Fällen kann es eine vertragliche Vereinbarung über eine Weiterentwicklung und Konkretisierung während der Umsetzungsphase geben. Die ständige Fortschreibung ermöglicht es, die laufend gesammelten Erfahrungen und Beobachtungen mitaufzunehmen und damit den BAP projektspezifisch zu entwickeln und aktuell zu halten. [13, 15]

In Anlehnung an die zusammenfassende Definition der AIA kann der BAP als Pflichtenheft im Sinne des Ausschreibungswesen gesehen werden. [24]

2.1.4 Fachmodelle und Ausarbeitungsgrad

Um eine Gesamtdarstellung im Sinne eines zentralen Bauwerksmodells zu erreichen, wird auf Fachmodelle für die einzelnen Planungsdisziplinen zurückgegriffen, die in einem zentralen Koordinationsmodell zusammengefasst sind. Damit die Zusammenarbeit mit diesen Fachmodellen einwandfrei funktioniert,

ist es essentiell, sich zu Projektbeginn auf Modellierungsregeln zu verständigen, welche im BAP festgehalten werden. Dazu zählen unter anderem grundlegende Definitionen wie ein einheitlicher Projektursprung mit dazugehörigem Koordinatensystem, simple Festlegungen, wie die zu verwendenden Maßeinheiten oder Überlegungen, zu definierten Referenzpunkten für Teilmodelle. Außerdem gibt es von Beginn an festzulegen, wie diese Fachmodelle in Koordinationsmodellen zu deren Prüfung zusammengeführt werden. [17]

Die Art des jeweiligen zur Anwendung kommenden Fachmodells ist bei jedem Projekt unterschiedlich. Ebenso gilt es deren Unterteilung und Gruppierung bei jedem Projekt neu zu eruieren. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Baugrundmodell, welches in Kapitel 4 ab Seite 43 ausführlich erläutert wird.

Flora et al. haben weiterführend die Idee eines Infrastruktur-Informationsmodells (iiMs) entwickelt. Dieses iiM besteht zumindest aus den drei Teilmodellen für Baugrund, Bauwerk und Baustelle. Diese werden nicht als abgeschlossene Modelle erzeugt, sondern sind über die verschiedenen Lebenszyklusphasen hinweg miteinander verknüpft auszuführen. Die Autoren sehen die Vorteile eines solchen Modells nicht nur bei der besseren Beherrschbarkeit von Interferenzen, sondern vor allem bei der vernetzten und integralen Planung, dem besseren Schnittstellenmanagement aber auch bei der verbesserten Auswertung von gesammelten Daten, die derzeit mitunter in einem Datenfriedhof münden, anstatt sinnvoll verwendet zu werden. [24]

Zusätzlich zur Definition der benötigten Fachmodelle, ist die Festlegung eines Ausarbeitungsgrades für jedes Fachmodell je Projektphase nötig. In den *Handreichungen und Leitfäden* der deutschen BIM4INFRA 2020 definiert sich der Ausarbeitungsgrad über das Level of Development (LOD). Dessen genaue Ausgestaltung ist im AIA festgelegt. Das LOD wiederum setzt sich aus dem Level of Geometry (LOG) und dem Level of Information (LOI) zusammen. Das LOG ist grob an die Leistungsphasen und deren steigende Maßstabsgenauigkeit gekoppelt und wird ausgehend von einer symbolischen Darstellung immer genauer und detaillierter. Wie im Kapitel 2.1.2 bereits beschrieben, sind die Informationsanforderungen in den AIA festgelegt und spiegeln sich in dem LOI wider. Ähnlich zu den LOGs wird das LOI bei fortschreitender Projektphase zunehmend detaillierter. Der Grundsatz dabei lautet, je Leistungsphase so viel Information wie nötig, aber so wenig wie möglich zu definieren. [17]

In Anlehnung an die Schweizer Definition für die Informationsanforderung, dem Level of Information Need (LOIN), die zunehmend die Bezeichnung des Level of Development ablöst, haben Flora et al. für ihren iiM-Ansatz Projektphasenmodelle entwickelt. Diese beginnen bei Konzeptmodellen, gehen über Entwurfs-, Genehmigungs- und Ausführungsmodelle bis hin zu as-built Modellen und sind von den Autoren beispielhaft in Abbildung 2.1 für das Bauwerksmodell im maschinellen Tunnelvortrieb dargestellt. Eine solche Definition existiert für das Baugrundmodell noch nicht, wird aber ein wesentlicher Teil der weiteren Umsetzung des iiM. Kurz vor Fertigstellung dieser Arbeit ist mit Herausgabe des Normen-Entwurfs prEN17412-1:2000 die Festlegung zur Verwendung eines Level of Information Need zur Definition der Informationsanforderung getroffen worden. Zukünftig wird somit eine Anpassung an diese neue Definition nötig sein. [1]

LOIN im maschinellen Vortrieb - Schemadarstellung (Level of Information Need)

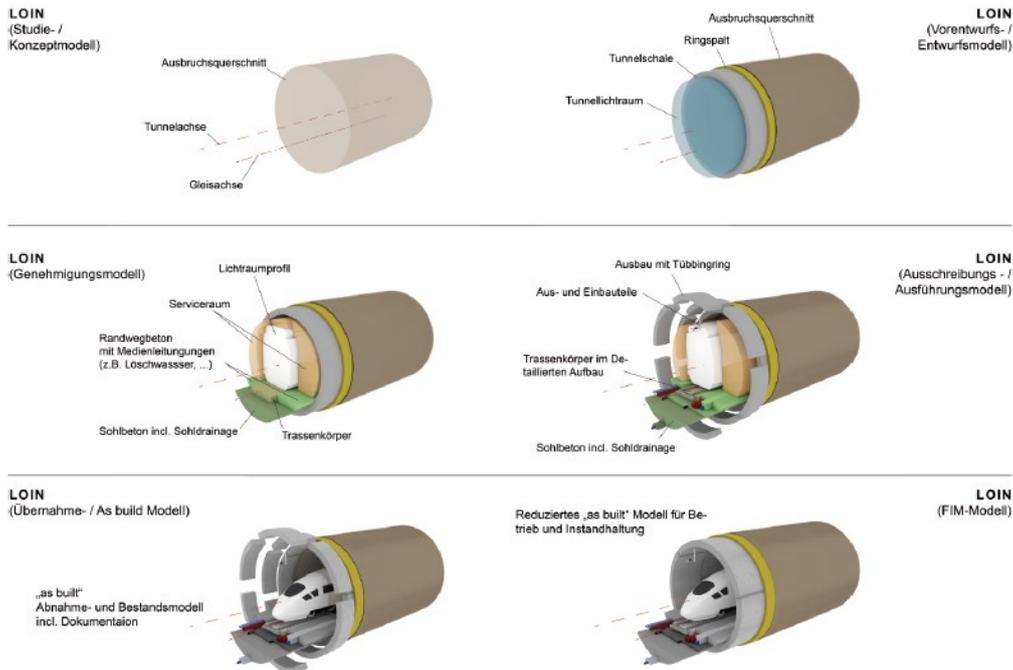


Abbildung 2.1: LOIN des Bauwerksmodells im maschinellen Vortrieb [24]

2.1.5 Datenaustausch

In Kapitel 2.1.4 wurde das Thema der Fachmodelle angesprochen. Diese Herangehensweise hat in den allermeisten Fällen zur Folge, dass mit unterschiedlichen Softwareprodukten gearbeitet wird, da die Fachplaner weiterhin mit den ihnen vertrauten Werkzeugen arbeiten. Mit den Informationen aus den AIA und dem Anlegen eines BAP sind viele Vorgehensweisen und Grundlagen geregelt. Die Übertragung der einzelnen Teilmodelle in ein Koordinations- oder Gesamtmodell bleibt dennoch eine wichtige, jedoch durchaus diffizile Angelegenheit. Die Lösungsansätze für einen Einsatz von BIM reichen von *little closed BIM*, bei dem spezifische Aufgaben als Insellösung mit einem einzelnen Softwareprodukt und proprietären Formaten gelöst werden, bis zu *big open BIM* Ansätzen, die eine Lösung über alle Fachdisziplinen und verschiedenen Softwareprodukten hinweg beschreiben. Die sich daraus ergebende BIM-Einsatz-Matrix ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Für die Zukunft gilt es gerade im Infrastrukturbau den Fokus auf *big open BIM* Ansätze zu legen.

Für die *big open BIM*-Vorgangsweise muss in weiterer Folge die Zusammenarbeit zwischen einzelnen Teilmodellen und den entsprechenden Fachplanern genau so funktionieren, wie die Übergabe eines Gesamtmodells an den Betreiber oder an die Behörden im Rahmen eines Einreichverfahrens. Dazu wird im nächsten Schritt auf das Datenaustauschformat der Industry Foundation Classes (IFC) genauer eingegangen.

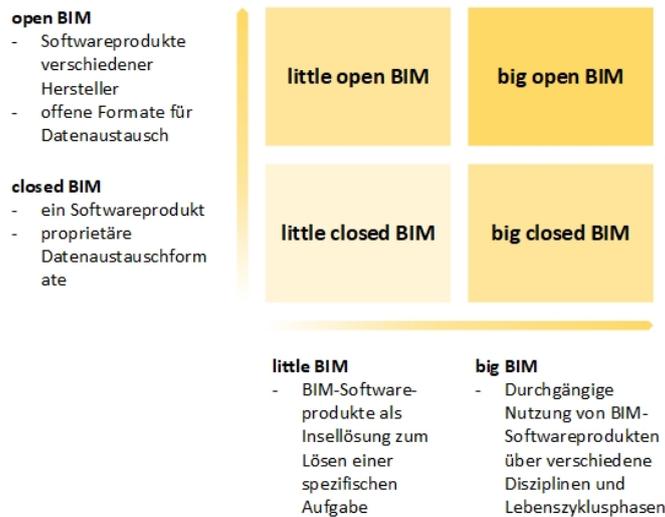


Abbildung 2.2: BIM-Einsatz Matrix [8]

Industry Foundation Classes - IFC

Mit den IFC hat die internationale Non-Profit-Organisation buildingSMART ein standardisiertes herstellernerutrales Datenaustauschformat entwickelt, um den fairen Wettbewerb auf dem Software-Markt zu gewährleisten. Es sollen damit alle Informationen eines Bauwerks – sowohl geometrische als auch semantische – in ein einheitliches Datenformat gebracht werden, das von unterschiedlichsten Softwareprodukten importiert und exportiert werden kann. Mittelfristig ist das Ziel, möglichst alle Bauwerkskategorien über alle Lebenszyklusphasen und mit allen Informationstiefen bedienen zu können.

Da die Entwicklung von den IFC sequentiell erfolgt, der Fokus am Beginn der Entwicklung auf dem Hochbau lag und erst allmählich die Integration von Infrastrukturelementen implementiert wird, ist eine Analyse von den IFC für die Anwendung im Infrastrukturbau eine reine Momentaufnahme. Mit dem derzeit aktuellsten veröffentlichten Release IFC4.1 ist beispielsweise erstmals die Abbildung von Trassierungen mit zugehörigem Lage- und Höhenplan möglich. Abbildung 2.3 zeigt den Entwicklungsrahmen für IFC5. Damit werden erstmals große Teile des Infrastrukturbaus abgedeckt sein, da damit die Themen Brückenbau, Straßenbau und Eisenbahnbau abbildbar sein sollen. In weiteren Schritten ist eine Implementierung von den Bereichen Hafen, Tunnel und Landschaft angedacht. Wann dies soweit sein wird, ist jedoch noch nicht ersichtlich. [10, 18, 30] Derzeit ist das Zwischen-Release IFC4.3 bereits in der Herausgabe-Version 1 sowie dem Kandidaten-Status veröffentlicht und enthält erstmals die neuen Entitytypen

- *IfcRailway,*
- *IfcBridge,*
- *IfcRoad.*

Diese Klassen existieren derzeit als reine Platzhalter, denn Subklassen dieser Entities und entsprechende Attribute wurden noch nicht definiert. Für die vor-

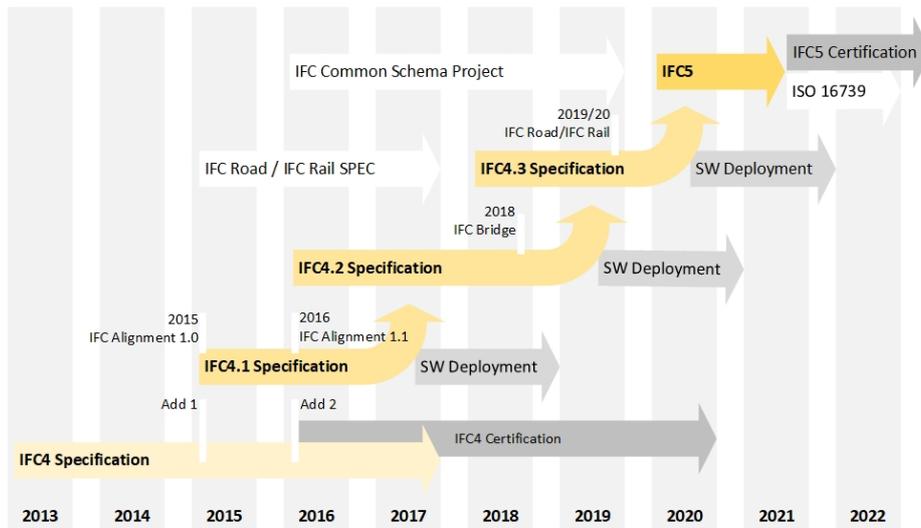


Abbildung 2.3: Entwicklungsrahmen IFC 5 [30]

liegende Arbeit ist vor allem spannend, dass IFC4.3 eine Klasse *IfcGeotechnicalElement* beinhaltet. Abbildung 2.4 zeigt die geplante Einordnung der Klasse *IfcGeotechnicalElement* in die IFC-Struktur. Sie dient als abstrakter Supertyp für alle geotechnischen Entities und soll die beiden Subklassen *IfcGeotechnicalAssembly* und *IfcGeotechnicalStratum* enthalten. [9]

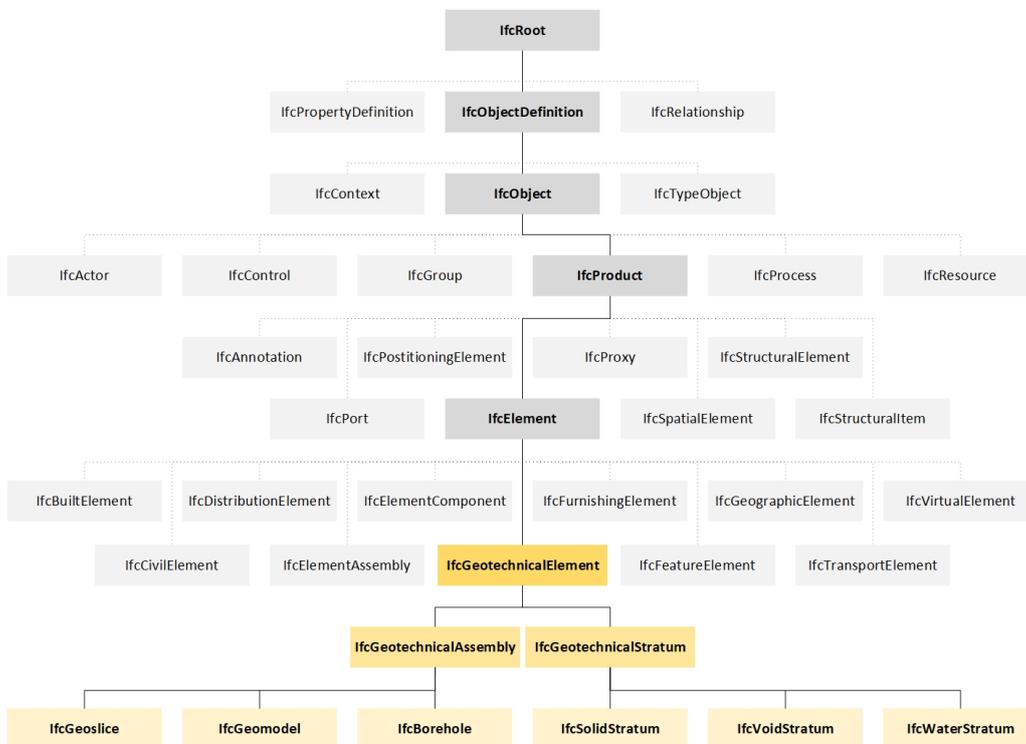


Abbildung 2.4: Einordnung der Klasse *IfcGeotechnicalElement* in die IFC-Struktur inklusive der geplanten Subklassen [9]

Erstere wird eine Repräsentation eines geologischen und geotechnischen Modells erlauben, die entweder auf Interpretationen oder Bodenaufschlussmethoden beruhen. Zudem gibt es die Möglichkeit Angaben zur Methodik und Unsicherheitsinformationen abzubilden. Als Subklassen sind bisher *IfcBorehole*, *IfcGeomodel* und *IfcGeoslice* zur diffizilen Unterteilung der Struktur angedacht. [9]

Zweitere erlaubt die Darstellung von diskreten, beinahe homogenen geologischen Schichten unter anderem als irreguläre Volumenkörper. Ergänzend ist es möglich, eine solche Schicht in kleinere Einheiten zu unterteilen, falls die Eigenschaften innerhalb der Schicht variieren, oder die Eigenschaften werden über maximale und minimale Grenzwerte definiert. Zusätzlich ist es möglich geometrische Informationen abzubilden. Mit den Subklassen *IfcSolidStratum*, *IfcVoidStratum* und *IfcWaterStratum* wird den drei grundlegenden Bodenbestandteilen Rechnung getragen, um diese differenziert zu beschreiben. [9]

Zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit wird auf den aktuellsten Release IFC4.1 zurückgegriffen, da IFC4.3 nur als Kandidaten-Version existiert. Teilweise wird sogar eine noch frühere Version angewendet, da nicht alle Softwarehersteller die neueste Version von IFC implementiert haben.

2.2 Normen

Nachfolgendes Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die derzeitigen Normen und Richtlinien, welche einerseits BIM und andererseits den Baugrund im Tunnelbau betreffen.

2.2.1 Normen mit BIM-Bezug

Österreich hat im Jahr 2015 mit der Herausgabe der beiden Normen,

- ÖNORM A 6241-1:2015 - *Digitale Bauwerksdokumentation - Teil 1: CAD-Datenstrukturen und Building Information Modeling (BIM) - Level 2* und
- ÖNORM A 6241-2:2015 - *Digitale Bauwerksdokumentation - Teil 2: Building Information Modeling (BIM) - Level 3-iBIM*

eine Vorreiterrolle im DACH-Raum eingenommen. Es wurde mit dem Merkmalsserver eine Datenbank des Austrian Standards Institute erzeugt, die dem Konzept eines Phasenmodells Rechnung trägt. Dies bedeutet, dass die Informationen im Verlauf der Projektphasen zunehmen. In diesen Normen liegt der Fokus auf der „*technischen Umsetzung des Datenaustausches und der Datenhaltung von Gebäudeinformationen des Hochbaues und verwandter, raumbildender Konstruktionen des Tiefbaus*“ [2, S. 4] sowie der „*technischen Umsetzung eines einheitlichen, strukturierten mehrdimensionalen Datenmodells für Bauwerke des Hochbaus und verwandter, raumbildender Konstruktionen des Tiefbaus*“ [3, S. 4]. Damit ist eine Umlegung auf ein mögliches Baugrundmodell nicht per se abgedeckt. Grundlegende Themen wie die BIM-Dimensionen, Detaillierungsgrade oder IFC können trotz allem derzeit schon sinngemäß angewendet werden.

Weiters gibt es bereits eine ganze Reihe an BIM-bezogenen Normen, die hier nicht im Detail behandelt werden. Der Vollständigkeit halber sind einige davon nachfolgend aufgelistet:

- ÖNORM EN ISO 19650-1:2019 04 15 *Organisation von Daten zu Bauwerken - Informationsmanagement mit BIM - Teil 1: Konzepte und Grundsätze,*
- ÖNORM EN ISO 19650-2:2018 *Organisation von Daten zu Bauwerken - Informationsmanagement mit BIM - Teil 2: Lieferphase der Assets,*
- Entwurf ÖNORM EN ISO 19650-3:2020 *Organisation von Informationen zu Bauwerken - Informationsmanagement mit Bauwerksinformationsmodellierung - Teil 3: Betriebsphase der Assets,*
- Entwurf ÖNORM EN ISO 19650-5:2020 *Organisation von Daten zu Bauwerken - Informationsmanagement mit BIM - Teil 5: Spezifikation für Sicherheitsbelange von BIM, der digitalisierten Bauwerke und smarten Assetmanagement,*
- Entwurf ÖNORM EN ISO 16739-1: 2019 09 01 *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries - Part 1: Data schema.*

Außerdem gibt es mit dem technischen Gremium TC 442 - Building Information Modeling (BIM) des European Committee for Standardization (CEN) eine eigene Arbeitsgruppe, die europaweite Normen zum Thema BIM erarbeitet. Diese Arbeitsgruppe hat die

„Normung im Bereich der strukturierten semantischen Lebenszyklusinformationen für die gebaute Umwelt“ [22]

als ihren erklärten Zuständigkeitsbereich. [22]

Aktuell wird das Thema BIM auch im Deutschen Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) behandelt. Aufgrund fehlender „best practice“ Lösungen für BIM im Untertagebau, werden Empfehlungen mit technisch bereits umsetzbaren Lösungen entworfen und veröffentlicht. Diese sind nicht abschließend und Gegenstand ständiger Weiterentwicklung und Ergänzungen. Veröffentlicht worden sind bisher

- die Empfehlung für *BIM im Untertagebau* als Grundlagedokument, welches dabei hilft, bevorstehende Entwicklungen zu beschleunigen und [19]
- eine Empfehlung für *Modellanforderungen - Teil 1*, welche die Themen Objektdefinitionen, Codierung und Merkmale behandelt und den Beginn einer Reihe von Empfehlungen darstellt. [20]

2.2.2 Normative Grundlagen für den Baugrund im Tunnelbau

Da sich die Planungsinhalte und Vorgehensweisen bei einer digitalen BIM-konformen Projektabwicklung nicht von der analogen unterscheiden, werden weiterhin dieselben einschlägigen Normen und Richtlinien verwendet. Dazu zählen unter anderem

- die ÖGG *Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb,*
- die ÖGG *Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb* und

- die ÖGG Richtlinie *Ermittlung geologisch geotechnischer Grundlagen für die Planung tiefliegender Tunnel*.

Diese haben den Charakter einer Aufgabenbeschreibung für die Beteiligten der Projektrealisierung. [6]

2.3 Derzeitige analoge geotechnische Planung

In diesem Kapitel wird näher auf die derzeitige geotechnische Planung im Tunnelbau eingegangen. Zusammen mit den gerade beschriebenen Normen und den Methoden bezüglich BIM, komplettieren diese Ausführungen die Basis, um darauf aufbauend das digitale parametergestützte Baugrundmodell zu entwickeln. Die grundlegende Richtlinie für die geotechnische Planung im Tunnelbau ist die im vorherigen Kapitel aufgelistete ÖGG *Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb*. Diese versteht sich als Leitfaden für die geotechnische Planung und hat den Charakter einer Aufgabenbeschreibung. Sie gilt sowohl für die Planung als auch die Bauausführung und gliedert sich in die

1. Phase - Planung,
2. Phase - Planung TVM für die Bauausführung,
3. Phase - Bauausführung.

In dieser Arbeit wird der Fokus auf der Phase 1 liegen, im Detail auf der geotechnischen Planung. Abbildung 2.5 zeigt den gesamten schematischen Ablauf für die geotechnische Planung, wie sie derzeit durchgeführt wird. Ziel der Implementierung eines digitalen Baugrundmodells ist es, diesen vielfach angewandten und erprobten Weg mit digitalen Methoden zu bestreiten. Daher wird in den nächsten Absätzen die derzeitige analoge Vorgehensweise genauer erläutert, um darauf aufbauend im nächsten Kapitel die mögliche digitale Version dieses Prozesses zu beschreiben. [31]

Für den Einstieg in den in der Richtlinie beschriebenen Ablauf wird vorausgesetzt, dass die Projektbedingungen, die Trasse und die Randbedingungen (z.B. Überbauung, Grundwasserbeeinflussung) und die Definition der Anforderungen (z.B. zulässige Setzungen, Lebensdauer) bereits bekannt sind. Außerdem sind umfangreiche geologische und hydrogeologische Kartierungsarbeiten des Projektgebietes vorzunehmen. Darauf aufbauend, kann das Untersuchungsprogramm durchgeführt werden, welches sich für die geotechnische Planung in folgende sechs Schritte gliedert: [31]

1. Schritt - Bestimmung der Gebirgsarten,
2. Schritt - Bestimmung des Gebirgsverhaltens, Zuordnung zu GVTs,
3. Schritt - Evaluierung/Wahl der Vortriebsart,
4. Schritt - Wahl eines tunnelbautechnischen Konzeptes,
5. Schritt - Festlegung der bau- und maschinentechnischen Maßnahmen und Abschätzungen bzw. Ermittlungen des Systemverhaltens,
6. Schritt - Dokumentation der Geotechnischen Planung.

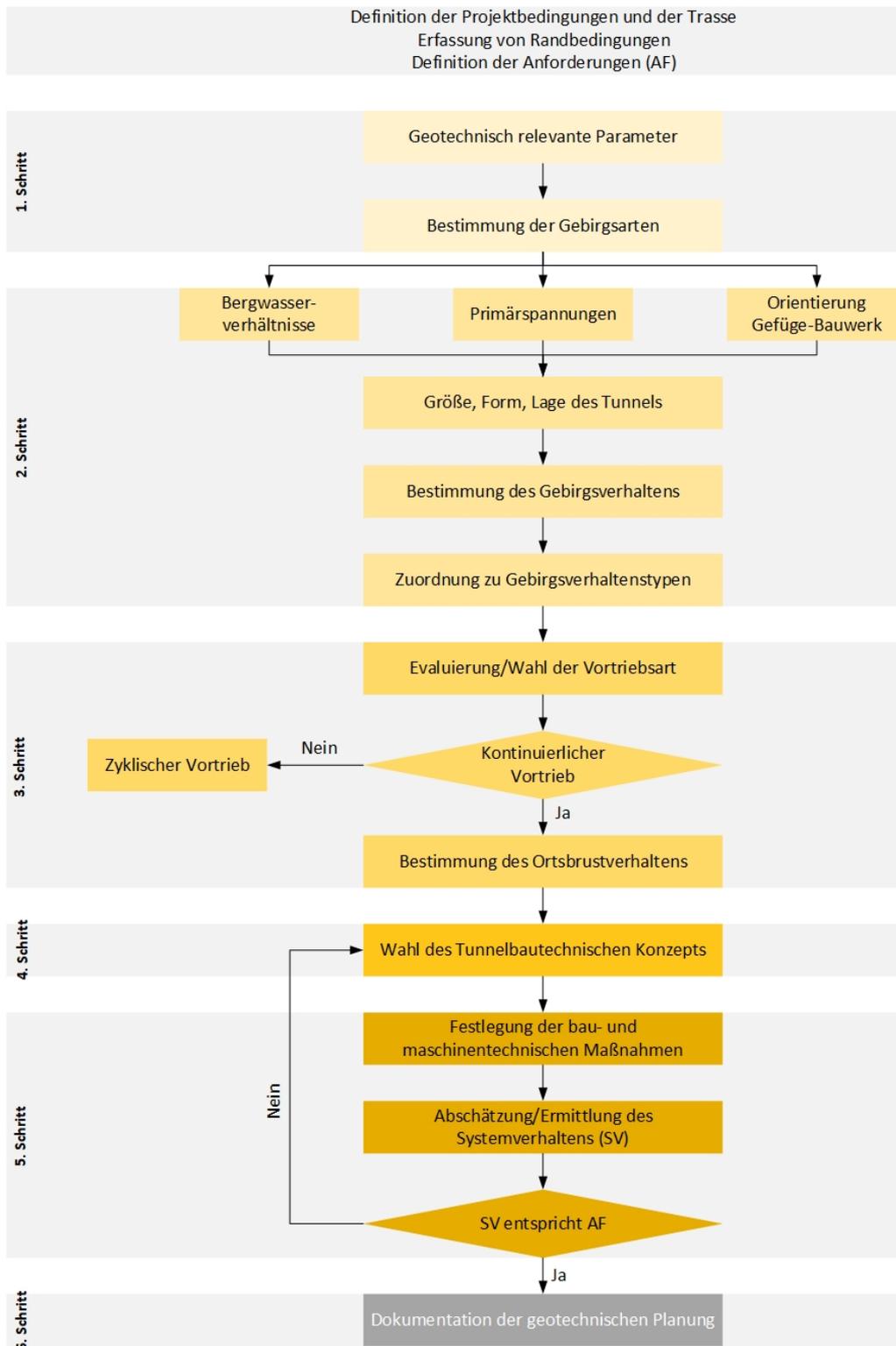


Abbildung 2.5: Schematischer Ablauf der geotechnischen Planung [31, S. 15]

Diese sechs Schritte sind in Abbildung 2.5 als schematischer Ablauf dargestellt,

inklusive der dazugehörenden, einzelnen Unterpunkte. Ein digitales Baugrundmodell bringt Vorteile über alle sechs Schritte hinweg, wobei der direkteste Einfluss bei den Schritten eins und zwei gegeben ist. Deshalb werden diese genauer betrachtet und die Entwicklung des digitalen Baugrundmodells dieser Arbeit wird sich darauf beschränken.

2.3.1 Geotechnisch relevante Parameter

Im ersten Schritt, nach der erfolgreichen Definition der Projektbedingungen, Erfassung von Randbedingungen und der Definition der Anforderungen, sind die geotechnisch relevanten Parameter zu definieren. Da eine vollumfängliche und projektunabhängige Liste aller geotechnisch relevanten Parameter nicht existiert, sind diese Parameter für jedes Projekt spezifisch festzulegen. Die Richtlinie empfiehlt eine Unterteilung in Locker- und Festgesteinsparameter. Außerdem gibt die Richtlinie einen exemplarischen Überblick über potentielle Parameter, getrennt nach Kennwerten für Festgestein, Lockergestein und Gebirge. [31, S. 16, 42ff.]

2.3.2 Bestimmung der Gebirgsarten

Aufbauend auf den definierten geotechnischen Parametern, sind als nächstes – ebenfalls projektspezifisch – Schlüsselparameter der einzelnen Gebirgsarten festzulegen. Weisen Gesteinsverbände eine ähnliche Kombination aus Größe und Art dieser Schlüsselparameter auf, so werden diese einer Gebirgsart zugeordnet. Aufgrund der Komplexität der geologischen Verhältnisse und verschiedenster Erkundungsstände, ist die Anzahl der zu bestimmenden Gebirgsarten, wie auch die Bestimmung selbst, planungsphasen- und projektabhängig. Die Anzahl der Gebirgsarten, wie auch deren Unterteilung, werden mit fortschreitender Planung im Regelfall umfangreicher und detaillierter. Sind diese Informationen vorhanden kann die Zuordnung der erwarteten Gebirgsarten zu den einzelnen Bereichen des Hohlrumbauwerks erfolgen. [31, S. 16]

Die Parameter der einzelnen Gebirgsarten sind entsprechend der einschlägigen nationalen Normen zu bestimmen. Dabei ist immer eine statistische Auswertung vorzunehmen und diese ist in den Parametern wiederzufinden. In den frühen Projektphasen wird, aufgrund des meist sehr geringen Erkundungsumfangs, für Gesteins- und Gebirgskennwerte auf Erfahrungswerte und dokumentierte Werte zurückgegriffen. Erkundungen in frühen Phasen dienen in der Regel einer Reduktion von Unsicherheiten und Risiken in geotechnisch kritischen Bereichen. Aber auch Parameter zur Verwertbarkeit des Ausbruchsmaterials, sowie einer allfälligen Deponierung, sind in diesen Phasen wichtig für die weitere Planung. Spätere Projektphasen bedienen sich zur Parameterermittlung genauerer numerischer oder empirischer Methoden. Weiters wird es erforderlich, spezielle Charakteristika des untersuchten Gebirges darzustellen. In allen Fällen sind jedenfalls mechanische und hydraulische Parameter des Gebirges zu bestimmen. [31, S. 16f]

Abschließend wird für die Bestimmung der Gebirgsarten eine Tabelle erzeugt, welche sowohl jene grundlegenden Parameter zur Gebirgsartbestimmung ent-

hält, wie auch die daraus abgeleiteten Gebirgsparameter. Die Tabelle enthält sowohl die repräsentativen Gesteins- und Gebirgskennwerte als auch eine zugehörige, maßstäbliche Darstellung der Gebirgsarten im Querschnitt und Längsschnitt mit dem geplanten Hohlraumbauwerk. Auch hierbei sind statistische Kenngrößen und Bandbreiten der Parameter anzugeben. [31, S. 17]

2.3.3 Bestimmung des Gebirgsverhaltens

Im zweiten Schritt des Ablaufs von Abbildung 2.5 wird nach der bereits erfolgten Definition der Gebirgsarten und der geotechnisch relevanten Parameter die Bestimmung des Gebirgsverhaltens durchgeführt. Als Gebirgsverhalten wird

„[...] die Reaktion des Gebirges auf den Ausbruch des Gesamtquerschnittes unter Berücksichtigung der anstehenden Gebirgsart und der Einflussfaktoren, aber ohne Berücksichtigung von bau- und maschinentechnischen Maßnahmen, Ausbruchmethode, Ausbau, Bauhilfs- und Voraussicherungsmaßnahmen [...]“ [31, S. 18]

beschrieben. Wie schon im schematischen Ablauf in Abbildung 2.5 ersichtlich, sind die Berg- und Grundwasserverhältnisse, die Primärspannungen und die Orientierung der maßgeblichen Strukturen relativ zum Hohlraum neben der Größe, Form und Lage des Tunnels, grundlegende Informationen zur Bestimmung des Gebirgsverhaltens.

In der Richtlinie sind

- die Gebirgsart,
- der Primärspannungszustand,
- der Durchmesser des kreisrunden Hohlraums,
- die Lage des Hohlraumes in Relation zur Oberfläche, Hanglage oder bestehenden Bauwerken,
- die Orientierung des Bauwerks zum Trennflächengefüge,
- die Grenzen zwischen unterschiedlichen Gebirgsarten und
- das Berg- und Grundwasser, der Strömungsdruck und der hydrostatische Druck

als Parameter zur Bestimmung des Gebirgsverhaltens angegeben. Weiters sind Vorschläge für Untersuchungen angeführt, welche die Kinematik des Gebirges, die vorherrschenden Beanspruchungen, eine Ermittlung der Bruch- und Versagensmechanismen und einen Vergleich mit Erfahrungen bei ähnlichen Gebirgsverhältnissen behandeln. Auch hierbei gilt, dass Parameter einer statistischen Auswertung zuzuführen sind. [31, S. 18]

Sind all diese Eigenschaften und Parameter bekannt, kann die Zuordnung zu den in der Richtlinie definierten und in Tabelle 2.1 aufgelisteten übergeordneten 11 Kategorien für Gebirgsverhaltenstypen (GVTs) erfolgen. Kommt es zu einer großen Streuung der Werte innerhalb eines GVT, sind entsprechende Untergruppen zu erstellen, die beispielsweise so dargestellt werden können: GVT 1/1, GVT 1/2, GVT 1/3. Sind in einem Querschnitt außerdem mehrere GVTs vorhanden, ist der maßgebende GVT als Erstes anzugeben und anschließend alle weiteren GVTs: zB. GVT 3 + GVT 5. [31, S. 20]

Übergeordnete Kategorien von Gebirgsverhaltenstypen		Beschreibung des Gebirgsverhaltens (ohne bautechnische Maßnahmen)
GVT 1	Standfestes Gebirge	Standfestes Gebirge mit dem Potenzial zum schwerkraftbedingten Herausfallen oder Herausgleiten von kleinvolumigen Kluftkörpern
GVT 2	Gefügebedingte Ausbrüche	Großvolumige gefüge- und schwerkraftbedingte Ausbrüche, vereinzelt lokales Überschreiten der Scherfestigkeit an Trennflächen
GVT 3	Hohlraumnahe Überbeanspruchung	Spannungsbedingte Entfestigung bzw. Plastifizierung des Gebirges in Hohlraumnähe, eventuell in Kombination mit gefügebedingten Ausbrüchen
GVT 4	Tiefreichende Überbeanspruchung	Spannungsbedingte tiefreichende Entfestigung bzw. Plastifizierung im Gebirge mit großen Deformationen
GVT 5	Bergschlag	Schlagartige Ablösungen von Gesteinsplatten verursacht durch Sprödbruch
GVT 6	Schichtknicken	Knicken von schlanken Schichtpaketen, häufig in Kombination mit Scherversagen
GVT 7	Firsniederbruch durch Scherversagen	Großvolumige Ausbrüche überwiegend im Firstbereich mit progressivem Scherversagen
GVT 8	Rolliges Gebirge	Ausrieseln von kohäsionsarmem, gering verzahntem, trockenem bis feuchtem Gebirge
GVT 9	Fließendes Gebirge	Ausfließen von kohäsionsarmem, gering verzahntem Gebirge mit hohem Wassergehalt oder Wasserzufluss
GVT 10	Quellendes Gebirge bzw. Schwellendes Gebirge	Zeitabhängige Volumszunahme des Gebirges vorwiegend im Sohlbereich durch physikalisch-chemische Reaktion von Gebirge und Wasser in Kombination mit Entspannung bzw. durch chemische-kristallographische Vorgänge
GVT 11	Gebirge mit kleinräumig wechselnden Verformungseigenschaften	Kombination mehrerer GVT bei kleinräumiger, starker Änderung von Spannungen und Deformationen über längere Strecken, bedingt durch heterogenen Gebirgsbau (zB. Block-Matrix Struktur, heterogene Störungszonen, tektonische Melange)

Tabelle 2.1: Übergeordnete Kategorien von Gebirgsverhaltenstypen [31, S. 19]

Ähnlich zu den grundlegend definierten Parametern zur Bestimmung der GVTs sind in der Richtlinie auch Mindestangaben für jeden GVT definiert. Diese sind in Tabelle 2.2 aufgelistet. Da die Bestimmung des GVT von der Vortriebsrichtung abhängig ist, ist diese gegebenenfalls für beide Richtungen zu bestimmen, falls die Vortriebsrichtung noch nicht festgelegt ist.

1	Gebirgsart(en)
2	Primäre Spannungsverhältnisse
3	Orientierung der maßgeblichen Trennflächen relativ zum Hohlraum
4	Beanspruchung des Hohlraumrandes und des hohlraumnahen Bereiches
5	Bergwasserverhältnisse: Kluft- und Porenwasser-Verhältnisse; Abgrenzung von Mengen/Drücken, unter welchen der GVT gültig ist; Einfluss des Bergwassers auf die Gebirgseigenschaften
6	Beschreibung des Gebirgsverhaltens (Versagens- und Bruchmechanismen, Langzeitverhalten)
7	Größenordnung der Verschiebung des ungestützten Hohlraumrandes und Angabe der dominanten Verschiebungsrichtungen. Unterscheidung, ob Verschiebungen rasch abklingen, oder lange andauern können.
8	Skizze der erwarteten Gebirgsstruktur einschließlich Versagensmechanismus und Verschiebungstendenzen

Tabelle 2.2: Mindestangaben für jeden Gebirgsverhaltenstyp [31, S. 20]

3 **Anwendungsbeispiel KÖSA für das digitale parametergestützte Baugrundmodell**

Nach dem einführenden Kapitel und einem Überblick über die wichtigsten methodischen Ansätze, wird in diesem Kapitel ein Anwendungsbeispiel beschrieben. Im Rahmen des Projektes Neubaustrecke Köstendorf - Salzburg (KÖSA), welches ein BIM-Pilotprojekt der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) ist, erfolgt die Ausarbeitung eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells. Auf der Westbahnstrecke befindlich, beginnt die Neubaustrecke, von Osten kommend, nach dem Bahnhof Neumarkt-Köstendorf und verläuft anschließend durch den 14,3 km langen zweiröhrigen Seekirchnertunnel. Daran schließen die beiden Tunnelbrücken über die Fischach an und es beginnt der ebenfalls zweiröhrige und ca. 2 km lange Grafenholztunnel. Nach einem kurzen Streckenabschnitt auf freier Strecke, erfolgt die Zusammenführung mit der bestehenden Strecke bei Salzburg-Kasern. Eine Gesamtprojektausdehnung von ca. 21,3 km, wovon ca. 16,5 km unter Tage liegen, verdeutlichen den Umfang dieses Projektes. Der Regelquerschnitt wurde mit einem Ausbruchsdurchmesser von 10,38 m definiert. [4]

Das Projekt befindet sich zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit in der Phase der Umweltverträglichkeitserklärung (UVE). Ein Fokus des Pilotprojektes liegt auf der Einbindung von alphanumerischen Daten und Informationen in die einzelnen Fachmodelle der beteiligten Planungsdisziplinen sowie die Zusammenführung der Fachmodelle in einem Koordinationsmodell zur Verbesserung der gemeinsamen Datengrundlage. Eines der wichtigsten Fachmodelle in dieser Projektphase ist das Baugrundmodell. Das Anwendungsbeispiel zeigt einen praxistauglichen Weg mit konkreten Eigenschaften, Werkzeugen und Methoden für die Implementierung des digitalen parametergestützten Baugrundmodells auf. Berücksichtigt werden dabei eine konkrete Projektphase sowie ein definierter BIM-Anwendungsfall. Dieser ist als lagerichtige Ermittlung und Auswertung des aufzufahrenden Tunnelhohlraumes Teil der angegebenen Trassenstudie.

Aufbauend auf dem gewählten Arbeitsablauf (Abbildung 3.1) wird in den nächsten Kapiteln zuerst ein Überblick über die Ausgangssituation und den Prozess gegeben, dann folgen Kapitel zu den drei Themen Grundlagen, Modellierung und Parametrisierung. Abschließend wird die Auswertung kurz erläutert und im letzten Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst.

3.1 Ausgangssituation

Gemäß der Beauftragung des i3b zur wissenschaftlichen Unterstützung und Beratung des BIM-Managements am Projekt KÖSA, ist das Projektcoaching eine wesentliche Aufgabe. Für diese Arbeit ist speziell die Erarbeitung von BIM-Workflows relevant. Ziel ist die Definition solcher Workflows für die Einbindung der geologischen und geotechnischen Planung für die Projektphase der UVE. Dies geschieht in enger Abstimmung mit den projektbeteiligten Fachplanern für Geologie und Tunnelplanung sowie dem BIM-Gesamtkoordinator und dem BIM-Manager. Die vorliegende Arbeit liefert darauf aufbauend einen proof of concept für den entwickelten Prozess. Der Autor ist dabei sowohl in die allgemeinen Projektbesprechungen eingebunden worden, wie auch in direktem Kontakt mit den handelnden Personen gewesen. Darüber hinaus sind im Zuge der Bearbeitung weitere Themen mit Berührungspunkten zum Baugrundmodell behandelt worden.

In direkter Korrelation zur Projektphase steht der Umfang an Informationen über den Baugrund sowie die Aufarbeitung und Interpretation der vorhandenen geologischen und geotechnischen Daten. Das nachfolgende Anwendungsbeispiel ist somit in gewissen Belangen auf die Projektphase der UVE beschränkt. In Anlehnung an Teil 6 der Handreichungen und Leitfäden [16] der deutschen BIM4INFRA2020 lassen sich für diese Ausgangssituation folgende BIM-Anwendungsfälle (siehe Kapitel 4.4) ableiten:

- Eine *Visualisierung* von komplexen Darstellungen erleichtert die Entscheidungsfindung, erlaubt eine bessere Fortschrittskontrolle der Planung und trägt zur öffentlichen Akzeptanz bei.
- Mit einem digitalen Baugrundmodell als Grundlage für die *Koordination der Fachgewerke* ist von Beginn an eine Qualitätsverbesserung und Risikominimierung möglich.
- Das Baugrundmodell als Single Source of Truth (SSOT) erhöht die Qualität von *Entwurfs- und Genehmigungsplänen*. Aber auch der verringerte Koordinations- und Erstellungsaufwand sowie die Vermeidung von Fehlerquellen und schnelle Adaptierbarkeit tragen zur Qualitätssteigerung bei.

Da das Ziel des BIM-Pilotprojektes in Bezug auf den Baugrund sich darauf beschränkt, einen Nachweis für die Implementierung der BIM-Methoden in die geologische und geotechnische Planung von Tunnelbauwerken zu liefern, sind diese BIM-Anwendungsfälle als Vervollständigung des Autors zu sehen, jedoch keine konkreten Projektziele.

3.2 Prozess der Vorgangsweise

Nach derzeitigem Stand der Technik und angepasst an das Anwendungsbeispiel, ist der Prozess zur Vorgangsweise ausgearbeitet worden. Die Prozessgrafik (Abbildung 3.1) fungiert als roter Faden für das Anwendungsbeispiel. Zu Beginn eines jeden Kapitels wird farblich hervorgehoben, welcher Teil des Prozesses beschrieben wird. Der Prozess kann in vier wesentliche Schritte aufgeteilt werden:

1. Die *Grundlagen* stellen die benötigten Informationen, Modelle und Daten dar.
2. Im Schritt der *Modellierung* werden all jene Bearbeitungsschritte durchgeführt, die für die später gewünschte Auswertung nötig sind.
3. Es folgt die *Parametrisierung* des Modells, wodurch erstmals von BIM gesprochen werden kann.
4. Abschließend erfolgt die *Auswertung* nach den vorgesehenen Kriterien.

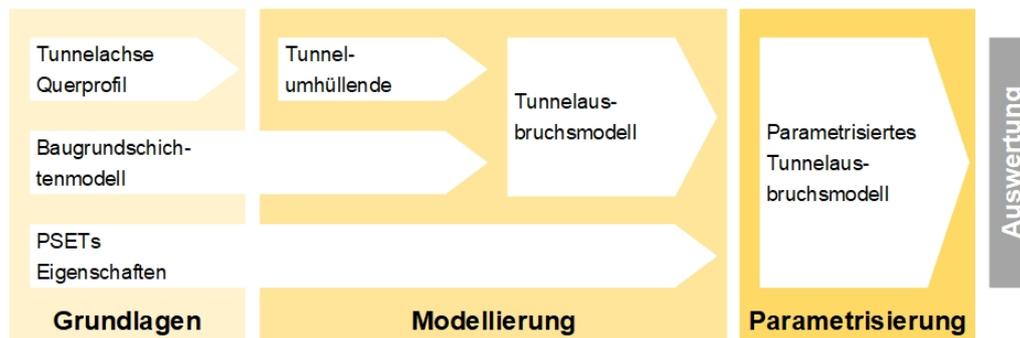


Abbildung 3.1: Gesamte Prozessgrafik der Vorgangsweise

Als Anmerkung zum Prozess folgender Hinweis: Im Zuge der Umsetzung hat sich herausgestellt, dass bei der Bearbeitung eines bereits parametrisierten Modells sehr oft Informationen verloren gegangen sind. Um dem daraus resultierenden Mehraufwand einer erneuten Parametrisierung zuvorzukommen, ist die Parametrisierung nach der Modellierung vorgesehen. Dem Autor ist bewusst, dass der umgekehrte Weg deutlich mehr Bearbeitungsspielraum und Flexibilität erlaubt und empfiehlt daher, Entwicklungen in diese Richtung zu beobachten und gegebenenfalls eine Umkehr der Arbeitsweise. Diese Beobachtungen beziehen sich auf die Verwendung der beschriebenen Softwareprodukte und schließen nicht aus, dass dies zum Verfassungszeitpunkt mit anderen, dem Autor nicht bekannten, Werkzeugen bereits möglich ist.

3.3 Grundlagendaten

In Abbildung 3.2 sind jene Elemente des Prozesses farblich hervorgehoben, die als Grundlage gelten. Das ist einerseits die Tunnelachse, die vom Tunnelplaner in Zusammenarbeit mit dem Streckenplaner und in Abhängigkeit von der führenden Gleisachse, der projektierten Geschwindigkeit, den Querneigungen und weiteren Faktoren definiert wird. Andererseits sind es die dazugehörigen Querprofile, welche vom Tunnelplaner erstellt werden. Eine weitere Grundlage besteht aus dem Baugrundsichtenmodell, bestehend aus einzelnen 3D-Volumenkörpern für jede lithologische Schicht, das vom Geologen in Abstimmung mit dem Geotechniker bereitgestellt wird. Weiters sind projektspezifische Eigenschaftssätze in einer Datenbank abgebildet. Vom Fachplaner werden daran angepasst die entsprechenden geologischen und geotechnischen Eigenschaften vorgegeben. Die Tunnelachse, inklusive Querprofilen, und die projektspezifischen Eigenschaften

sind dabei in Anlehnung an Abbildung 2.5 als Teil der Anforderungen, Randbedingungen und Projektdefinition zu sehen. [31]

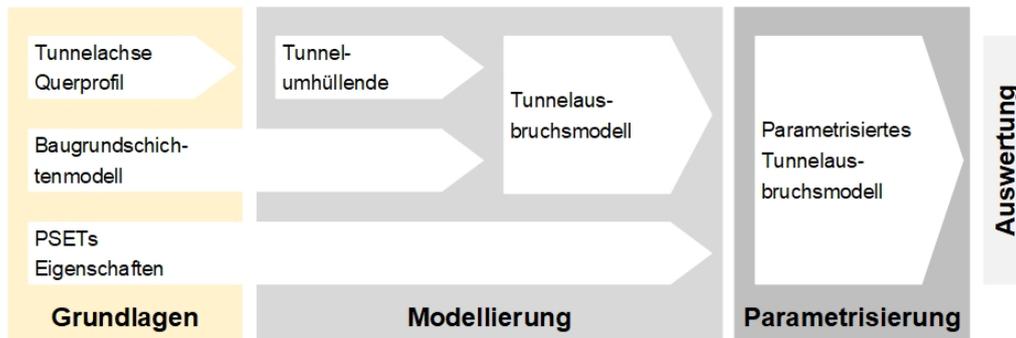


Abbildung 3.2: Grundlagen im Prozess

Nachfolgend wird näher auf diese Grundlagen eingegangen.

3.3.1 Tunnelachse und Querprofil

Der Projektphase entsprechend, ist bereits eine Trassierung der projektierten Neubaustrecke Köstendorf - Salzburg festgesetzt worden. Das bedeutet, dass es einen genauen Achsverlauf für die beiden Gleisachsen in Form von parametrisierten Achsen (Autodesk Civil 3D[®]) gibt. Zusätzlich dazu, sind bereits entsprechende Abschnitte und die zugehörigen Querprofile definiert. Diese liegen auch in Form von digitalen Querschnitten (Autodesk Civil 3D[®] Modelle) vor und die Abschnitte sind in Listenform, bezogen auf die Achsstationierung der beiden Gleise, vorhanden.

3.3.2 Baugrundsichtenmodell

Eine wesentliche Grundlage dieses Anwendungsbeispiels ist das, vom Geologen bereitgestellte, Baugrundsichtenmodell als Volumenkörpermodell (Autodesk Civil 3D[®]). Auf die eigentliche Erzeugung dieses Modells wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Diese basiert auf den bereits erfolgten Bodenaufschlüssen und dem daraus resultierenden Baugrundgutachten. Das Baugrundsichtenmodell besteht aus 3D-Volumenkörpern für jede einzelne lithologische Schicht. Zusätzlich dazu, sind alle prognostizierten Störzonen als eigenständige Volumenkörper vorhanden. Alle diese Körper liegen auf eindeutig benannten Layern, damit eine lückenlose Zuordnung gewährleistet ist. Dieses Baugrundsichtenmodell liegt dabei für den gesamten Planungsraum der Trassenstudie vor. Für die weitere detailliertere Projektbearbeitung wird dieses Modell auf einen Korridor, der einen Bereich von 100 m beidseitig der Gleisachsen umfasst, reduziert, um unter anderem Performance-Verbesserungen zu erreichen. Abbildung 3.3 zeigt einen Ausschnitt des Baugrundsichtenmodells. Darin sind die verschiedenen Bodenschichten wie auch die Störzonen und Gleisachsen sichtbar. Dem Workflow aus der „Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb“ in Abbildung 2.5 folgend, sind als Erstes die Gebirgsarten und im zweiten Schritt erst das Gebirgsverhalten zu

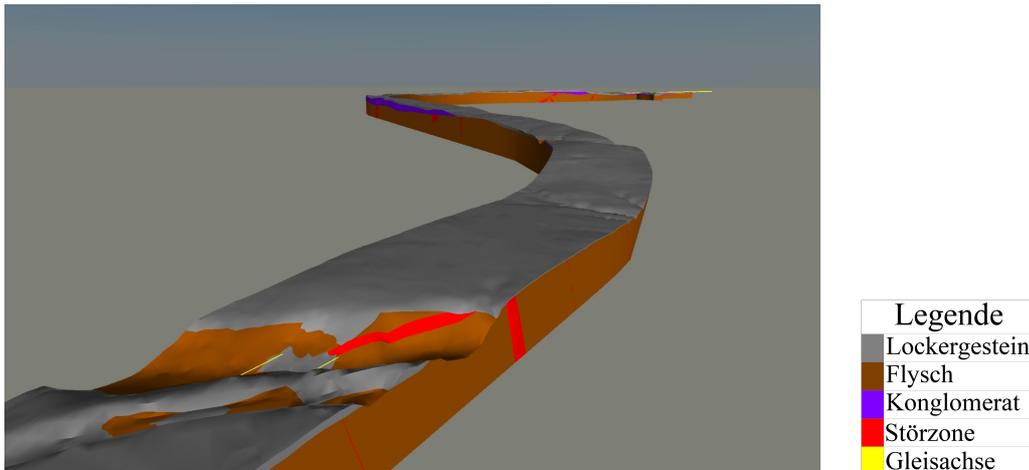


Abbildung 3.3: Detailansicht des Baugrundsichtenmodells

bestimmen und anschließend die Gebirgsverhaltenstypen (GVTs) zuzuordnen. Für den ersten Schritt der Bestimmung der Gebirgsarten, sind vom Geologen Abschnitte – genannt Gebirgs- oder Homogenbereiche – entlang der Trasse definiert und mit einer Abkürzung versehen worden, in welchen einheitliche geologische Eigenschaften prognostiziert werden. Tabelle 3.1 zeigt diese Aufteilung und Zuordnung der bestimmten Gebirgsarten. Der Seekirchnertunnel (SET) ist in fünf und der Grafenholztunnel (GHT) in sechs Homogenbereiche unterteilt worden. Darauf aufbauend sind vom Geotechniker für jene Abschnitte, welche unter Tage ausgeführt werden, Bereiche mit vergleichbarem Gebirgsverhaltenstyp definiert worden. Diese Zuordnung stellt den Abschluss des 2. Schrittes vom schematischen Ablauf aus Abbildung 2.5 dar. Auf Grundlage jener Bereiche, die zusätzlich von einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM) aufgefahren werden, sind außerdem Abschnitte einer gleichartigen Verteilung für das Ortsbrustverhalten beschrieben. Diese Informationen sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Als vorbereitende Maßnahme sind deshalb Teilungen der Baugrundsichten an den definierten Achsstationen, jeweils normal zur Achse, vorgenommen worden. Abbildung 3.4 zeigt einen Ausschnitt des Baugrundkorridormodells mit den entsprechenden Flächen zur Teilung.

In Hinblick auf die spätere Auswertung ist von Beginn an eine verständliche und eindeutige Layerstruktur anzuwenden. Da die Projektbearbeitung nach dem aktuellen Stand der Technik üblicherweise mittels Layerstruktur gesteuert wird, erfolgt die später durchzuführende Zuordnung der Eigenschaften auf Basis der Layer-Benennung. Daher sind alle Objekte, die später dieselben Eigenschaften bekommen, auf einen eindeutig erkennbaren Layer zu legen. Die in diesem Anwendungsbeispiel verwendete Struktur beinhaltet eine eindeutige Benennung der Layer und sieht folgendermaßen aus:

V_Lithologische-Schicht_Abkürzung-Gebirgsbereich_Ausbruch-Suffix

- *Lithologische-Schicht* - Bezeichnung der lithologischen Schicht,
- *Abkürzung-Gebirgsbereich* - vom Geologen festgelegte Bezeichnung des Ge-

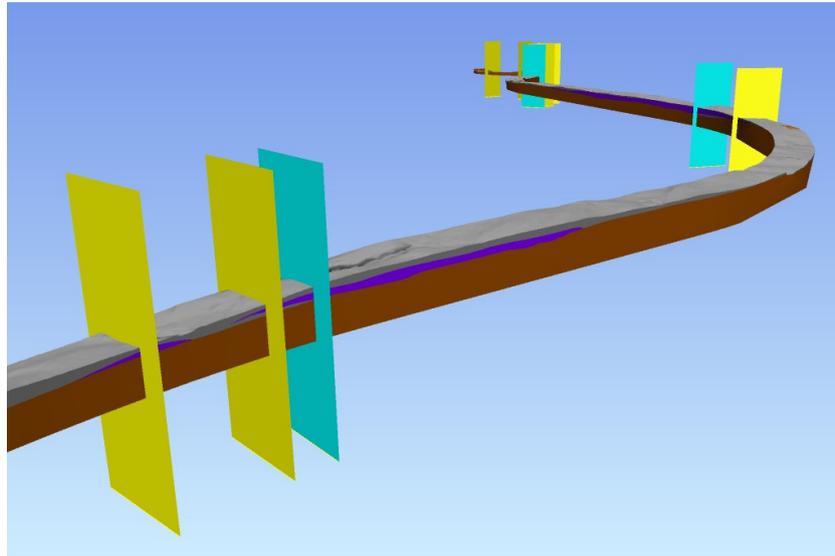


Abbildung 3.4: Teilung des Baugrundsichtenmodells in Gebirgsbereiche. Gelbe Flächen stellen Trennung einzelner Gebirgsbereiche dar (zB SET1 – SET2). Türkise Flächen stellen Trennflächen innerhalb der Gebirgsbereiche dar (zB SET3-1 – SET3-2)

birgsbereichs,

- *Ausbruch-Suffix* - Layer die Ausbruch-Volumen enthalten werden mit dem Suffix *_Ausbruch* versehen.

Beispiel: *V_FLYSCH_GHT3_Ausbruch*

3.3.3 PSETs und Eigenschaften

Die dritte Grundlage aus Abbildung 3.2 sind die Property Sets (PSETs) und die entsprechenden zugehörigen Eigenschaften.

PSETs

Frei übersetzt, wird ein PSET laut IFC als

„[...] Container innerhalb eines Eigenschaftensbaumes, der Eigenschaften beinhaltet“ [12]

beschrieben. Jede Eigenschaft hat eine eindeutige Bezeichnung, von der die jeweilige Interpretation und zu hinterlegende Information abhängig ist. Die PSETs werden den gewünschten Modellelementen hinzugefügt. Um eine Vereinheitlichung und vor allem international lesbare PSETs zu erzielen, gibt es verschiedenste Bestrebungen, interoperable Datenbanken von PSETs aufzubauen. Diese Datenbanken erfüllen außerdem den Ansatz einer Single Source of Truth (SSOT). Die Universität Innsbruck unter Leitung von Dr. Frösch vom i3b hat mit dem freeBIM Merkmalsserver (MMS) frühzeitig eine österreichweite Datenbank geschaffen, die in weiterer Folge für dieses Anwendungsbeispiel verwendet wird. [12, 27]

Im Rahmen des BIM-Pilotprojektes der ÖBB wurde vereinbart, für einen proof of concept nur einige Testeigenschaften in das Modell zu integrieren. In Hinblick auf eine zukünftige Integration von geotechnischen Parametern in IFC, sind die Kategorien und PSET-Bezeichnungen an das Vorab-Release von IFC4.3 angepasst. Dazu sei an dieser Stelle auch nochmals auf Abbildung 2.4 verwiesen. Für die Eigenschaften zur Beschreibung der Gebirgsartenverteilung im Baugrund sind im Test-PSET, mit der Bezeichnung *Koesa_IfcGeotechnicalStratum*, folgende Eigenschaften fixiert:

- *Gebirgsart_dominierend*
- *Gebirgsart_untergeordnet*
- *Gebirgsart_sehr_untergeordnet*
- *Orientierung_Schichtflaechengefuege*.

Die Bezeichnungen sind verknüpft mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit, wobei

- *dominierend* für eine Verteilung von > 30%,
- *untergeordnet* für eine Verteilung von 10-30% und
- *sehr untergeordnet* für eine Verteilung < 10% steht.

Abbildung 3.5 zeigt wie diese Testeigenschaften in der Parameterstruktur der Testbibliothek (*TEST_i3b*) am MMS abgebildet sind. Die Thematik einer prozentualen Verteilung von Eigenschaften ist mit diesem Lösungsansatz noch nicht ideal. Besser wäre eine matrixartige Parameterstruktur, welche eine getrennte Eingabe der prozentualen Verteilung und der Eigenschaft erlaubt. Das Release für IFC4.1 beinhaltet mit dem *IfcPropertyTableValue* einen Ansatz für eine tabellarische Parameterstruktur, bei der die Auswahl eines Wertes aus einer Spalte, die Auswahlliste für eine weitere Spalte definiert. Diese Option hat jedoch noch keinen Einzug in die gängigen Softwareprodukte erhalten, somit kann sie derzeit noch nicht verwendet werden. [11]

Allen vier Eigenschaften ist die Bemessung „Freier Text“ zugeordnet. Der Merkmalsserver bietet die Möglichkeit, weitere Informationen, wie beispielsweise die Projektphase der Eigenschaft, anzugeben oder eine Verknüpfung zur building-SMART Data Dictionary herzustellen. Der Einfachheit halber wird auf diese Informationen zum derzeitigen Zeitpunkt verzichtet.

Neben den geologischen Eigenschaften für eine Bestimmung der Gebirgsbereiche, sind die geotechnisch relevanten Parameter der einzelnen Gebirgsarten wichtig, um darauf aufbauend das Gebirgsverhalten bestimmen zu können. Vom Geologen wurde dafür eine Vielzahl an Parametern definiert und in thematische Gruppen, die nachfolgend aufgelistet sind, unterteilt:

- Schlüsselparameter
- Gesteinskennwerte
- Gebirgskennwerte
- Materialkennwerte
- Trennflächenkennwerte.

Der Projektphase entsprechend liegen diese geotechnischen Parameter für jede Gebirgsart vor, detailliertere Informationen zur Verteilung existieren nicht. Da es

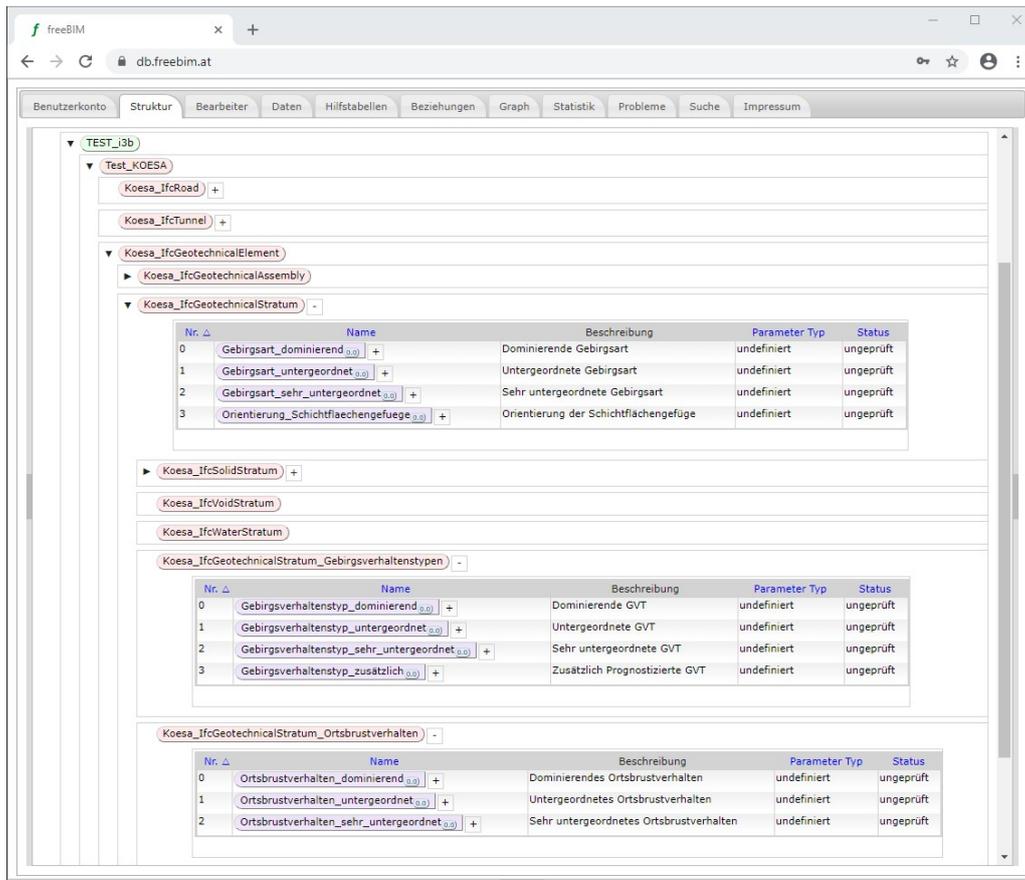


Abbildung 3.5: Drei am MMS abgebildete Komponenten als Test-PSETs für das Anwendungsbeispiel inklusive der jeweiligen Parameter

sich – vereinfacht gesagt – dabei nur um weitere Parameter für die Gebirgsbereiche handelt, werden diese Parameter an dieser Stelle nicht mehr näher behandelt und ausgeführt. Eine vollständige Auflistung dieser Parameter ist im Anhang zu finden.

Abschließend werden PSETs für die Verteilung der GVTs, wie auch des Ortsbrustverhaltens, erstellt. Diese weisen dieselben Bezeichnungen für die Verteilungswahrscheinlichkeit auf, wie das PSET zur Beschreibung der Verteilung der Gebirgsarten. Zur Beschreibung der Verteilung der GVTs, hat das Test-PSET *Koesa_IfcGeotechnicalStratum_Gebirgsverhaltenstypen* folgende vier Parameter:

- *Gebirgsverhaltenstyp_dominierend*
- *Gebirgsverhaltenstyp_untergeordnet*
- *Gebirgsverhaltenstyp_sehr_untergeordnet*
- *Gebirgsverhaltenstyp_zusaetzlich*.

Um die Verteilung des Ortsbrustverhaltens darzustellen, hat das Test-PSET *Koesa_IfcGeotechnicalStratum_Ortsbrustverhalten* drei ähnliche Parameter:

- *OBV_dominierend*
- *OBV_untergeordnet*

- *OBV_sehr_untergeordnet.*

Diese sieben Testeigenschaften sind ebenfalls in Abbildung 3.5 dargestellt.

Konkrete Eigenschaften

Für die in Kapitel 3.3.2 angesprochenen Gebirgsabschnitte, sind vom zuständigen Geologen zwölf Gebirgsarten definiert worden, deren Bezeichnung einer geologischen Einteilung folgt. Es sind acht Gebirgsarten des Quartärs – GA Q1 bis GA Q8 – und vier Gebirgsarten der Flyschformation – GA F1 bis GA F4 – berücksichtigt. Die Zuordnung zu den Gebirgsbereichen ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Diese Tabelle ist auch die Grundlage für den ersten Schritt der folgenden Attribuierung des Baugrundmodells. Wie bereits angesprochen existiert in ähnlicher, aber umfangreicherer Art und Weise, eine solche Tabelle für die Zuordnung von den geotechnischen Parametern zu den einzelnen Gebirgsarten, jedoch noch nicht zu den Gebirgsbereichen. Das grundlegende Konzept der Zuordnung von Parametern zum Gebirgsbereich bleibt aber dasselbe.

Tunnel	Gebirgsbereich	Abschnitt			Gebirgsartenverteilung			Bestimmende Parameter, Anmerkungen
		von Bahn-km	bis Bahn-km	Länge [m]	Dominierend (> 30 %)	Untergeordnet (10 - 30 %)	Sehr untergeordnet (< 10 %)	
SET	SET1	293,353	294,343	990	k.A.	k.A.	k.A.	OBW-Ost
	SET2	294,343	294,750	407	GA Q4	GA Q2, GA Q5	GA Q3, GA F1, GA F2, GA F3, GA F4	Auftreten von GA Qn, Orientierung schief bis parallel Schichtflächengefüge zu Bauwerksachse
	SET3	294,750	~ 300,680	~ 5930	GA F3	GA F2, GA F4	GA F1	Orientierung schief bis parallel Schichtflächengefüge zu Bauwerksachse
	SET4	~ 300,680	~ 307,670	~ 6990	GA F3	GA F2, GA F4	GA F1	stumpf- bis rechtwinklig
	SET5	307,670	307,723	53	k.A.	k.A.	k.A.	OBW-West
GHT	GHT1	307,7675	307,830	62,5	k.A.	k.A.	k.A.	OBW-Ost, DBW-Ost
	GHT2	307,830	308,180	350	GAF2	GAF3, GAF4	GAF1	
	GHT3	308,180	308,400	220	k.A.	k.A.	k.A.	DBW-Mitte 1, OBW-Mitte, DBW-Mitte 2
	GHT4	308,400	~ 309,160	~ 760	GAF2	GAF3, GAF4	GAF1	
	GHT5	~ 309,160	309,190	~ 30	GAQ8	GAF3, GAF4	GAF2	
	GHT6	309,190	309,855	665	k.A.	k.A.	k.A.	DBW-West, Durchpressung, OBW-West

Tabelle 3.1: Zuordnung der projektinternen Gebirgsarten zu den definierten Gebirgsbereichen

Tunnel	Gebirgsbereich	Abschnitt		Gebirgsverhaltenstypen			Ortsbrustverhalten			
		von Bahn-km	bis Bahn-km	Dominierend (> 30 %)	Untergeordnet (10 - 30 %)	Sehr untergeordnet (< 10 %)	GVT Zusätzlich	Dominierend (> 30 %)	Untergeordnet (10 - 30 %)	Sehr untergeordnet (< 10 %)
SET	SET2	294,343	294,750	GVT7, GVT8, GVT9	-	-	GVT10			
	SET3-1	294,750	294,925	GVT4	GVT2, GVT7	-	GVT10			
	SET3-2	294,925	~ 300,680	GVT4	GVT3, GVT8	GVT2, GVT9	GVT10	OBV4	OBV3, OBV8	OBV2, OBV9
	SET4-1	~ 300,680	301,518	GVT4	GVT3, GVT8, GVT9	GVT2, GVT7	GVT10	OBV4	OBV3, OBV8, OBV9	OBV2, OBV7
	SET4-2	301,518	307,420	GVT4	GVT3, GVT8, GVT9	GVT2, GVT7	GVT10			
	SET4-3	307,420	307,670	GVT7	-	-	GVT10			
GHT	GHT2	307,830	308,180	GVT7	GVT8, GVT9	-	GVT10			
	GHT4	308,400	~ 309,160	GVT4	GVT3, GVT8, GVT9	GVT2	GVT10			
	GHT5	~ 309,160	309,190	GVT7	-	-	GVT10			

Tabelle 3.2: Zuordnung der GVTs und des Ortsbrustverhaltens zu definierten Gebirgsbereichen

In Tabelle 3.2 sind die Verteilungen der GVTs und des Ortsbrustverhaltens aufgelistet. Zu beachten ist, dass die Gebirgsbereiche SET 3 und SET 4 jeweils zusätzlich eine Unterteilung erfahren haben, um entsprechende Homogenbereiche für die Verteilung der GVTs und des Ortsbrustverhaltens darstellen zu können. Diese Prognosen sind bereits direkt abhängig von der Tunnelvortriebsmethode, da beispielsweise die Tunnelvortriebsmethode genau mit dem Übergang von SET 3-1 auf SET 3-2 von zyklisch auf kontinuierlich wechselt. Erkennbar ist dies auch daran, für welche Abschnitte ein prognostiziertes Ortsbrustverhalten beschrieben ist.

3.4 Modellierung

Als zweiter Schritt des Prozesses folgt die Modellierung wie in Abbildung 3.6 farblich hervorgehoben.

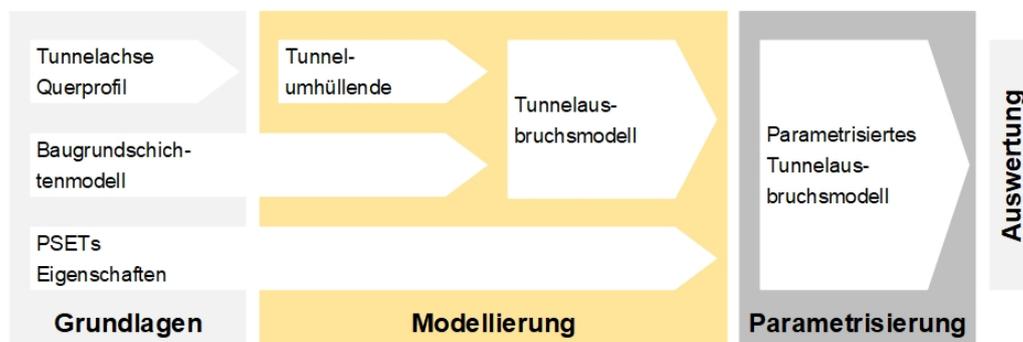


Abbildung 3.6: Modellierung im Prozess

Für dieses Anwendungsbeispiel gliedert sich die Modellierungsarbeit einerseits in die Erzeugung einer Tunnelumhüllenden und andererseits in die Erstellung des eigentlichen Tunnelausbruchmodells. Um dem Kapitel den nötigen Kontext zu verleihen, wird erwähnt, dass die gesamte Modellierung des Baugrundes mit Autodesk Civil 3D[®] erfolgt. Da die involvierten Fachplaner – Geologe, Tunnel- und Streckenplaner – dieses Produkt verwenden, ist es für dieses Anwendungsbeispiel naheliegend, ebenfalls mit Autodesk Civil 3D[®] zu arbeiten.

3.4.1 Tunnelumhüllende

Gestartet wird die Modellierungsarbeit in Autodesk Civil 3D[®] mit dem Erzeugen einer Tunnelumhüllenden, die in weiterer Folge als begrenzende Fläche für den aufzufahrenden Hohlraum (Tunnelausbruch) verwendet wird. Unter der Annahme, dass sowohl die Tunnelachse als auch die entsprechenden Querprofile bereits vorhanden sind, kann mit der Funktion *3D-Profilkörper* entlang einer gewünschten Achse, abschnittsweise ein Profilkörper erstellt werden. Aus diesem Profilkörper wird im nächsten Schritt, mit der Funktion *3D-Profilkörper-Volumenkörper extrahieren*, ein Volumenkörper erstellt. Mit dem Befehl *INFLÄCHKONV* wird daraus eine Fläche erzeugt. Abbildung 3.7 zeigt eine solche umhüllende Fläche

eines Tunnelabschnittes, welcher im Bereich des konventionellen Tunnelvortriebs liegt.

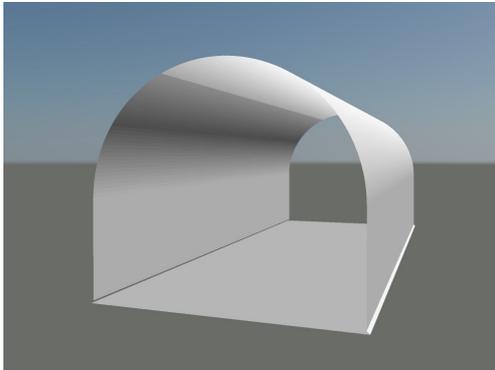


Abbildung 3.7: Umhüllende Fläche eines Tunnelabschnittes

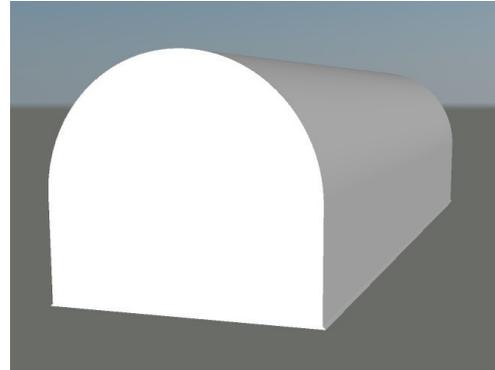


Abbildung 3.8: Gesamte Umhüllende eines Tunnelabschnittes

Damit ist das Herausschneiden oder Kappen des Tunnelausbruchs noch nicht möglich, da diese umhüllende Fläche an den Enden des Tunnelabschnittes noch offen ist. Mit dem Befehl *FLÄCHEFLICK* werden diese abschließenden Flächen erzeugt und mit der umhüllenden Fläche vereinigt. In Abbildung 3.8 ist die fertige Tunnelabschnittsumhüllende dargestellt. Eine solche Fläche ist für alle weiteren Tunnelabschnitte – immer im Bereich eines durchgehenden Querprofils – zu erstellen. Die vom Autor vorgestellte Vorgehensweise ist nur eine von vielen möglichen Wegen, um diese umhüllende Fläche zu erzeugen. Das einzig wichtige Kriterium ist, dass die Fläche einen vollständig umschlossenen Raum bildet.

3.4.2 Tunnelausbruch

Sind die Tunnelabschnittsumhüllenden vollständig vorhanden, werden die Tunnelausbruchkörper erstellt, wie es in den Abbildungen 3.9 und 3.10 dargestellt ist. Mit dem Befehl *KAPPEN* werden die entsprechenden Bodenschichtenvolumen an den umhüllenden Flächen getrennt, wobei beide Teile der neuen Volumenkörper zu behalten sind.

Für die spätere eindeutige Zuordnung werden die Ausbruchkörper auf die entsprechenden Layer mit dem Suffix *_Ausbruch* verschoben. Bei einer Anwendung der Layer-Filterung ist es möglich, ein Tunnelausbruchmodell darzustellen. Im Zuge der Bearbeitung hat sich herausgestellt, dass die abschnittsweise Ermittlung der Tunnelausbrüche zwar mehr Vorbereitung gegenüber einer vollständigen Ermittlung bedarf, diese aber eine viel geringere Rechenleistung erfordert und wesentlich schneller durchführbar ist. Zudem ist der Baugrund, durch die Teilung in definierte Gebirgsbereiche, ohnedies in einzelne Volumenkörper unterteilt. Versuche den Ausbruch über die gesamte Tunnellänge und alle Bodenschichten hinweg zu erzeugen, haben den verwendeten Rechner regelmäßig überfordert bzw. sind in Rechenzeiten im Umfang von Tagen resultiert. Deshalb empfiehlt der Autor die Vorgangsweise der abschnittweisen Ermittlung, die auch automatisiert erfolgen könnte.

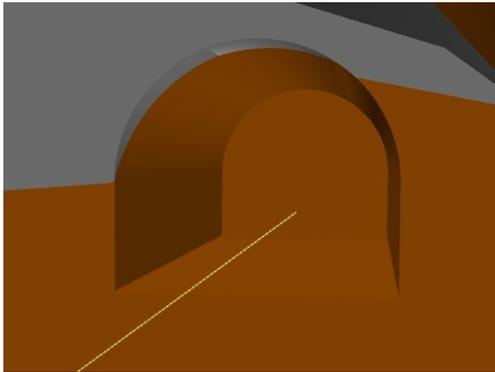


Abbildung 3.9: Teiltunnelausbruch im Baugrundsichtenmodell

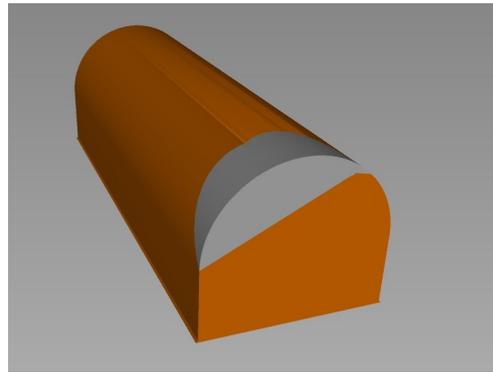


Abbildung 3.10: Abschnitt des Tunnelausbruchs als Volumenkörper

3.5 Parametrisierung

Ist die Modellierung abgeschlossen, folgt im Prozess die Parametrisierung des Modells, wie in Abbildung 3.11 farblich hervorgehoben. Dieser, auch Attribubierung genannte Schritt, unterteilt sich wiederum in zwei Arbeitsschritte. Als Erstes sind dem Modell definierte Parameter in Form von Property Sets (PSETs) hinzuzufügen, um diese im zweiten Schritt mit konkreten Werten zu befüllen.

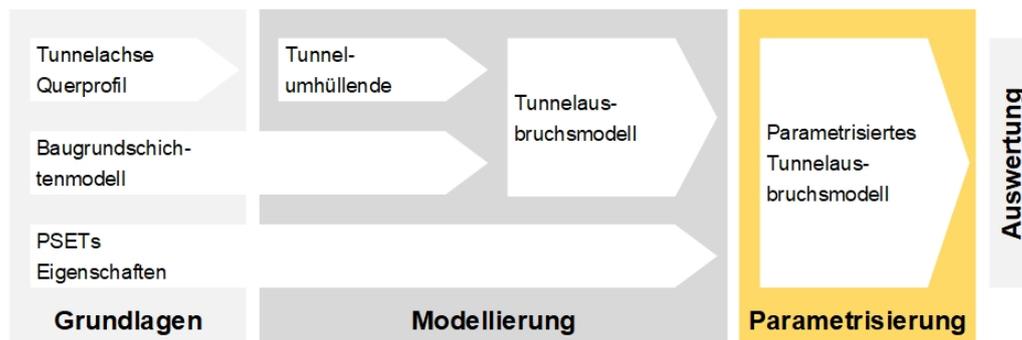


Abbildung 3.11: Parametrisierung im Prozess

3.5.1 Parametrisierung des Baugrunds

Mit der Parametrisierung des Baugrundmodells werden die in Kapitel 3.3.3 beschriebenen PSETs *Koesa_Pset_IfcGeotechnicalStratum*, *Koesa_Pset_IfcGeotechnicalStratum_Gebirgsverhaltenstypen* und *Koesa_Pset_IfcGeotechnicalStratum_Ortsbrustverhalten* mit dem Tunnelausbruchmodell zusammengeführt. Es gilt die Schnittstelle vom MMS, auf dem die PSETs hinterlegt sind, und dem Tunnelausbruchmodell, welches in Autodesk Civil 3D[®] bearbeitet wird, zu überbrücken. Eine Lösung bietet das European BIM Standards Tool (EBIM), entwickelt von CAD Anwendungen Muigg KG. Das Tool ist am Autodesk App Store zum Download verfügbar und funktioniert auch mit Autodesk Revit[®]. Abbildung 3.12 zeigt die Benutzeroberfläche des European BIM Standards Tools. Es sind dabei meh-

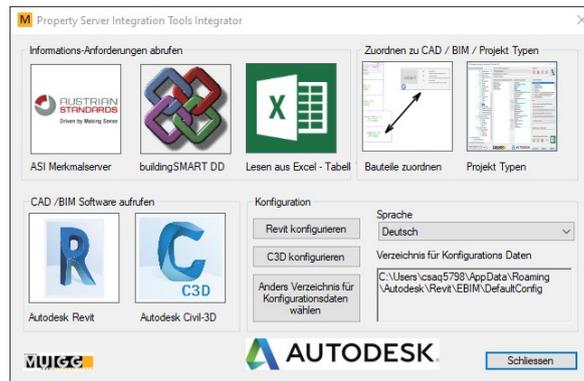


Abbildung 3.12: Startfenster des European BIM Standards Tool

rere Schritte durchzuführen. Begonnen wird mit dem Abrufen der Informations-Anforderungen. Dies kann über eine Verbindung mit dem MMS - Option *ASI Merkmalsserver* - geschehen, wie es in dieser Arbeit vorgestellt wird. Es ist auch möglich, die Informations-Anforderungen aus dem buildingSMART Data Dictionary zu beziehen oder eine Excel-Tabelle zu verwenden. Diese Methode ist nicht auf die Verwendung von Autodesk-Produkten beschränkt. Beispielsweise bieten Nemetschek Allplan[®] und Graphisoft ArchiCAD[®] ebenfalls eine Verbindung zum MMS an.

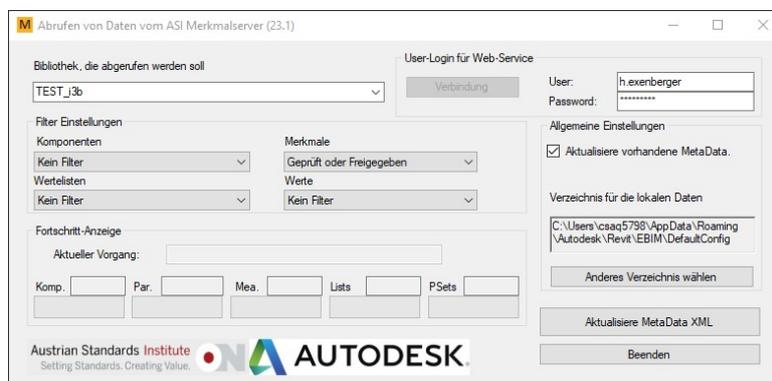


Abbildung 3.13: Abrufen der Informations-Anforderungen vom MMS

Abbildung 3.13 zeigt die Benutzeroberfläche zur Ansteuerung des MMS, in welcher die gewünschte Bibliothek gewählt und entsprechende Filter-Einstellung getroffen werden können. Damit wird – stark vereinfacht ausgedrückt – eine lokale Kopie der gewünschten Datenbankeinträge am Rechner erstellt. Für diese Daten hat in einem nächsten Schritt die Zuordnung zu den gewünschten Autodesk Civil 3D[®] Bauteilkategorien zu erfolgen, was über den Button *Bauteile zuordnen* gemacht wird. In Abbildung 3.14 ist diese Zuordnung dargestellt. Aufgrund der getätigten Erfahrung ist es wichtig zu erwähnen, dass die entsprechende Autodesk Civil 3D[®] Datei erst nach dieser Zuordnung geöffnet werden darf. Ist das Programm bereits geöffnet, können zwar PSETs erzeugt werden, die zuvor durchgeführte Zuordnung zu den Bauteilkategorien wird jedoch nicht

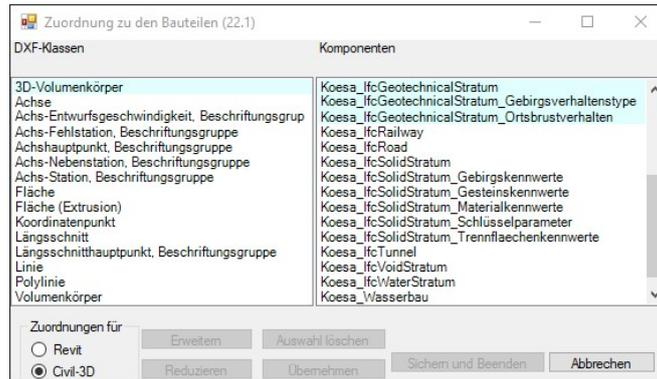


Abbildung 3.14: Zuordnung der PSETs zu den Autodesk Civil 3D[®] Bauteilkategorien

übernommen. Damit wird eine neuerliche Zuordnung nötig, was einen entsprechenden Mehraufwand erzeugt.

Nun erfolgt der Wechsel in das Baugrund- und Tunnelausbruchmodell in Autodesk Civil 3D[®]. Mit dem Befehl *ARCHCREATEPSETS* werden die zuvor zugeordneten PSETs für die entsprechenden DXF-Klassen erzeugt. Abbildung 3.15 zeigt exemplarisch die Erzeugung des PSET *Koesa_Pset_GeotechnicalStratum* für die DXF-Klasse der 3D-Volumenkörper.

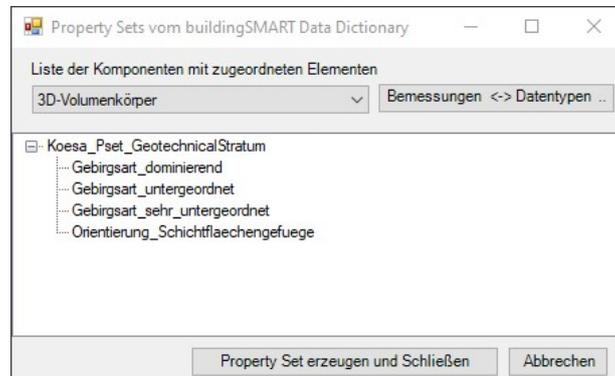
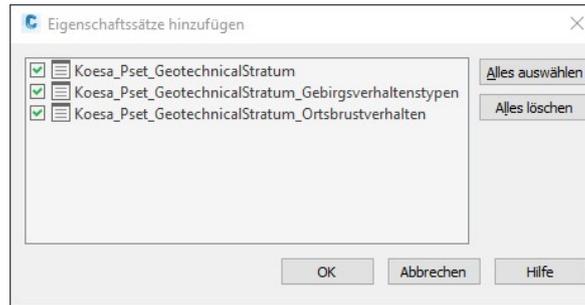


Abbildung 3.15: Erzeugung des PSET *Koesa_Pset_GeotechnicalStratum* für die DXF-Klasse 3D-Volumenkörper

In Autodesk Civil 3D[®] werden den drei PSETs die automatischen Eigenschaften *Layer* sowie *Volume* hinzugefügt. Dies geschieht im Stil-Manager, der über den Befehl *PROPERTYSETDEFINE* aufgerufen wird. Dieser Schritt ist insofern wichtig, da die gesamte Eigenschaftszuordnung auf der bewährten Layerstruktur aufbaut. Anschließend werden die PSETs zu den gewünschten Modellelementen hinzugefügt. Dazu werden die entsprechenden Elemente mithilfe der Layer-Steuerung ausgewählt und unter erweiterte Daten der Button *Eigenschaftssätze hinzufügen* angeklickt. Abbildung 3.16 zeigt exemplarisch die Auswahlmaske in Autodesk Civil 3D[®] zum Hinzufügen von PSETs.

Abbildung 3.16: Hinzufügen von PSET in Autodesk Civil 3D[®]

3.5.2 Einbringung konkreter Werte

Mit der im vorherigen Kapitel beschriebenen Parametrisierung des Baugrundes sind, vereinfacht ausgedrückt Container für konkrete Werte erzeugt worden, die in diesem nächsten Schritt befüllt werden. Dazu wird ein Prozess in drei Schritten, wie in Abbildung 3.17 dargestellt, unter Zuhilfenahme von Dynamo für Autodesk Civil 3D[®] und Excel angewandt. [33]

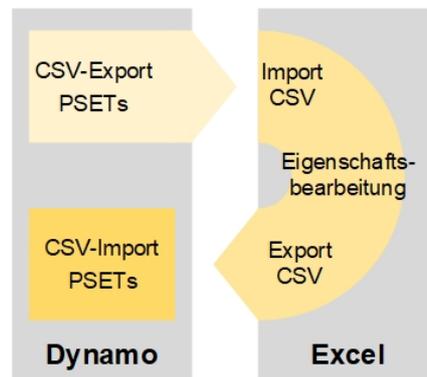


Abbildung 3.17: Prozess zum Hinzufügen der konkreten Werte

Im ersten Schritt werden die PSETs mit dem Dynamo-Skript *AutoCAD_Python_PSet_DumpPropertySetValuesToCSV* in eine CSV-Datei exportiert. Bei diesem Export wird für jedes im Modell vorhandene PSET eine CSV-Datei erstellt, die jedes Modellelement, dem das entsprechende PSET zugeordnet wurde, enthält. Die Modellelemente sind mit ihrem *Handle* eindeutig referenziert und durch die mitexportierte Eigenschaft des Layernamens für die weitere Bearbeitung identifizierbar. Nach erfolgtem Import der CSV-Datei in Excel kann damit begonnen werden, die konkreten Werte entsprechend einzutragen. Tabelle 3.3 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt einer solchen Excel-Tabelle für das PSET *Koesa_Pset_IfcGeotechnicalStratum*. Darin ist in der ersten Spalte der eindeutige *Handle* für die einzelnen Modellelemente zu sehen. In den Spalten vier bis sieben sind die entsprechenden konkreten Werte aus Tabelle 3.1 zu den vier beschriebenen Eigenschaften aus Kapitel 3.3.3 eingetragen. Die Zuordnung der Eigenschaften ist über den Layernamen in der zweiten Spalte erfolgt. In der dritten Spalte ist zudem ersichtlich, dass weitere automatische Eigenschaften, wie das Volumen,

mitexportiert werden können. [33]

	A	B	C	D	E	F	G
1	Handle	Layer	Volumen	Gebirgsart domi- nierend	Gebirgsart unterge- ordnet	Gebirgsart sehr- untergeordnet	Orientierung Schicht flaechengefuege
2	36D6B9	V_FLYSCH	73249189	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
3	36DB96	V_FLYSCH	724017	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
4	36DB59	V_FLYSCH	9001287	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
5	36DB90	V_FLYSCH_Ausbruch	1086	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
6	36DB44	V_FLYSCH_Ausbruch	1825	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
7	36DBA2	V_FLYSCH_GHT1	1056222	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
8	36DB9F	V_FLYSCH_GHT1_Ausbruch	2671	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
9	36DB99	V_FLYSCH_GHT1_Ausbruch	4318	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
10	36DB9C	V_FLYSCH_GHT1_Ausbruch	2137	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
11	36DB4D	V_FLYSCH_GHT1_Ausbruch	713	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
12	36DBAB	V_FLYSCH_GHT2	5791431	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
13	36DBA8	V_FLYSCH_GHT2_Ausbruch	26651	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
14	36DBA5	V_FLYSCH_GHT2_Ausbruch	27653	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
15	36DB50	V_FLYSCH_GHT2_Ausbruch	31	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
16	36DBC6	V_FLYSCH_GHT3	3625866	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
17	36DBC0	V_FLYSCH_GHT3_Ausbruch	7816	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig

Tabelle 3.3: Ausschnitt einer Excel Tabelle zum Befüllen eines PSET mit konkreten Werten

Für das Einbringen der Eigenschaften stehen alle Möglichkeiten, die Excel bietet, zur Verfügung. Ob die Zellen gesteuert über den Layernamen automatisch ausgefüllt, Auswahllisten verwendet oder die Werte kopiert werden, ist zweitrangig. Wichtig ist, dass es zu keinen Abweichungen bei den Bezeichnungen und Beschreibungen kommt, da damit eine Auswertung am Ende deutlich erschwert wird. Anschließend wird die Excel-Liste wieder im selben CSV-Format abgespeichert, wie es vom Dynamo-Export erzeugt wird. Nur dann funktioniert der folgende Rückimport mit dem Dynamo-Skript *AutoCAD_Python_Pset_Update_PropertySetValuesByCSV* in das Baugrundmodell fehlerfrei. Vereinfacht zusammengefasst werden durch die eindeutige *Handle*-Referenz aus der CSV-Datei die Container des entsprechenden PSETs mit den importierten Werten befüllt oder auch ersetzt. Die drei vollständigen Tabellen sind in Anhang B angeführt. [33]

Abbildung 3.18 zeigt beispielhaft die Eigenschaften eines Volumenkörpers in Autodesk Civil 3D[®], der ein Tunnelausbruchsvolumen im Bereich eines TVM-Vortriebs darstellt. Einerseits ist durch die Zuordnung in einen Gebirgsbereich, das PSET zu der Gebirgsartenverteilung mit diesem Volumenkörper verbunden. Andererseits bedingt der TVM-Vortrieb in diesem Tunnelabschnitt eine Definition sowohl der GVTs, wie auch des Ortsbrustverhaltens durch eine Zuordnung des jeweiligen PSET. Als Ausblick auf eine mögliche Erweiterung der Parameterstrukturen ist außerdem das PSET *Koesa_Pset_Allgemein* hinzugefügt worden. Zukünftig wird es nötig sein eine Reihe weiterer Parameter, wie das Bezugsgeleis, Kilometrierung, Bezeichnungen und viele mehr, zu definieren. Dies dient unter anderem der besseren Verwaltung und Auswertung der Informationen. Dem allgemeinen PSET sind die Lage betreffende Eigenschaften hinzugefügt worden. Das Abschnittskürzel *SET3-2* der Layerbezeichnung beschreibt zwar eine genau Lage entlang der Gleisachse, jedoch nur mit der entsprechenden Tabelle zur Übersetzung. Um diese Lageinformationen auf den ersten Blick besser lesbar zu machen und auch die spätere Auswertung zu vereinfachen, sind deshalb sowohl der Abschnittsanfang als *km-Anfang*, als auch das Abschnittsen-

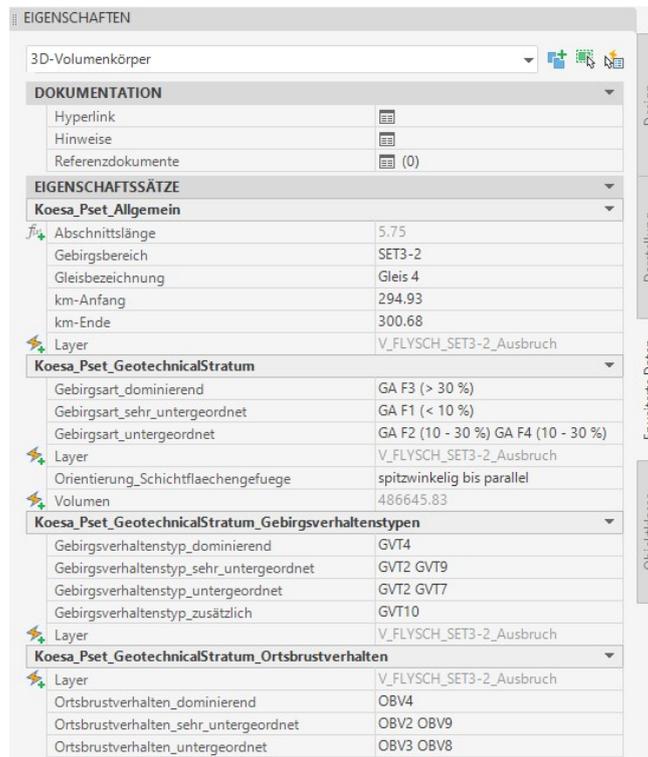


Abbildung 3.18: Autodesk Civil 3D[®] - Eigenschaften eines Tunnelausbruchskörpers, dem alle drei Test-PSETs zugefügt sind

de als *km-Ende* hinzugefügt worden. Die Eigenschaft *Abschnittslänge* ergibt sich automatisch als Differenz aus Abschnittsende und Abschnittsanfang. Mit dem Attribut zur Gleisbezeichnung ist außerdem eindeutig ersichtlich mit welchem Gleis der Tunnelabschnitt verknüpft ist. Viele der relevanten Informationen zu diesem Abschnitt des aufzufahrenden Hohlraumes (Ausbruchskörper) sind so auf einen Blick ersichtlich.

3.6 Auswertung

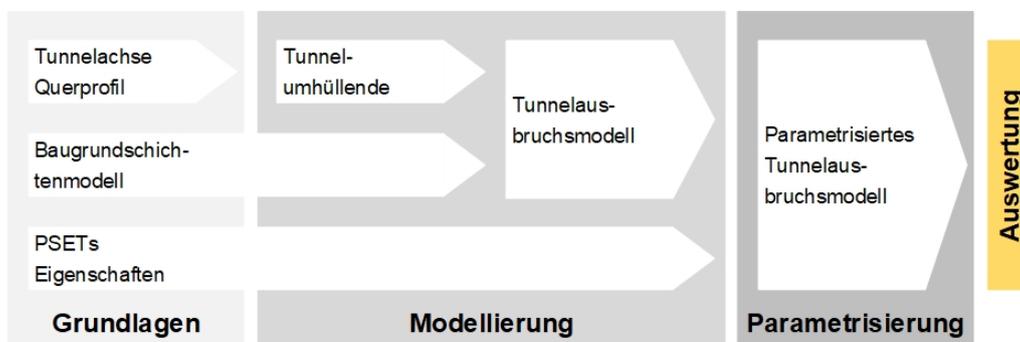


Abbildung 3.19: Auswertung in der Prozessstruktur

Die Auswertung – in Abbildung 3.19 farblich hervorgehoben – ist der letzte Schritt in der Prozessstruktur. In diesem Kapitel wird dazu eine mögliche Auswertung mit Excel vorgestellt. Diese Herangehensweise stellt für vorliegendes Anwendungsbeispiel eine praktikable und logische Lösung dar, um die geotechnische Planung bis zur Bestimmung der Gebirgsverhaltenstypen durchzuführen. Mit den in Kapitel 3.5.2 beschriebenen Excel Tabellen zur Einbringung der konkreten Werte existieren bereits Tabellen, die sämtliche zur Auswertung benötigten Informationen enthalten. Zur Auswertung gelangen daraus einerseits die Gesamtvolumina des aufzufahrenden Hohlraums der einzelnen Baugrundsichten je Homogenbereich und andererseits die Verteilung der Gebirgsverhaltenstypen. Anwendung finden dafür verschieden Excel-eigene Filteroptionen, Sortierfunktionen und weitere Formeln. Weiters werden die Informationen aus dem allgemeinen PSET *Koesa_Pset_Allgemein* über die eindeutige Layerstruktur hinzugefügt, um die Auswertungsoptionen zu erweitern. In Zukunft wird dieser Schritt mit hierarchisch organisierten Parametern obsolet werden.

Kategorie	Gesamtvolumen [m ³]	Gebirgsart_dominierend	Gebirgsart_untergeordnet	Gebirgsart_sehr_untergeordnet	Orientierung_Schicht_flaechengefuege	km-Anfang	km-Ende	Abschnittslänge
V_FLYSCH_Ausbruch	2911	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.			
V_FLYSCH_GHT1_Ausbruch	9838	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	307,7675	307,83	0,0625
V_FLYSCH_GHT2_Ausbruch	54335	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	307,83	308,18	0,35
V_FLYSCH_GHT3_Ausbruch	31857	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	308,18	308,4	0,22
V_FLYSCH_GHT4_Ausbruch	111761	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	308,4	309,16	0,76
V_FLYSCH_GHT5_Ausbruch	2512	GA Q8 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F2 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	309,16	309,19	0,03
V_FLYSCH_GHT6_Ausbruch	1325	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	309,19	309,86	0,665
V_FLYSCH_SET2_Ausbruch	20850	GA Q4 (> 30 %)	GA Q2 (10 - 30 %) GA Q5 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %) GA F2 (< 10 %) GA F3 (10 %) GA F4 (10 %)	schleifend bis parallel	294,343	294,75	0,407
V_FLYSCH_SET3-1_Ausbruch	38882	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	spitzwinkelig bis parallel	294,75	294,93	0,175
V_FLYSCH_SET3-2_Ausbruch	969076	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	spitzwinkelig bis parallel	294,925	300,68	5,755
V_FLYSCH_SET4-1_Ausbruch	140686	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	300,68	301,52	0,838
V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	999211	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	301,518	307,42	5,902
V_FLYSCH_SET4-3_Ausbruch	56917	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	307,42	307,67	0,25
V_FLYSCH_SET5_Ausbruch	1402	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	307,67	307,72	0,053
V_KONGLOMERAT_SET2_Ausbruch	29	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	294,343	294,75	0,407
V_LOCKERGESTEIN_Ausbruch	19	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.			
V_LOCKERGESTEIN_GHT3_Ausbruch	802	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	308,18	308,4	0,22
V_LOCKERGESTEIN_GHT4_Ausbruch	12	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	308,4	309,16	0,76
V_LOCKERGESTEIN_GHT5_Ausbruch	1948	GA Q8 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F2 (< 10 %)	k.A.	309,16	309,19	0,03
V_LOCKERGESTEIN_GHT6_Ausbruch	57264	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	309,19	309,86	0,665
V_LOCKERGESTEIN_SET1_Ausbruch	135211	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	293,353	294,34	0,99
V_LOCKERGESTEIN_SET2_Ausbruch	69483	GA Q4 (> 30 %)	GA Q2 (10 - 30 %) GA Q5 (10 - 30 %)	GA Q3 (< 10 %)	k.A.	294,343	294,75	0,407
V_LOCKERGESTEIN_SET5_Ausbruch	120	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	307,67	307,72	0,053

Tabelle 3.4: Auswertung der Gesamtausbruchsmassen je Gebirgsbereich und Baugrundsicht inklusive Gebirgsartenparameter

Tabelle 3.4 zeigt die Auswertung der Gesamtvolumina je Baugrundsicht und Gebirgsbereich für alle Ausbruchsvolumina inklusive der zugehörigen Gebirgsartenparameter. Es sind darin alle Volumenkörper eines Layers summiert und die gemeinsamen Eigenschaften bezüglich Gebirgsartenverteilung aufgelistet. Ein Lesebeispiel für Zeile 9 (hellgrau hinterlegt) der Tabelle lautet, dass der aufgefahrene Tunnelhohlraum im Gebirgsbereich SET2 20.850 m³ der Gesteinsart Flysch enthält und weiters folgende Verteilung der Gebirgsarten aufweist:

- Dominierende Gebirgsart mit mehr als 30 % Eintrittshäufigkeit ist GA Q4.
- Als untergeordnete Gebirgsart, mit 10-30 % Auftrittshäufigkeit, sind GA Q2 und GA Q5 angegeben.
- GA F1, GA F2, GA F3 und GA F4 treten jeweils mit weniger als 10 % als sehr untergeordnete Gebirgsarten auf.

- Außerdem ist die Orientierung des Schichtflächengefüges in diesem Bereich schleifend bis parallel.

Diese Auswertung der gesamten Ausbruchsvolumina je Homogenbereich ist vor allem in Hinblick auf den BIM-Anwendungsfall Trassenvariantenstudie interessant.

Die Auswertung der GVT-Verteilung erfolgt etwas differenzierter in zwei Schritten. Als Erstes werden die Gesamtvolumina für die einzelnen Homogenbereiche mit den zugehörigen GVT-Verteilungen in Tabelle 3.5 ausgewertet. Für eine bessere Sichtbarkeit der Verortung der Homogenbereiche, sind in dieser Tabelle beispielhaft die Informationen zur Kilometrierung angefügt. Die Prozentangaben in Spalte 6 stellen das Verhältnis zwischen den einzelnen Gesamtvolumen der Homogenbereiche und dem Gesamtvolumen aller unter Tage ausgebrochenen Bereiche dar.

Homogenbereich	km-Anfang	km-Ende	Abschnittslänge	Volumen		Gebirgsverhaltenstyp dominierend	Gebirgsverhaltenstyp untergeordnet	Gebirgsverhaltenstyp sehr untergeordnet	Gebirgsverhaltenstyp zusätzlich
				[m ³]	[%]				
SET2	294,343	294,75	407	90362	3,7%	GVT7 GVT8 GVT9	-	-	GVT10
SET3-1	294,75	294,925	175	38882	1,6%	GVT4	-	GVT2 GVT7	GVT10
SET3-2	294,925	300,68	5755	969076	39,3%	GVT4	GVT2 GVT9	GVT2 GVT7	GVT10
SET4-1	300,68	301,518	838	140686	5,7%	GVT4	GVT2 GVT9	GVT3 GVT8 GVT9	GVT10
SET4-2	301,518	307,42	5902	999211	40,5%	GVT4	GVT2 GVT9	GVT3 GVT8 GVT9	GVT10
SET4-3	307,42	307,67	250	56917	2,3%	GVT7	-	-	GVT10
GHT2	307,83	308,18	350	54335	2,2%	GVT7	-	GVT8 GVT9	GVT10
GHT4	308,4	309,16	760	111773	4,5%	GVT4	GVT2	GVT3 GVT8 GVT9	GVT10
GHT5	309,16	309,19	30	4460	0,2%	GVT7	-	-	GVT10
				Σ 2465701					

Tabelle 3.5: Verteilung der Gebirgsverhaltenstypen je Homogenbereich inklusive dazugehörige Gesamtvolumen

Darauf aufbauend wird eine zweite Auswertung für die GVT-Verteilung durchgeführt. Aufgrund ungenauer Angaben zur prozentualen Verteilung der einzelnen GVTs, kann keine Auswertung für die gesamte Auftretshäufigkeit jedes GVT erfolgen. Es ist jedoch möglich, eine Verteilung der einzelnen GVT-Kombinationen innerhalb der drei Kategorien zur Definition der Auftretshäufigkeit (dominierend, untergeordnet und sehr untergeordnet) aufzustellen. Diese Verteilung ist in Tabelle 3.6 für das Anwendungsbeispiel durchgeführt. Die Anteile ohne GVT-Definition ergeben sich daraus, dass manche Homogenbereiche keine untergeordneten oder sehr untergeordneten GVTs enthalten.

GVT dominierend > 30%			GVT untergeordnet 10-30%			GVT sehr untergeordnet <10%			GVT zusätzlich		
GVT	Gesamtvolumen	Anteil	GVT	Gesamtvolumen	Anteil	GVT	Gesamtvolumen	Anteil	GVT	Gesamtvolumen	Anteil
GVT7 GVT8 GVT9	90362 m ³	3,7%	-	244956 m ³	9,9%	-	151739 m ³	6,2%	GVT10	2465701 m ³	100,0%
GVT4	2259628 m ³	91,6%	GVT2 GVT9	2108972 m ³	85,5%	GVT2 GVT7	1007958 m ³	40,9%			
GVT7	115712 m ³	4,7%	GVT2	111773 m ³	4,5%	GVT3 GVT8 GVT9	1251670 m ³	50,8%			
						GVT8 GVT9	54335 m ³	2,2%			
2465701 m ³			2465701 m ³			2465701 m ³			2465701 m ³		

Tabelle 3.6: Kategorisierte Betrachtung des Anteils einzelner GVT-Kombinationen am Gesamtvolumen

Bei Vorhandensein einer genaueren Angabe der prozentualen Verteilung, können diese Verteilungen auf die Abschnittslänge oder das Abschnittsvolumen umge-

legt und unabhängig von den Kategorien zur Definition der Auftrittshäufigkeit ausgewertet werden.

Auf die selbe Art und Weise erfolgte die Auswertung des Ortsbrustverhaltens. Der prozentuale Anteil am Gesamtvolumen je Homogenbereich ist in Tabelle 3.7 aufgelistet. Der Vollständigkeit halber ist auch die kategorisierte Auswertung (dominierend, untergeordnet, sehr untergeordnet) der Verteilung des Ortsbrustverhaltens in Tabelle 3.8 angeführt.

Homogenbereich	km-Anfang	km-Ende	Abschnittslänge	Volumen		Ortsbrustverhalten_dominierend	Ortsbrustverhalten_untergeordnet	Ortsbrustverhalten_sehr_untergeordnet
				[m ³]	[%]	> 30%	10 - 30%	< 10%
SET3-2	294,925	300,68	5755	969076	46,0%	OBV4	OBV3 OBV8	OBV2 OBV9
SET4-1	300,68	301,518	838	140686	6,7%	OBV4	OBV3 OBV8 OBV9	OBV2 OBV7
SET4-2	301,518	307,42	5902	999211	47,4%	OBV4	OBV3 OBV8 OBV9	OBV2 OBV7
				Σ 2108972				

Tabelle 3.7: Verteilung des Ortsbrustverhaltens je Homogenbereich

OBV_dominierend			OBV_untergeordnet			OBV_sehr_untergeordnet		
> 30%			10-30%			<10%		
OBV	Gesamtvolumen [m ³]	Anteil	OBV	Gesamtvolumen [m ³]	Anteil	OBV	Gesamtvolumen [m ³]	Anteil
OBV4	2108972 m ³	100,0%	OBV3 OBV8	969076 m ³	46,0%	OBV2 OBV9	969076 m ³	46,0%
			OBV3 OBV8 OBV9	1139896 m ³	54,0%	OBV2 OBV7	1139896 m ³	54,0%
	Σ 2108972			Σ 2108972			Σ 2108972	

Tabelle 3.8: Kategorisierte Betrachtung des Anteils einzelner Ortsbrustverhaltenskombinationen am Gesamtvolumen

3.7 Ergebnisse des Anwendungsbeispiels

Abschließend werden in diesem Kapitel die Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse des Anwendungsbeispiels diskutiert. Es sind darin bereits viele praxisnahe Ansätze für die Umsetzung des digitalen, parametrisierten Baugrundmodells enthalten und es kann als „proof of concept“ gesehen werden. Im Zuge der Projektbearbeitung sind jedoch auch etliche Fragestellungen aufgetaucht, die zum Teil vorerst mit einem work around gelöst oder noch nicht gelöst werden konnten. Daraus ergibt sich einiges Optimierungspotential, das mit den Erkenntnissen und offenen Fragen in weiterer Folge als Entwicklungsgrundlage für den methodischen Prozess zur Generierung eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells dient.

3.7.1 Gewonnene Erkenntnisse

- Mit dem gezeigten Workflow zur Integration von standardisierten Parametern in das Modell, wird eine wesentliche Anforderung der BIM-Methode erfüllt. Als Single Source of Truth (SSOT) für alle Parameter und Property Sets ist der Merkmalsserver ein wesentlicher Baustein und funktioniert bereits zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit. Klar definierte und unveränderliche Parameter sind für alle Bearbeitungsschritte essentiell, vor allem aber in der Auswertung. Diese können mit dem European BIM Standards Tool in das Modell geladen werden. Autodesk Civil 3D[®] ist in der

Lage, diese Parameterstrukturen in Grundzügen zu verarbeiten und zu verwalten. Zukünftig wird sich zwar die Anzahl der zu verarbeitenden und bearbeitenden Parameter noch drastisch erhöhen, die Vorgangsweise zur Implementierung dieser wird jedoch, aus Sicht des Autors, die selbe sein, wie jene der Testparameter des Anwendungsbeispiels. Weiters funktioniert dieser Workflow unabhängig von den Softwareprodukten immer ähnlich. Parameter sind in geordneter Struktur auf einer Datenbank zu hinterlegen, mit einem Verknüpfungstool in die verwendete Modellierungssoftware zu transferieren und dort zu be- und verarbeiten. Abbildung 3.20, welche von Fröch et al. in „Merkmalsserver im Open-BIM-Prozess“ entwickelt wurde, verdeutlicht das Zusammenspiel zwischen dem MMS, den Parametern und dem Modell.

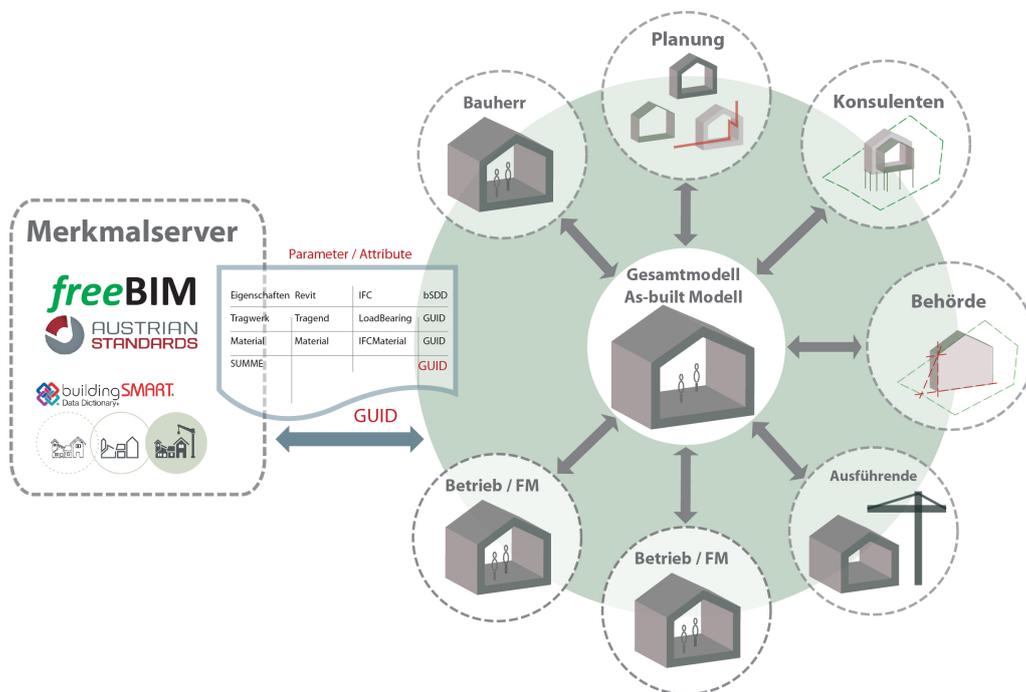


Abbildung 3.20: BIM-Prozessschema des Zusammenwirkens von MMS, Parameter und Modell [26, S. 341]

- Aufbauend auf der derzeitigen verbreiteten Arbeitsweise mit einer eindeutigen Layerstruktur, ist rasch klar geworden, dass die Eindeutigkeit der Objekte im Modell ebenfalls über eine eindeutige Layerstruktur erfolgen soll. Damit werden bekannte und erprobte Arbeitsabläufe beibehalten.
- Als vorteilhaft hat sich außerdem die im Projekt angewandte, integrale Arbeitsweise erwiesen. Der direkte Zugriff für alle Projektbeteiligten auf die aktuellen Modelle minimiert Latenzzeiten und führt weiters zu einer gelebten Transparenz innerhalb des Projektteams.
- Weiters hat sich der Kontakt mit den verschiedenen Softwareherstellern, den der Autor über die Universität und das i3b erhalten hat, zum Zeitpunkt der Bearbeitung als sehr nützlich erwiesen. Da sich viele der Systeme gerade im Aufbau befinden bzw. um Infrastrukturthemen erweitert werden,

konnten auf diesem Weg etliche Ideen bei den Herstellern deponiert und einige Probleme und Wünsche direkt gelöst und umgesetzt werden.

- Mit Beginn der Bearbeitung ist die Rechenleistung des vom Autor verwendeten Rechners an seine Grenzen gestoßen. Als eine mögliche Lösung für dieses Problem wurde der Kontakt mit dem Team für High Performance Computing der UIBK gesucht. Im Zuge erster Gespräche hat sich dabei jedoch herausgestellt, dass die dort verwendeten Linux-Systeme nicht in der Lage sind, die verwendeten Softwareprodukte auszuführen. Damit war eine Kooperation für dieses Projekt ausgeschlossen. In Zukunft könnte eine solche Kooperation jedoch erstrebenswert sein.

3.7.2 Optimierungspotentiale

Als direkte Ableitung vom Anwendungsbeispiel haben sich einige Punkte ergeben, welche aus Sicht des Autors Optimierungspotential bergen. Das können reduzierte Fehlerquellen sein, die Auflösung von work arounds, fehlende Schnittstellentransparenz oder Performancesteigerungen.

- Das CSV-Format im Arbeitsschritt der Einbringung von konkreten Baugrundwerten, hat sich im Zuge der Projektbearbeitung als große Fehlerquelle erwiesen. Konkret nicht das Format selber, sondern die Konvertierung in bzw. aus dem Excel-Format. Mit vergleichsweise einfachen Programmierschritten sollte eine direkte Export- und Importoption von Excel-Tabellen in Dynamo ermöglicht und eine Fehlerhäufung reduziert werden können.
- Großes Optimierungspotential liegt außerdem in der Automatisierung des Prozesses. Beispielsweise ist eine Automatisierung der Schritte vom digitalen parametrisierten Baugrundmodell bis zum Tunnelausbruchmodell erstrebenswert. Damit wird es möglich, verschiedene Trassenvarianten schneller und detaillierter miteinander zu vergleichen. Auch dieser Schritt sollte sich mit einem überschaubaren Programmieraufwand verwirklichen lassen. Weitere Schritte zur Automatisierung des gesamten Prozesses sollten gegebenenfalls geprüft werden.
- Mehr Aufwand, aber dadurch nicht weniger wichtig, wird eine Ausrichtung der Modellierssoftwares auf die Projektgröße von Infrastrukturprojekten. Gerade im Bereich der Geologie ist eine Gesamtbetrachtung des Modells wichtig, um Zusammenhänge zu erkennen und die richtigen Ableitungen zu treffen. Ziel der Softwareentwicklungen sollte neben dem reinen Verarbeitungsvermögen auch eine performante Verarbeitung der Daten sein.
- Verbesserungsmöglichkeiten gibt es außerdem im Handling der Parameter in allen verwendeten Softwareprodukten. Dies betrifft eine vereinfachte Verwaltung der Eigenschaften auf dem MMS und die benötigte Unterstützung komplexerer Parameterstrukturen. Es schließt auch einen fehlerfreien und vollständigen Austausch zwischen den unterschiedlichsten Produkten mit ein.

Damit sind einige der wichtigsten Verbesserungsvorschläge, die sich direkt aus dem Anwendungsbeispiel ergeben haben, aufgelistet. Dem Autor ist bewusst, dass es umfangreiche Stellschrauben für eine weitere Optimierung gibt. Um die-

se vollumfänglich abzubilden, ist jedoch eine Validierung an unterschiedlichen Projekten und eine Absprache mit weiteren potentiellen Anwendern nötig.

Urheberrechtshinweise

Die Urheberrechte für sämtliche Planungsunterlagen und Modelle, die in diesem Anwendungsbeispiel verwendet wurden, liegen bei den jeweiligen Fachplanern.

- Geologische Planung und Baugrundmodell – *3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH* und *BGG Consult Dr. Peter Waibel ZT GmbH*
- Geotechnische Planung, Tunnelplanung und -modelle – *IGT Geotechnik und Tunnelbau ZT GmbH*
- Streckenplanung, Gleisachsen – *IBK Ingenieurbüro Kronawetter ZT GmbH* und *SPIRK + Partner Ingenieur GmbH*

Hinweis Anschauungsmodell

Unter folgendem Link wird bis auf Widerruf ein Teilausschnitt des ausgearbeiteten Baugrundmodells verfügbar sein.

<https://www.uibk.ac.at/t2b/forschung/mast/2020-exenberger/>



4 Methodischer Prozess zur Entwicklung eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells

Dieses Kapitel stellt einen methodischen Prozess vor, wie ein digitales parametergestütztes Baugrundmodell eine vollumfängliche Anwendung in der geotechnischen Planung für Untertagebauten findet. Zu Beginn werden dazu die grundlegenden Gedanken und Überlegungen, auf denen dieser Prozess aufbaut, in der Konzeptentwicklung dargestellt. Das zweite Kapitel erläutert eine konzeptionelle Umsetzung der Methode in Anlehnung an die derzeitige analoge geotechnische Planung, wie sie in Kapitel 2.3 beschrieben ist. Anschließend werden einige der Vorteile gegenüber der derzeitigen konventionellen Planung beschrieben. Abschließend werden mögliche BIM-Anwendungsfälle aufgelistet. Ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen und Ergänzungen wird außerdem im abschließenden Kapitel Zusammenfassung und Ausblick gegeben.

Zunächst aber wird noch dargelegt, worin die allgemeinen Vorteile und folglich die Motivation für die Beschreibung eines solchen methodischen Prozesses liegen. Die Entwicklung von BIM-Methoden ist lange Zeit auf den Hochbau fokussiert gewesen. Derzeit wird aber an vielen Fronten an einer Umsetzung für den Infrastrukturbau und somit auch für den Tunnelbau, speziell den Baugrund gearbeitet. Bereits angesprochen wurde das Infrastruktur-Informationsmodell (iiM) das eine BIM-konforme, element-modellbezogene Projektabwicklung vorsieht. Eine solche Vorgehensweise bietet, im Vergleich zu klassischen Herangehensweisen, eine Vielzahl an Vorteilen und neuen Möglichkeiten. Einige Beispiele mit Bezug zum Tunnelbau sind nachfolgend aufgelistet: [24, 25]

- Die Erarbeitung von Trassenvarianten und die Optimierung dieser wird erheblich vereinfacht und Änderungen können leichter durchgeführt und durchgesetzt werden.
- In weiterer Folge ist die Visualisierung von Trassen im Raum wesentlich vereinfacht.
- Die Festlegung von Vortriebsklassen und Ausbruchsmengen wird erleichtert.

- Simulationen des Bauverfahrens werden ermöglicht und eine darauf aufbauende Auswahl derselben.
- Vorhersagen für projekt- und trassenabhängige Kosten- und Terminentwicklungen werden präziser möglich sein. Außerdem kann das Risikomanagement fortlaufend mit eingebunden werden.
- Es werden Kollisionsprüfungen mit Schutzgebieten und bestehender Infrastruktur vereinfacht.

Aufgelistet sind nur einige der umfangreichen Vorteile, die speziell im Tunnelbau eine Rolle spielen. Alle Infrastrukturprojekte haben im Vergleich zu Bauwerken aus dem Hochbau eine hohe Lebensdauer und in weiterer Folge ein aufwändigeres Sicherheits- und Wartungskonzept. Ziel aller Methoden für den Infrastrukturbau sind die wesentlich einfacheren Analysemittel, fortgeschrittenere Optimierungsmöglichkeiten und lebenszyklusorientierte Auswertungen in einem Bruchteil der derzeit benötigten Zeit. [23, 24]

Unter Berücksichtigung dieser Anregungen, sowie der Ergebnisse des Anwendungsbeispiels, wird nun der methodische Prozess zur Generierung eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells erörtert.

4.1 Konzeptgrundlagen

Entgegen der Herangehensweise im Anwendungsbeispiel, einen Prozess zu entwickeln, der sich zum Zeitpunkt der Bearbeitung bereits umsetzen hat lassen, ist das nunmehrige Ziel, einen idealen, holistisch gedachten Prozess zu entwickeln. Dabei soll aber trotzdem der schwierige Brückenschlag zwischen der vollständigen Implementierung der BIM-Methode und der gleichzeitig größtmöglichen Berücksichtigung von gewohnten Arbeitsprozessen erreicht werden. Entstehen soll ein flexibles System, das einerseits vollumfänglich BIM-fähig ist und andererseits die differenzierten Herangehensweisen unterschiedlichster Stakeholder ermöglicht. Grundlegend ist dabei, dass die Anforderungen an das Baugrundmodell – abhängig von Auftraggeber, Auftragnehmer, Projektphase und Anwendungsfall – in den Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA) und im BIM-Abwicklungsplan (BAP), wie in Kapitel 2.1 erläutert, ausgeführt werden. Dieser Ansatz bedingt, dass das Konzept für unterschiedliche Projektphasen unterschiedliche Modelle vorsieht, welche gleichzeitig immer die Anforderung einer Single Source of Truth (SSOT) für alle baugrundbezogenen Informationen erfüllen.

Der Entwicklung sind viele grundlegende Überlegungen vorangegangen. Auch die Literatur ist nach bereits definierten Anforderungen an ein Baugrundmodell durchsucht und nachfolgende Liste erarbeitet worden:

- Das Baugrundmodell darf nicht den Eindruck vermitteln, dass es zu 100% exakt ist. Die Abstraktionen durch Vereinfachungen, Interpolationen und Abschätzungen sind klar darzustellen und Konzepte, wie eingrenzende Bandbreiten, zu verwenden. Bis zur Entwicklung von vollständig flächenhaften Bodenaufschlussmethoden bleibt das Baugrundmodell ein Prognosemodell mit variierender Genauigkeit. [7, S. 60]
- Um die Quantifizierung des Baugrundrisikos zu erreichen, sind Wahrscheinlichkeiten, zur Vorhersagegenauigkeit von Abweichungen der Bau-

grundbeschreibung vom tatsächlichen Baugrund, zu implementieren. Da das Baugrundrisiko beim Bauherren liegt, sollte die Erzeugung von möglichst zutreffenden Baugrundmodellen auch in dessen Interesse liegen. [7, S. 60]

- Ein Baugrundmodell hat die Ableitung von Baugrundsichten an jeder Stelle des Baufeldes zu erlauben sowie die Abfrage der Baugrundsichten an beliebiger Stelle im Baufeld in Form von virtuellen Bohrungen. Auch die Weitergabe von Volumen- und Flächenmodellen an CAD Programme ist zu ermöglichen, wie auch eine Überarbeitungs- und Aktualisierungsmöglichkeit des Modells im Projektverlauf mit wachsendem Kenntnisstand. [7, S. 61]
- Außerdem wird gefordert, dass ein Baugrundmodell nicht starr sein darf. Insbesondere Informationen aus der Bauausführung sollten zur fortlaufenden Aktualisierung des Modells genutzt werden. Die Aufgabensphäre zur Datenpflege soll weiterhin beim Geotechniker liegen. [7, S. 68]
- In der DAUB Empfehlung „BIM im Untertagebau“ werden die „Bereitstellung aller geotechnisch relevanter Daten über den kompletten Projektverlauf“, die „Nutzung der Daten als Eingangsgröße für weitere Anwendungsfälle“ sowie die „stetige Aktualisierung des Modells bei Erkenntnisgewinn“ als Anforderungen beschrieben. [19, S. 22]
- Weiters beschreiben Fröch et al. in „Anwendungsmöglichkeiten eines digitalen Baugrundmodells im Tunnelbau“ Anforderungen an die transparente Aufnahme von Daten. So sind bauprozessrelevante Baugrundeigenschaften und -parameter zu integrieren und Erkundungsdaten zu vereinheitlichen und zusammenzuführen. Außerdem ist eine geotechnische Interpretation der Homogenbereiche sowie eine transparente Einsichtnahme für alle Projektbeteiligten zu ermöglichen. [25, S. 887]

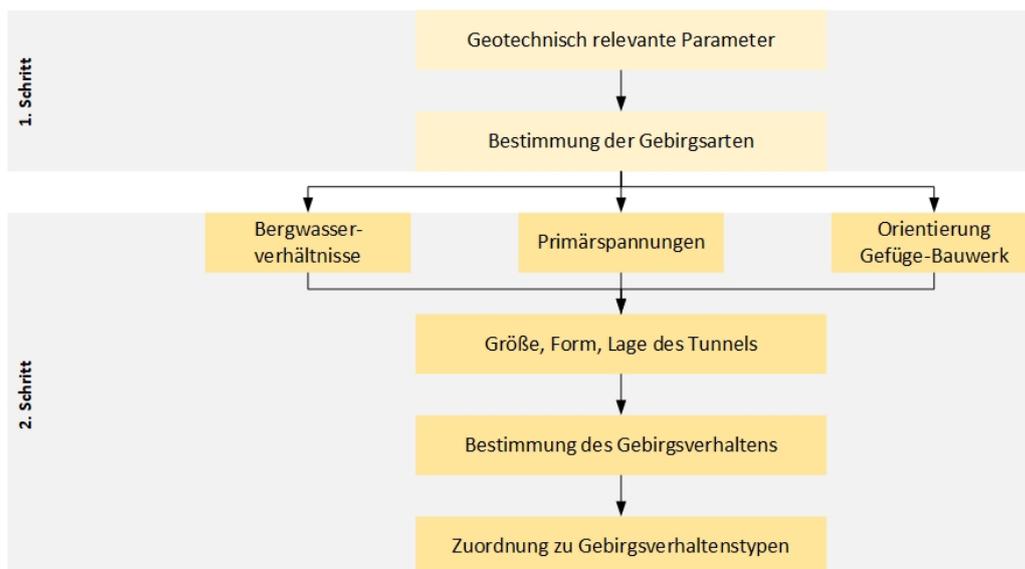


Abbildung 4.1: Relevante Schritte aus dem schematischen Ablauf der geotechnischen Planung [31, S.15]

Um die Umsetzung des Konzepts im nächsten Kapitel vorzustellen, werden nachfolgend nochmals jene maßgeblichen Punkte der „Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb“, wie sie in Kapitel 2.3 beschrieben sind, dargelegt und die daraus abgeleiteten Überlegungen aufgeführt. Abbildung 4.1 zeigt den relevanten Ausschnitt aus dem schematischen Ablauf für die geotechnische Planung, wie er in der Richtlinie ausgeführt ist. [31]

Ausgehend von diesen zwei Schritten im Prozess ist eine vereinfachte Prozessgrafik (Abbildung 4.2) abgeleitet worden. Diese beschreibt jene Arbeitsschritte, die im Baugrundmodell abzubilden sind, um daraus, aus Sicht des Autors, ein digitales parametergestütztes Baugrundmodell werden zu lassen:

1. die Ermittlung der geotechnisch relevanten Parameter,
2. die Bestimmung der Gebirgsarten auf Grundlage der geotechnischen Parameter,
3. das Festlegen von Gebirgsbereichen bzw. Homogenbereichen,
4. die Zuordnung von GVTs zu homogenen Tunnelausbruchsbereichen

beschreiben jene vier Aufgaben, deren Ergebnisse in dem Baugrundmodell abzubilden sind, um dem Ziel der Digitalisierung der geotechnischen Planung einen Schritt näher zu kommen.



Abbildung 4.2: Vereinfacht dargestellter Prozess als Grundlage für die Konzeptentwicklung

Für das zu entwickelnde Baugrundmodell bedeutet dies, dass drei Gruppen an Informationen abzubilden sind. Als Erstes sind die geotechnischen Parameter an die Körper zur Darstellung der lithologischen Schichten anzuhängen. Als Zweites sind allen Körpern, welche homogene Tunnelausbruchskörper repräsentieren, die ermittelten Gebirgsarten inklusive der entsprechenden Gebirgskennwerte anzufügen. Und als dritte Informationsgruppe sind die GVTs den entsprechenden Homogenbereichen zu entnehmen. Außerdem ist es auf Basis der Bestimmung der Gebirgs- und Homogenbereiche zu ermöglichen, diese Unterteilungen in das Modell zu übernehmen.

4.2 Konzeptionelle Umsetzung

Basierend auf all diesen grundlegenden Überlegungen, Anforderungen und Prozessschritten, ist ein Konzept zur Umsetzung des digitalen, parametergestützten Baugrundmodells in der geotechnischen Planung von Tunneln erarbeitet worden. Eine der zentralsten und grundlegendsten Überlegungen ist es, die kleinste zu modellierende Einheit in dem System zu definieren, um eine sinnvolle und vor allem korrekte Zuordnung der im vorigen Kapitel beschriebenen benötigten Eigenschaften in Form von PSETs, zu ermöglichen. Mit diesem bottom-up

approach geht die Idee einher, dass das Vorhandensein dieser kleinsten Einheit jede darauf aufbauende, größere Einheit abbilden kann. Das Ergebnis dieses Entwicklungsprozesses sind die sogenannten Tunnelpixel. Abbildung 4.3 zeigt die Herangehensweise der Tunnelpixel und wird in den folgenden Absätzen genauer erläutert.

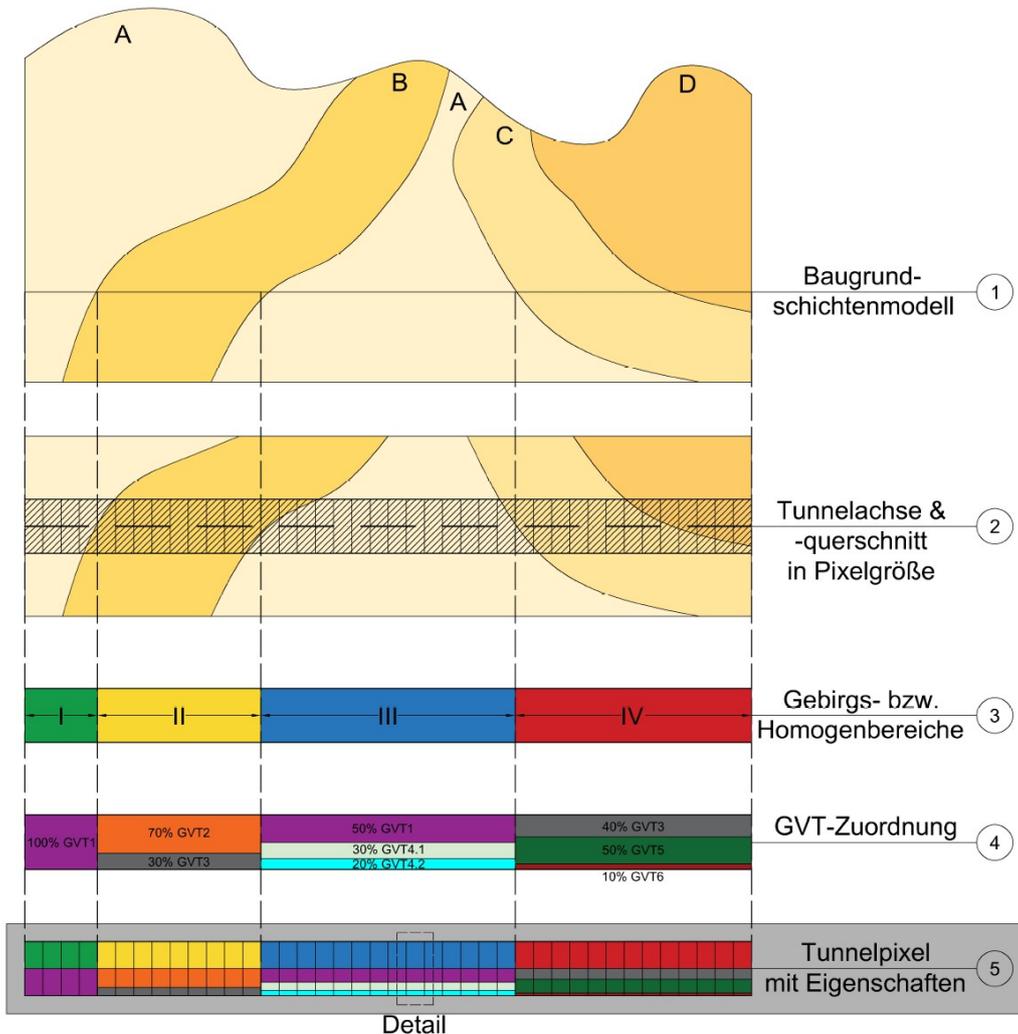


Abbildung 4.3: Konzept zur Umsetzung der Tunnelpixel

1. Der Ausgangspunkt ist ähnlich wie im Anwendungsbeispiel ein Baugrundschichtenmodell. Dieses besteht aus einzelnen Volumenkörpern für die prognostizierten Bodenschichten und stellt einen ungefähren Verlauf dar, welcher auf dem Baugrundgutachten basiert. Die Grundlage dafür stellen wiederum diverse Bodenaufschlüsse dar, die immer punktuell durchgeführt werden, woraus sich Unschärfen des Modells ergeben. Die Interpretation der Erkundungsdaten und Vervollständigung zwischen den untersuchten Bereichen erfolgt durch einen Geotechniker mit bestem Wissen und Erfahrung. Den Volumenkörpern für die lithologischen Schichten werden die

geotechnischen Parameter zugeordnet, was einer Umsetzung des ersten Schrittes der Prozessgrafik aus Abbildung 4.2 entspricht.

2. Mit Schritt zwei werden „leere“ Tunnelpixel erzeugt. Dies geschieht auf Grundlage der Tunnelachse und -querschnitte. Entlang der Achse werden die Tunnelpixel in Form von Volumenkörpern erzeugt, die in Achsrichtung eine zu definierende Breite haben und normal dazu dem Querschnitt des Tunnels entsprechen. Entsprechend dem jeweiligen Anwendungsfall ist dabei eine Breite von wenigen Zentimetern, über gemittelte Abschlags- oder Hublängen, bis hin zu mehreren Metern vorstellbar. Die Tunnelpixel stellen im Sinne dieser Arbeit eine Rasterung der geologischen Gegebenheiten sowie des linearen Ausbruchs dar.
3. Im dritten Schritt sind die Gebirgs- bzw. Homogenbereiche dargestellt. Diese ergeben sich aus der Zusammenfassung von Tunnelabschnitten, die homogene geologische Eigenschaften aufweisen. Die Einteilung basiert auf den Ausarbeitungen des Geotechnikers. Für jeden dieser Bereiche gelten dieselben Eigenschaften, was in der Abbildung 4.3 durch eine eigene Farbe dargestellt wird.
4. Es folgt darauf die Zuordnung der GVT. Jedem Gebirgsbereich wird eine prozentuale Verteilung der zu erwartenden GVTs hinterlegt. In der Darstellung wird die prozentuale Verteilung durch die Größe der farblich gekennzeichneten Bereiche repräsentiert. Dabei steht jede Farbe für einen GVT und ist mit konkreten Eigenschaften verknüpft.
5. Mit dem abschließenden fünften Schritt werden alle Informationen aus den vorherigen Schritten vereinigt. Die „leeren“ Tunnelpixel werden auf

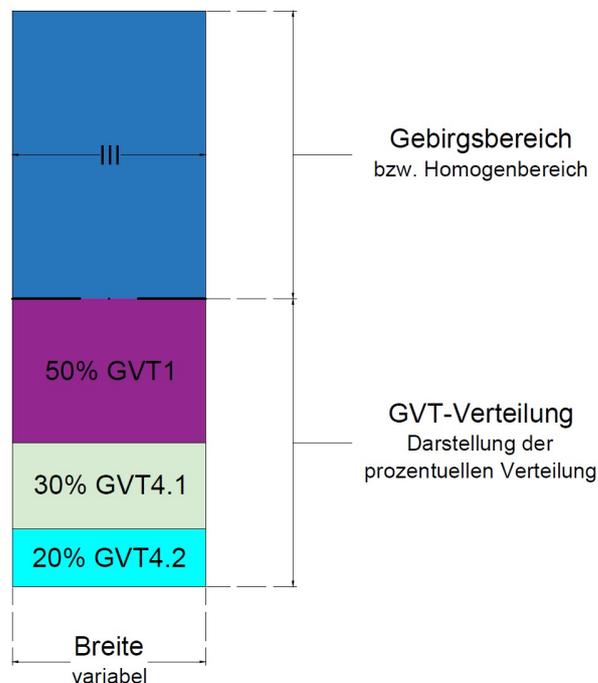


Abbildung 4.4: Detaildarstellung eines Tunnelpixels

Grundlage der zuvor definierten Bereiche mit den Informationen belegt. Ein Tunnelpixel übernimmt, wie die Detailansicht in Abbildung 4.4 verdeutlicht, alle zuvor für diesen Bereich definierten Farben. Für den Bereich des Pixels, der die GVT-Verteilung darstellt, spiegeln die Größen der Bereiche auch die prozentuale Verteilung wider. Da jede Farbe weiters ein PSET repräsentiert, sind diese Eigenschaften auch auf dem Pixel hinterlegt.

Abbildung 4.5 zeigt außerdem die Flexibilität und Variabilität dieses Konzeptes auf. Durch die Rasterung der Tunnelpixel können diese beispielsweise auch den Sonderfall von mehreren Tunnelabschnitten im selben Gebirgsbereich, denen jeweils eine eigene GVT-Verteilung hinterlegt ist, berücksichtigen. Unabhängig von den Grenzen für die Gebirgsbereiche oder Tunnelabschnitte, ist eine eindeutige Zuordnung der PSETs und Eigenschaften ohne weitere Modellierschritte möglich. Damit werden sich überlappende Bauteile, die im Sinne von BIM eine Kollision darstellen, vermieden und trotzdem bleibt eine bereichsübergreifende Zuordnung der PSETs möglich. Letztlich ist dies einer der Hauptgründe für die Entwicklung dieses Konzeptes.

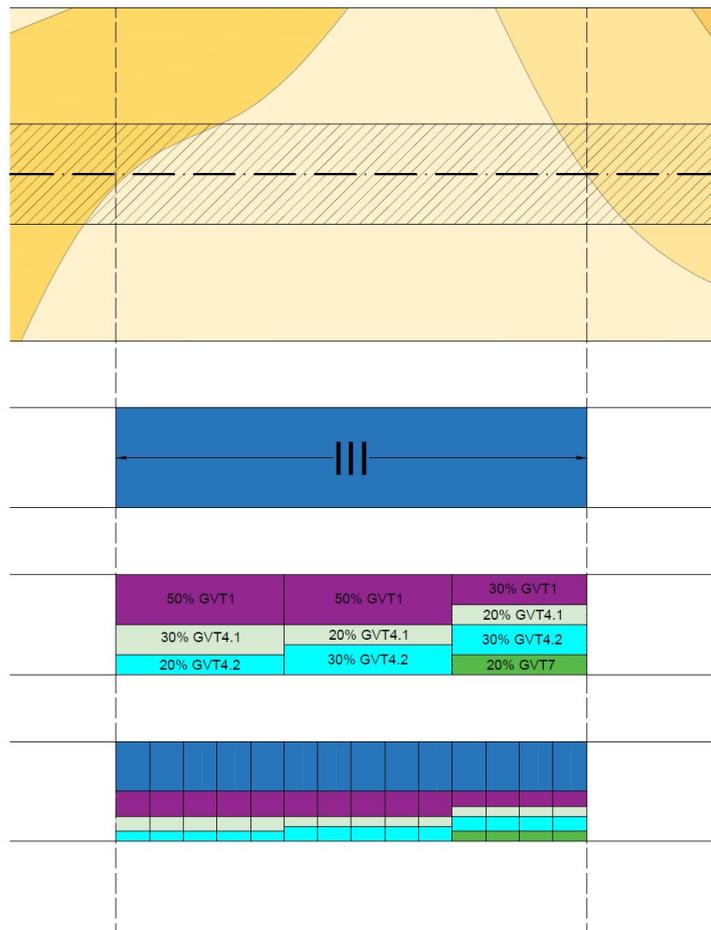


Abbildung 4.5: Sonderfall mehrerer Tunnelabschnitte im selben Gebirgsbereich

Exemplarisch werden nachfolgend zwei mögliche Anwendungsfälle für einen Workflow, mit dem Konzept der Tunnelpixel, aufgezeigt. Als Erstes wird, in Anlehnung an das Anwendungsbeispiel aus Kapitel 3, die Möglichkeit der Integration in den Planungsprozess beschrieben. Das zweite Szenario behandelt eine Anwendung in der Ausführungsphase. Beide stellen eine idealisierte Zielvorstellung dar und können als Arbeitsgrundlage für eine praktische Umsetzung dienen.

Workflow Planung

Vorausgesetzt wird für diesen Workflow das Vorhandensein eines Baugrundsichtenmodells, sowie der Tunnelachse und -querschnitte. Basierend auf den geologischen Erkundungen wird das Baugrundsichtenmodell im ersten Schritt vom Geologen mit den Projektparametern hinterlegt. Mithilfe von standardisierten Eigenschaften erfolgt eine Zuordnung aller Gebirgs- und Gesteinskennwerte zu den einzelnen lithologischen Schichten. Im nächsten Schritt werden auf Basis der Tunnelachse, den Tunnelquerschnitten und einer zuvor definierten Inkrementlänge, automatisch die Tunnelpixel als separate, eigenständige Volumenkörper erzeugt. Die zuvor auf den lithologischen Schichten hinterlegten Eigenschaften werden automatisch auf die Tunnelpixel vererbt. Aber auch geometrische Informationen, wie Tunnelform und -größe, Lage des Hohlraumes, die Überlagerung und davon abgeleitet die Primärspannungen, sind ab diesem Zeitpunkt jedem Pixel automatisch hinterlegt.

Als nächstes gilt es, die Gebirgsarten zu bestimmen und im Modell abzubilden. Dieser Schritt geht mit einer Einteilung des geplanten Hohlraumes in Homogenbereiche, in denen die Gebirgsarten gleichartig auftreten, einher. Vorstellbar ist, dass ein automatisierter Vorschlag für diese Einteilung, in Form einer Gruppierung von einzelnen Tunnelpixeln, gemacht wird. Dazu sind alle Eingangsparameter für diese Einteilung bereits im Modell zu hinterlegen. Der Geotechniker bestätigt diese Vorschläge oder passt sie gegebenenfalls an. Jedem Tunnelpixel wird damit die Information hinterlegt, welchem Gebirgsbereich es zugeordnet ist. Auf Grundlage dieser Information kann der Geotechniker die Verteilung der Gebirgsarten, sowie darauf aufbauend geomechanische Kennwerte, jedem Pixel zuordnen. An diesem Punkt ist es vorstellbar, eine erste automatisierte Auswertung der Massen, inklusive aller bisher verfügbarer Parameter, durchführen zu lassen.

Die Zuordnung der GVT-Verteilung erfolgt in Grundzügen ähnlich wie die Zuordnung der Gebirgsarten. Es sind in ähnlicher Art und Weise Tunnelabschnitte auf Grundlage von verschiedenen Parametern zu definieren. In diesem Schritt ist die Erfahrung und das Wissen des Geotechnikers noch mehr gefragt, als bei der Gebirgsbereichsdefinition. Jedes Tunnelpixel weiß, welchem Tunnelabschnitt es zugeordnet ist. Diese Information führt in weiterer Folge zur Zuordnung der entsprechenden GVT-Verteilung mit allen dazugehörigen Parametern. Damit ist bereits eine abschließende automatische Auswertung der gesamten GVT-Verteilung möglich.

Erleichterungen entstehen durch diesen Prozess vor allem bei der automatischen Auswertung, automatisierten Variantenvergleichen durch wiederkehrende Ar-

beitsschritte und für darauf aufbauende Prozessschritte.

Workflow Ausführung

Für die Integration des Konzeptes der Tunnelpixel in die Ausführungsphase gibt es einige Unterschiede zur Planungsphase. Vorausgesetzt wird in diesem Fall, dass ein Baugrundmodell, sowie die Tunnelachse und -querschnitte, vorhanden sind. Der Level of Information Need wird in diesem Fall höher liegen. Für die Ausführung ist es aus Sicht des Autors sinnvoller, ein fortschreitende Erzeugung variabler Tunnelpixel anzustreben. Es ist beispielsweise vorstellbar, täglich die tatsächlichen Abschlagslängen oder Hublängen als Pixel erzeugen zu lassen. Darauf liegen dann bereits jene Informationen, die automatisch aus dem Modell erzeugt werden können. Das sind geometrische Information, wie auch vom umgebenden Baugrundmodell vererbte Informationen. Diese Pixel weisen dieselbe Parameterstruktur auf, wie es die fertig bearbeiteten Pixel aus der Planung haben. Damit ist es möglich, während dem Vortrieb automatisch und händisch gemessene oder aufgezeichnete Daten zu hinterlegen.

4.3 Vorteile

Um den Nutzen dieses neu entwickelten Konzepts hervorzuheben, sind die Vorteile gegenüber der bisherigen Herangehensweise zu beschreiben. Vom Autor wurden bereits in der Einleitung von Kapitel 4 einzelne Vorteile, auf Grundlage von vereinzelt Literaturquellen, beschrieben. Nun folgt eine genauere Beschreibung der Vorteile eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells gegenüber der bisherigen konventionellen Vorgehensweise. So spielt der Baugrund beispielsweise bei der Auswahl der Tunnelvortriebsmethode in verschiedenen Phasen des Auswahlprozesses eine wesentliche Rolle. In dem von Flora et al. in „Auswahl und Spezifizierung der Tunnelvortriebsmaschine als maßgebliche Einflussgröße für den Projekterfolg“ entwickelten Entscheidungsmodell, ist in den ersten zwei Phasen eine direkte Abhängigkeit zum Baugrundmodell gegeben. Phase 1 dient unter anderem der Festlegung der geotechnischen Planung, die aufbauend auf dem Konzept der Tunnelpixel in einem digitalen Baugrundmodell erfolgen kann. Ist die geotechnische und gesamte Machbarkeit nach Phase 1 erfüllt, wird in Phase 2 die Methodeneignung betrachtet, welche zu einem Teil durch die geologische und geotechnische Machbarkeit definiert wird. Darin sind verschiedene Kriterien enthalten, die in direktem Zusammenhang mit dem Baugrund stehen. [23]

Beispiele für solche Kriterien mit einem starken Bezug zum Baugrund sind: [23, S. 497ff]

- *die Beschaffenheit des Baugrundes*, welche Eigenschaften wie die Gebirgsklassifizierung (Gestein, Trennflächen und Bergwasser) und das Gebirgsverhalten (Festigkeit, Stabilität Ortsbrust, Abrasivität) enthält. Weiters dient es dem Berücksichtigen von zusätzlichen Problemen und Phänomenen, wie quellendes Gebirge, Bergschläge, Firstniederbrüche und vielen mehr.

- Prognosen von *Lage und Ausmaß der Störzonen*, welche die Vorkehrungen für die Tunnelvortriebsmaschine zum Auffahren dieser Bereiche wesentlich beeinflussen.
- *häufig wechselnde Baugrundverhältnisse*, welche einen Einfluss darauf haben, wie schnell die Tunnelvortriebsmethode an die verschiedenen Bedingungen angepasst werden können muss.

Bei sinngemäßer Anpassung des vorgestellten Konzepts, ist das Baugrundmodell aus Sicht des Autors in der Lage, alle Daten für eine Bewertung dieser Kriterien zu liefern.

In der „Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb“ finden sich ebenfalls einige beschriebene Vorgänge, auf die eine Einführung des digitalen parametergestützten Baugrundmodells vorteilhafte Auswirkungen hat. Damit wird aufgezeigt, dass mit den derzeitigen normativen Texten bereits ein Mehrwert erreicht werden kann. [31]

- So steht beispielsweise im Vorwort der Richtlinie, dass eine Änderung des Vortriebskonzeptes und des Ausbaus, bei einem Vortrieb mittels TVM, beinahe unmöglich ist. Daher ist es wichtig, mit Zusatz- und Sondermaßnahmen für die TVM auf außergewöhnliche Situationen vorbereitet zu sein. Mit dem digitalen Baugrundmodell als zentrales Datenmodell für die geotechnische Planung, sind die Daten für die Entscheidungsfindung von Zusatz- und Sondermaßnahmen gesammelt vorhanden.
- Dieselbe zentrale Datengrundlage kann für die Erstellung der geotechnischen Risikoanalyse verwendet werden, welche ebenfalls in der Richtlinie vorgeschrieben wird. Mit dem digitalen Baugrundmodell wird die Erstellung dieser Analyse wesentlich erleichtert.
- Das Systemverhalten ist direkt abhängig von den Folgen des Vortriebs und der Einwirkungen der TVM. Wird es beispielsweise ermöglicht, die von der TVM automatisch generierten Daten in das digitale Baugrundmodell einfließen zu lassen, kann auch die Ermittlung des Systemverhaltens erleichtert und optimiert werden.

Vom Autor sind Vorteile für die Anwendung eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells erkannt worden:

- Mit der Definition von neuen Parameterstrukturen ergibt sich die Chance, das Thema von streuungsbehafteten Kennwerten zu berücksichtigen. Sowohl Bereichsdefinitionen, Minimal-/Maximalwerte oder Verteilungswahrscheinlichkeiten beugen mit dieser Herangehensweise dem Trugschluss von einem exakten Modell vor.
- Ein digitaler Zwilling für den Baugrund bringt enorme Vorteile in der Erkennung von Zusammenhängen und Abhängigkeiten innerhalb des Baugrundes. Mit den entsprechenden Analysewerkzeugen wird aus dem Modell ein umfangreiches Werkzeug für Öffentlichkeitsarbeit, Visualisierungen, Simulationen, und vieles mehr.
- Bei einer konsequenten Aktualisierung und Nutzung als zentrales Datenmodell durch alle Projektphasen und im Sinne eines SSOT-Ansatzes, ergibt

sich vor allem für die Betriebsphase ein Mehrwert. Die Vorteile reichen dabei vom reinen Betrieb, über die Instandhaltung und Erneuerung, bis hin zum Notfallmanagement. [24]

4.4 Anwendungsfälle

Mit diesem Kapitel erfolgt abschließend eine Auflistung möglicher BIM-Anwendungsfälle für das digitale parametergestützte Baugrundmodell in Form von dem Konzept der Tunnelpixel. In Teil 6 der Handreichungen und Leitfäden der deutschen BIM4INFRA2020 sind zwanzig BIM-Anwendungsfälle für den Infrastrukturbau als erster Anhaltspunkt definiert. Die meisten finden auch für das digitale Baugrundmodell Anwendung: [16]

- Bestandserfassung
- Planungsvariantenuntersuchung
- Visualisierungen
- Bemessung und Nachweisführung
- Koordination der Fachgewerke
- Fortschrittskontrolle der Planung
- Erstellung von Entwurfs- und Genehmigungsplänen
- Arbeits- und Gesundheitsschutz: Planung und Prüfung
- Planungsfreigabe
- Kostenschätzung und Kostenberechnung
- Leistungsverzeichnis, Ausschreibung, Vergabe
- Terminplanung der Ausführung
- Logistikplanung
- Erstellung von Ausführungsplänen
- Baufortschrittskontrolle
- Änderungsmanagement bei Planungsänderungen
- Abrechnung von Bauleistungen
- Mängelmanagement
- Bauwerksdokumentation
- Nutzung für Betrieb und Erhaltung.

Beispielhaft kann mit dem Anwendungsfall der Koordination der Fachgewerke dem Baugrundmodell eine zentrale Rolle zukommen. Mit der Verwendung von integralen Planungsplattformen als gemeinsame Datenumgebung, wie z.B. BIM 360[®] von Autodesk, übernimmt das Baugrundmodell die Rolle eines Referenzmodells. Die einzelnen Fachplaner können ihre Planung mit dem Baugrundmodell als Grundlage durchführen. Die relative Unveränderbarkeit des Baugrundmodells, hinsichtlich Oberfläche, Lage und –je nach Erkundungsgrad– lithologische Schichtgrenzen, ist eine ideale Voraussetzung für die Verbesserung der Planungsqualität und der Arbeitsvorbereitung. [16]

Abhängig von der Organisation, dem Projekt und der Projektphase sind die Anwendungsfälle jedoch sehr unterschiedlich ausgeprägt. Auch stellt diese Liste keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie dient primär als Orientierungshilfe für weitere zukünftige Entwicklungen. [16]

Von den BIM-Anwendungsfällen resultieren in weiterer Folge die Anforderungen an das Modell, damit lassen sich die benötigten Werkzeuge definieren. In „Digitale Baugrundmodell: BIM in der Geotechnik“ steht dazu geschrieben,

„[...] dass im Vorfeld die Anwendungsfälle, dann die Prozesse und zuletzt die Werkzeuge definiert werden müssen.“ [32]

Dieses Zitat beschreibt, wie die BIM-Anwendungsfälle in den Kontext eines Workflows zu bringen sind.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem letzten Kapitel wird zuerst die Masterarbeit kurz zusammengefasst und abschließend ein Ausblick in Form von weiterführenden Fragestellungen gegeben.

Zusammenfassung

In dieser Masterarbeit wurde in einem ersten Schritt analysiert, wie sich das digitale parametergestützte Baugrundmodell in einem realen Anwendungsbeispiel zum Zeitpunkt der Verfassung umsetzen lässt. Anhand des BIM-Pilotprojektes Neubaustrecke Köstendorf - Salzburg (KÖSA), wurde eine praxistaugliche Umsetzung von BIM in der geotechnischen Planung aufgezeigt. Es wurde ein proof of concept erstellt, wie die projektrelevanten Parameter bis Schritt 2 des schematischen Ablaufs (Abbildung 2.5) der „Richtlinie für die Geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb“ in einem digitalen Baugrundmodell abgebildet werden können. Die Bearbeitung hat gezeigt, dass die vorhandenen Strukturen aus dem Hochbau für eine grundlegende Baugrund-BIM-Anwendung genutzt werden können. Die Integration von Parametern, welche auf einer standardisierten Datenbank wie dem MMS liegen, in ein Baugrundmodell wurde ebenso nachgewiesen, wie das einfache und layergesteuerte Einfügen von konkreten Werten aus einer Excel-Tabelle.

Darauf aufbauend wurde im zweiten Schritt ein allgemeines Konzept entwickelt, wie ein holistisch gedachter Ansatz für die Umsetzung eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells aussehen könnte. Das Ergebnis intensiver Diskussionen ist das sogenannte Tunnelpixel-Konzept. Dieses gründet auf der Überlegung, welche kleinste zu modellierende Einheit es benötigt, um sämtliche projektrelevanten Parameter für die geotechnische Planung von Untertagebauten präzise abbilden zu können. Das entwickelte Konzept zielt auf eine zukünftige, größtmögliche Automatisierung und Flexibilität ab. Dabei bleibt es jedoch möglich, bewährte und erprobte Arbeitsweisen zu integrieren. Mit der Variabilität der einzelnen Pixel und der freien Gestaltungsmöglichkeit der zu verwendenden Parameterstrukturen, wurde mit diesem Konzept, aus Sicht des Autors, eine Grundlage für weitere Entwicklungen und Forschungen erarbeitet.

Mit diesem Konzept lassen sich neue Erkenntnisse zu dem digitalen Baugrundmodell als Teil des Infrastruktur-Informationsmodell (iiM) gewinnen. Viele der Anforderungen an ein digitales Baugrundmodell können mit dem Konzept erfüllt werden. Das sind unter anderem die gewünschte Flexibilität des Systems,

die Integration von bauprozessrelevanten Baugrundeigenschaften oder die Möglichkeit zur geotechnischen Interpretation der Homogenbereiche. Die Ergebnisse dieser Forschung knüpfen somit an die Untersuchungen von Flora et al. „Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle“ und Fröch et al. in „Anwendungsmöglichkeiten eines digitalen Baugrundmodells im Tunnelbau“ an.

Ausblick

Um das Konzept der Tunnelpixel, aber auch das digitale parametergestützte Baugrundmodell im Allgemeinen, weiterzuentwickeln, ist es aus Sicht des Autors nötig, eine Evaluierung des vorgestellten Konzeptes in einer Expertenrunde durchzuführen. Weiters ist eine Validierung anhand zusätzlicher Projekte aus unterschiedlichen Projektphasen notwendig. Zukünftige Forschung könnte aus Sicht des Autors folgende Fragestellungen, die eine weiterführende Umsetzung des Infrastruktur-Informationsmodell (iiM) und eine Integration des Baugrundmodells in die Praxis erlauben, behandeln:

- Wie kann die bestmögliche Interaktion zwischen den Modellen für das Bauwerk, den Baugrund und die Baustelle erreicht werden?
- Welche Parameterstrukturen werden für ein digitales parametergestütztes Baugrundmodell benötigt, um die geotechnische Planung von Tunnelbauwerken in allen Projektphasen und Anwendungsfällen abbilden zu können und wie viele unterschiedliche Einzelmodelle des Baugrundes wird es, über den gesamten Lebenszyklus verteilt, für ein Tunnelbauwerk geben?
- Bewährt sich das digitale parametergestützte Baugrundmodell in Form des Konzeptes der Tunnelpixel in den verschiedenen Projektphasen und welche Erweiterungen sind nötig um den 5D-BIM-Ansatz zu erreichen, in dem sowohl eine Zeit- als auch eine Kostenermittlung möglich werden?
- Wird mit der Einführung eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells die vielzitierte Kostenwahrheit erreicht und folgt damit ein Branchenumschwung hin zu gerechteren Preisen?

Literaturverzeichnis

- [1] Austrian Standards Institute. Building Information Modelling – Level of Information Need. Part 1: Concepts and principles. 2015.
- [2] Austrian Standards Institute. Digitale Bauwerksdokumentation - Teil 1: CAD-Datenstruktur und Building Information Modeling (BIM) - Level 2. 2015.
- [3] Austrian Standards Institute. Digitale Bauwerksdokumentation - Teil 2: Building Information Modeling (BIM) - Level 3-iBIM. 2015.
- [4] ÖBB-Infrastruktur AG. Neubaustrecke Köstendorf-Salzburg - Auftakt zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). *Amtliche Mitteilung*, September 2018.
- [5] BIM.Hamburg. BIM-Leitfaden für die FHH. 2019.
- [6] BIMpedia. BIM Standard Österreich. <https://www.bimpedia.eu/-/1011-bim-standard-oesterreich>, Zugriff: 04.04.2020.
- [7] A. Borrmann and W. A. Günthner. *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen*. Springer-Verlag, 2011.
- [8] A. Borrmann, M. König, C. Koch, and J. Beetz. *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer Vieweg, 2015.
- [9] buildingSmart International. Industry Foundation Classes. Version 4.3 Candidate. https://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_3/RC1/HTML/, Zugriff: 01.06.2020.
- [10] buildingSmart International. Industry Foundation Classes (IFC) - An Introduction. <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/>, Zugriff: 02.03.2020.
- [11] buildingSmart International Ltd. IfcPropertyTableValue. https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/schema/ifcpropertyresource/lexical/ifcpropertytablevalue.htm, Zugriff: 06.10.2020.
- [12] buildingSmart International Ltd. IfcPropertySet. https://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_2/FINAL/HTML/schema/ifckernel/lexical/ifcpropertyset.htm, Zugriff: 20.10.2020.
- [13] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Grundlagen und BIM-Gesamtprozess. *Handreichungen und Leitfäden - Teil 1*, April 2019.
- [14] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Leitfaden und Muster für Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA). *Handreichungen und Leitfäden - Teil 2*, April 2019.
- [15] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Leitfaden und Muster für den BIM-Abwicklungsplan (BAP). *Handreichungen und Leitfäden - Teil 3*, April 2019.

- [16] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Steckbriefe der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle. *Handreichungen und Leitfäden - Teil 6*, April 2019.
- [17] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Handreichung BIM-Fachmodelle und Ausarbeitungsgrad. *Handreichungen und Leitfäden - Teil 7*, April 2019.
- [18] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Datenaustausch mit Industry Foundation Classes (IFC). *Handreichungen und Leitfäden - Teil 9*, April 2019.
- [19] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauern e.V. (DAUB). Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten - BIM im Untertagebau. Mai 2019.
- [20] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauern e.V. (DAUB). Modellanforderungen - Teil 1 - Objektdefinition, Codierung und Merkmale. Mai 2020.
- [21] Die Presse. Digitalisierung ist die Zukunft, ohne Wenn und Aber. <https://www.diepresse.com/5590776/christoph-m-achhammer-digitalisierung-ist-die-zukunft-ohne-wenn-und-aber>, Zugriff: 22.10.2020.
- [22] European Committee for Standardization. CEN/TC 442 - Building Information Modelling (BIM). https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:7:0::: FSP_ORG_ID:1991542&cs=16AAC0F2C377A541DCA571910561FC17F, Zugriff: 08.09.20.
- [23] M. Flora, M. Jäger, and P. Teuscher. Auswahl und Spezialisierung der Tunnelvortriebsmaschine als maßgebliche Einflussgröße für den Projekterfolg. *Geotechnics and Tunnelling*, 11(5):492–504, 2018.
- [24] M. Flora, G. Fröch, and W. Gächter. Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle. *Bautechnik*, 97(Heft 01):1–9, 2020.
- [25] G. Fröch, M. Flora, and W. Gächter. Anwendungsmöglichkeiten eines digitalen Baugrundmodells im Tunnelbau. *Bautechnik*, 96(Heft 12):885–894, 2019.
- [26] G. Fröch, W. Gächter, A. Tautschnig, and G. Specht. Merkmalsserver im Open-BIM-Prozess. *Bautechnik*, 96(Heft 4):338–347, 2019.
- [27] G. Fröch, W. Gächter, A. Tautschnig, and G. Specht. Merkmalsserver im Open-BIM-Prozess. *Bautechnik*, 2019.
- [28] G. Goger and W. Reismann. Roadmap Digitalisierung. von Planen, Bauen und Betreiben. Technical report, Planen.Bauen.Betreiben 4.0 - Arbeit.Wirtschaft.Export, 2018.
- [29] F. Harpf. BIM basierte Massenermittlung als Grundlage für die Kalkulation im Infrastrukturbau. Master's thesis, Universität Innsbruck, 2019.
- [30] T. Liebich. IFC-Bridge Endvorstellung - weitere Schritte International; Vortragsunterlage im Rahmen des IFC-Projektabschluss. *Berlin*, 2019.
- [31] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik. Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb. 2013.
- [32] I. Prinz. Digitale Baugrundmodelle: BIM in der Geotechnik. *EI - Der Eisenbahningenieur*, (Heft 05):22–27, 2019.
- [33] P. Serra. Dynamo for Civil 3d - Property Sets samples. <https://knowledge.autodesk.com/support/civil-3d/getting-started/caas/screencast/Main/Details/38cdeaa3-d2b3-459e-8a0b-70f627884ba2.html>, Zugriff: 05.03.2020.

Anhang A

Vollständige Tabelle der geotechnisch relevanten Parameter für die Gebirgsarten des Quartärs:

Gebirgsart	Hauptgesteinsart	Schlüsselparameter		
		Korngröße	Konsistenz	Lagerungsdichte
GA Q1	Deckschicht-sedimente	gemischtkörnig; toniges Schluff-Sand-Kies-Stein Gemisch, z.T. blockführend	feinkorndominierte Matrix: weich bis steif	grobkorndominierte Matrix: mitteldicht gelagert
GA Q2	Moränen-sedimente	gemischtkörnig; toniges Schluff-Sand-Kies-Stein Gemisch, (Grob-) blockführend	feinkorndominierte Matrix: sehr steif bis halbfest bzw. halbfest bis fest	grobkorndominierte Matrix: sehr dicht gelagert
GA Q3	Moränensedimente	gemischtkörnig; toniges Schluff-Sand-Kies-Stein Gemisch, (Grob-) blockführend	feinkorndominierte Matrix: weich bis steif bzw. sehr steif bis halbfest	grobkorndominierte Matrix: mitteldicht bis dicht gelagert
GA Q4	Fluvioglaziale Sedimente	gemischtkörnig; Sand-Kies-Stein Gemisch mit geringerem Schluff- und Tonanteil	nicht zutreffend	dicht bis sehr dicht gelagert
GA Q5	Fluvioglaziale Sedimente	gemischtkörnig; Sand-Kies-Stein Gemisch mit geringerem Schluff- und Tonanteil	nicht zutreffend	mitteldicht gelagert
GA Q6	Fluviatile Sedimente	gemischtkörnig; Sand-Kies Gemisch mit Steinen und geringem Schluffanteil	nicht zutreffend	mitteldicht bis dicht gelagert
GA Q7	Lakustrine Sedimente / Seeton	feinkorndominiert; Schluff-Sand Gemisch mit variablem Tongehalt	breiig bis steif	dicht bis sehr dicht gelagert
GA Q8	Umgelagerte Flysch-gesteine	gemischtkörnig; toniges Schluff-Sand-Kies-Stein Gemisch mit (Grob)Blöcken	nicht zutreffend	mitteldicht bis dicht gelagert

Gebirgsart	Materialkennwerte					Gebirgsdurchlässigkeit k [m/s]
	Dichte ρ [g/cm ³]	Kohäsion c' [kN/m ²]	Reibungswinkel φ [°]	Elastizitätsmodul E [MPa]	Gebirgsdurchlässigkeit k [-]	
GA Q1	1,9 - 2,1	5 bis 15	22 bis 30	20 - 40	mitteldurchlässig, örtlich gering durchlässig	10-6 bis 10-5
GA Q2	2,2 bis 2,4	15 bis 30	35 bis 40	140 bis 200	gering durchlässig, örtlich mitteldurchlässig	10-7
GA Q3	2,1 bis 2,4	8 bis 15	30 bis 35	80 bis 120	mitteldurchlässig	10-6 bis 10-7
GA Q4	2,1 bis 2,3	5 bis 10	35 bis 38	100 bis 150	mitteldurchlässig	10-5
GA Q5	2,0 bis 2,3	0 bis 5	30 bis 35	70 bis 100	mitteldurchlässig bis stark durchlässig	10-5 bis 10-4
GA Q6	2,0 bis 2,3	0 bis 5	32 bis 37	70 bis 120	mitteldurchlässig bis stark durchlässig	10-5 bis 10-4
GA Q7	1,9 bis 2,2	5 bis 10	18 bis 25	10 bis 30	gering durchlässig, örtlich sehr gering durchlässig	10-8 bis 10-7
GA Q8	2,0 bis 2,3	0 bis 5	30 bis 37	70 bis 120	mitteldurchlässig	10-6 bis 10-5

Gebirgsart	Beschreibung
GA Q1	Tonige Kies-Schluff Gemische mit variablen Anteilen an Steinen und Blöcken, untergeordnet grob- bzw. feinkorn dominierte Horizonte. Z.T. organische Anteile. Reduzierung der Festigkeitsparameter durch Wasserzutritte. Grobkornkomponenten mit hohen Gesteinsfestigkeiten, Blöcke mit Größen bis in den dm3-Bereich.
GA Q2	Tonige Kies-Schluff Gemische mit variablen Anteilen an Steinen und Blöcken und charakteristisch weitgestufter Korngrößenverteilung, chaotisch gelagert, untergeordnet kies- bzw. sand dominierte Horizonte. Aufgrund von Eisauflast z.T. (stark) überkonsolidiert, einaxiale Druckfestigkeiten bis ca. 2 MPa möglich. Reduzierung der Festigkeitsparameter durch Wasserzutritte. Grobkornkomponenten mit hohen Gesteinsfestigkeiten, Blöcke mit Größen bis in den m3-Bereich.
GA Q3	Tonige Kies-Schluff Gemische mit variablen Anteilen an Steinen und Blöcken und charakteristisch weitgestufter Korngrößenverteilung, chaotisch gelagert, untergeordnet kies- bzw. sand dominierte Horizonte. Oberflächennahe mit reduzierter Lagerungsdichte, Beeinflussung durch Verwitterung und z.T. durch Umlagerungsprozesse. Reduzierung der Festigkeitsparameter durch Wasserzutritte. Grobkornkomponenten mit hohen Gesteinsfestigkeiten, Grobblecke mit Größen bis in den m3-Bereich.
GA Q4	Kies-Sand Gemische mit geringeren Schluff- und Tongehalten, variablen Anteilen an Steinen und untergeordnet Blöcken. Ungeschichtete Lagerung. In Abhängigkeit der Überlagerungsmächtigkeit auch dichte bis sehr dichte Lagerung möglich. Reduzierung der Festigkeitsparameter durch Wasserzutritte. Grobkornkomponenten mit hohen Gesteinsfestigkeiten, Blöcke mit Größen bis in den dm3-Bereich.
GA Q5	Kies-Sand Gemische mit geringeren Schluff- und Tongehalten, variablen Anteilen an Steinen und untergeordnet Blöcken. Ungeschichtete Lagerung. Oberflächennahe mit reduzierter Lagerungsdichte, Beeinflussung durch Verwitterung und z.T. durch Umlagerungsprozesse. Reduzierung der Festigkeitsparameter durch Wasserzutritte. Grobkornkomponenten mit hohen Gesteinsfestigkeiten, Blöcke mit Größen bis in den dm3-Bereich.
GA Q6	Kies-Sand Gemische mit geringeren Schluffgehalten, variablen Anteilen an Steinen und untergeordnet Blöcken. Ungeschichtete Lagerung. Oberflächennahe mit reduzierter Lagerungsdichte, Beeinflussung durch Verwitterung und z.T. durch Umlagerungsprozesse. Reduzierung der Festigkeitsparameter durch Wasserzutritte. Grobkornkomponenten mit hohen Gesteinsfestigkeiten, Blöcke mit Größen bis in den dm3-Bereich.
GA Q7	Mittelplastisches bis ausgeprägt plastisches, schluff-tondominiertes Lockergestein, teilweise feinlaminierte Wechsellagerung mit feinsandigen Lagen. Z.T. organische Anteile. Reduzierung der Festigkeitsparameter durch Wasserzutritte.
GA Q8	Schluff-Sand-Kies-Stein Gemische mit geringeren Tongehalten, z.T. hohe Anteile an Blöcken und variable Anteile an Grobblecken. Ungeschichtete Lagerung. Oberflächennahe mit reduzierter Lagerungsdichte. Reduzierung der Festigkeitsparameter durch Wasserzutritte. Grobkornkomponenten mit hohen Gesteinsfestigkeiten, Grobblecke mit Größen bis in den m-Bereich.

Vollständige Tabelle der geotechnisch relevanten Parameter für die Gebirgsarten der Flyschformation:

Gebirgsart	Hauptgesteinsart		Nebengesteinsart	Tropie	Standardparameter	
	Hauptgesteinsart	Nebengesteinsart			Korngröße	Kluftkörpergröße
GA F1	Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, intakt	Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, stark zerlegt	anisotrop	nicht zutreffend	> 20 cm	
GA F2	Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, stark zerlegt	Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, intakt; Störungsgesteine, grob- bzw. feinkörnig	anisotrop	nicht zutreffend	20 cm bis 6 cm	
GA F3	Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, zerrüttet - Störungsgestein, grobkorn dominiert	Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, intakt ; Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, stark zerlegt; Störungsgestein, feinkorn dominiert	anisotrop	sand dominiert bis kies- /steindominiert	< 6 cm	
GA F4	Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, zerrüttet - Störungsgestein, feinkorn dominiert	Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, intakt, Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, stark zerlegt, Ton- /Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, zerrüttet - Störungsgestein, grob- korn dominiert	anisotrop	ton- /schluffdominiert bis sandsdominiert	< 2 cm	

Gesteinskennwerte									
Gebirgsart	Dichte ρ [g/cm ³]	UCS σ_{d-R} [MPa]	Kohäsion c' [kN/m ²]	Reibungswinkel ϕ [°]	Elastizitätsmodul E [MPa]	Abrasivität CA_{IR} [-]	Poisson Zahl ν_R [-]	Hoek-Brown i_{rp} m_{iR} [-]	
GA F1	2,5 (2,1 bis 2,7)	15 (5 bis 50)	5 (1,5 bis 14)	35 (23 bis 47)	10.000 (3.000 bis 30.000)	0,2 bis 3,5	0,2 (0,15 bis 0,25)	11 (5 bis 25)	
GA F2	2,5 (2,1 bis 2,7)	15 (5 bis 50)	5 (1,5 bis 14)	35 (23 bis 47)	10.000 (3.000 bis 30.000)	0,2 bis 3,5	0,2 (0,15 bis 0,25)	11 (5 bis 25)	
GA F3	2,2 (2,1 bis 2,3)	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	
GA F4	2,2 (2,1 bis 2,3)	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	

Gebirgsart	Gebirgskennwerte							
	Hoek-Brown GSI GSI _{RM} [-]	Druckfestigkeit $\sigma_{t, RM}$ [MPa]	Kohäsion Gebirge c_{RM} [MPa]	Reibungswinkel Gebirge φ_{RM} [°]	Elastizitätsmodul Gebirge E_{RM} [MPa]	Gebirgsdurchlässigkeit k [-]	Gebirgsdurchlässigkeit k [m/s]	
GA F1	40 (35 bis 45)	6 (4,0 bis 8,0)	2,0 (1,5 bis 2,5)	28 (23 bis 33)	1.500 (800 bis 3.000)	gering durchlässig	10-7	
GA F2	30 (25 bis 35)	1,5 0,5 bis 4,0)	0,5 (0,2 bis 1,5)	25 (20 bis 30)	700 (500 bis 1.000)	gering durchlässig bis mitteldurchlässig	10-7 bis 10-5	
GA F3	nicht zutreffend	nicht zutreffend	0,10 (0,05 bis 0,15)	22 (20 bis 25)	300 (200 bis 500)	gering durchlässig	10-8 bis 10-7	
GA F4	nicht zutreffend	nicht zutreffend	0,03 (0,03 bis 0,05)	18 (15 bis 20)	125 (75 bis 300)	sehr gering durchlässig	≤ 10-8	

Gebirgsart	Trennflächenkennwerte	
	Trennflächenreibungswinkel ϕ_{TF} [°]	Trennflächenrestreibungswinkel ϕ_{TF} [°]
GA F1	20 (15 bis 25)	12 (10 - 14)
GA F2	20 (15 bis 25)	12 (10 - 14)
GA F3	nicht zutreffend	12 (10 bis 14)
GA F4	nicht zutreffend	12 (10 bis 14)

Gebirgsart	Beschreibung
GA F1	<p>Wechselfolge aus quarzreichen Sandsteinen bis Quarzsandsteinen sowie karbonatischen Sandsteinen und Ton-/Schluffsteinen bis Mergelsteinen mit Kalksteinzwischenlagen, mit Zwischenlagen / Zonen aus stark zerlegten Gesteinen der Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, Mächtigkeit der einzelnen Gesteinslagen variiert im Bereich von Millimetern und Zentimetern bis zu mehreren Metern. Aufgrund der Wechsellagerung ausgeprägte Gebirgsanisotropie, Gefügeanisotropie v.a. in Ton-/Schluffsteinen bzw. in laminierten Wechselfolgen. Schichteinfallen überwiegend mit steilen Winkeln sowohl gegen nördliche als auch gegen südliche Richtungen ist auf intensiven tektonischen Schuppenbau zurückzuführen, Schichtflächen - insbesondere in den Ton-/Schluffsteinlagen - vielfach zu schichtparallelen Störungsflächen umgewandelt, Klüfflflächen sind hauptsächlich in Sandsteinen entwickelt. Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeiten der intakten Gesteine zum überwiegenden Teil im Bereich zwischen 5 MPa und 50 MPa mit der größten Häufigkeit zwischen 10 MPa und 20 MPa, in Abschnitten mit hohen Karbonatgehalten bis zu 200 MPa in Form von Hartlingslagen mit Mächtigkeiten im Bereich von Dezimetern bis wenigen Metern. In Ton-/Schluffsteinen z.T. erhöhte Gehalte von quellfähigen Tonmineralen (effektiver Smektitgehalt bis ca. 20 %), Reduktion der Trennflächenparameter durch Wasserzutritte.</p>
GA F2	<p>Wechselfolge aus stark zerlegten Ton-/Schluffsteinen bis Mergelsteinen und quarzreichen Sandsteinen bis Quarzsandsteinen bzw. karbonatischen Sandsteinen mit Kalksteinzwischenlagen, mit Zwischenlagen / Zonen von intakten Gesteine der Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge, Mächtigkeit der einzelnen Gesteinslagen variiert im Bereich von Millimetern und Zentimetern bis zu mehreren Metern, geringmächtige Einschaltungen von grob- bzw. feinkorn dominierten Störungsgesteinen. Aufgrund der Wechsellagerung ausgeprägte Gebirgsanisotropie, Gefügeanisotropie v.a. in Ton-/Schluffsteinen bzw. in laminierten Wechselfolgen. Schichteinfallen überwiegend mit steilen Winkeln sowohl gegen nördliche als auch gegen südliche Richtungen ist auf intensiven tektonischen Schuppenbau zurückzuführen, Schichtflächen - insbesondere in den Ton-/Schluffsteinlagen - vielfach zu schichtparallelen Störungsflächen umgewandelt, Klüfflflächen hauptsächlich in Sandsteinen entwickelt.</p> <p>Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeiten der intakten Gesteine zum überwiegenden Teil im Bereich zwischen 5 MPa und 50 MPa mit der größten Häufigkeit zwischen 10 MPa und 20 MPa, in Abschnitten mit hohen Karbonatgehalten bis zu 200 MPa in Form von Hartlingslagen mit Mächtigkeiten im Bereich von Dezimetern bis wenigen Metern. In Ton-/Schluffstein z.T. erhöhte Gehalte von quellfähigen Tonmineralen mit effektiven Smektitgehalten bis ca. 20 %.</p> <p>Reduktion der Trennflächenparameter durch Wasserzutritte.</p>
GA F3	<p>Störungsgesteine mit sandig bis kiesiger, meist nur gering feinkörniger Matrix und Blöcken mit Durchmesser im Dezimeterbereich, mit intakten Scherkörpern variabler Größe und mit Zwischenlagen / Zonen von intakten sowie stark zerlegten Gesteinen der Ton-/Schluffstein - Sandstein Wechselfolge und Einschaltungen von feinkörnigem Störungsgestein, die Mächtigkeit der Zwischenlagen / Zonen und Einschaltungen liegen im Bereich von Dezimetern bis wenigen Metern. Materialeigenschaften wesentlich von Kornzusammensetzung, Verhältnis zwischen Matrix- und Blockanteil und Grad der Kompaktion bzw. Grad der Auflockerung geprägt, typisch ist geringe Kohäsion des Störungsgesteins durch fehlenden oder nur geringen Feinkornanteil. Aufgrund der intensiven Scher- und Zerlegungsprozesse ist Struktur und Textur des Ausgangsgesteins nicht bzw. kaum mehr erkennbar; z.T. hohe Gehalte an quellfähigen Tonmineralen, effektiver Smektitgehalt bis ca. 50 %, Medianwert: 17 %. Durch den Kontakt mit Wasser erhebliche Verschlechterung der Eigenschaften, z.B. durch Aufweichen bei Wasserzutritten, erhöhtes Erosionspotential, Reduktion des Scherwiderstandes, Volumszunahme.</p>
GA F4	<p>Gemische der Ton- bis Kiesfraktion mit dominierenden Anteilen von Schluff und Ton, intakte Scherkörper variabler Größe. Intensive Scherprozesse führen zu hoher Dichte an Harnschflächen und zur Ausbildung von kleinvolumigen, scherbenartigen Scherkörpern sowie zu einer ausgeprägten Kornzerkleinerung (Kataklasten) des Ausgangsgesteins.</p> <p>Typisch für diese Störungsgesteine ist ihr plastisches Verformungsverhalten. Hohe Gehalte an quellfähigen Tonmineralen, effektiver Smektitgehalt bis ca. 50 %, Medianwert: 17 %. Durch den Kontakt mit Wasser erhebliche Verschlechterung der Eigenschaften, z.B. durch Aufweichen bei Wasserzutritten und entsprechender Konsistenzänderung, erhöhtes Erosionspotential, Reduktion des Scherwiderstandes, Volumszunahme.</p>

Anhang B

Vollständige Tabelle des PSET *Koesa_Pset_IfcGeotechnicalStratum*:

Handle	Layer	Volumen	Gebirgsart_ dominierend	Gebirgsart_ untergeordnet	Gebirgsart_ untergeordnet	Gebirgsart_ sehr_ untergeordnet	Orientierung_Schicht- flaecheengefuege
36DB89	V_FLYSCH	73249189	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	k.A.
36DB96	V_FLYSCH	724017	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	k.A.
36DB59	V_FLYSCH	9001287	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	k.A.
36DB90	V_FLYSCH_Ausbruch	1086	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	k.A.
36DB44	V_FLYSCH_Ausbruch	1825	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.	k.A.
36DBA2	V_FLYSCH_GHT1	1056222	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DB9F	V_FLYSCH_GHT1_Ausbruch	2671	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DB99	V_FLYSCH_GHT1_Ausbruch	4318	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DB9C	V_FLYSCH_GHT1_Ausbruch	2137	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DB4D	V_FLYSCH_GHT1_Ausbruch	713	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBAB	V_FLYSCH_GHT2	5791431	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBA8	V_FLYSCH_GHT2_Ausbruch	26651	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBA5	V_FLYSCH_GHT2_Ausbruch	27653	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DB50	V_FLYSCH_GHT2_Ausbruch	31	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBC6	V_FLYSCH_GHT3	3625866	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBC0	V_FLYSCH_GHT3_Ausbruch	7816	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBBA	V_FLYSCH_GHT3_Ausbruch	6226	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBBD	V_FLYSCH_GHT3_Ausbruch	2088	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DB53	V_FLYSCH_GHT3_Ausbruch	27	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBB4	V_FLYSCH_GHT3_Ausbruch	4469	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBB1	V_FLYSCH_GHT3_Ausbruch	9430	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBAE	V_FLYSCH_GHT3_Ausbruch	1800	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBD2	V_FLYSCH_GHT4	16465304	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig
36DB56	V_FLYSCH_GHT4_Ausbruch	31	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig	stumpf- bis rechtwinkelig

Handle	Layer	Volumen	Gebirgsart_ dominierend	Gebirgsart_ untergeordnet	Gebirgsart_ sehr_ untergeordnet	Orientierung_Schicht- flaechengefuege
36DBCF	V_FLYSCH_GHT4_Ausbruch	57511	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBC9	V_FLYSCH_GHT4_Ausbruch	54219	GA F2 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBE0	V_FLYSCH_GHT5	348479	GA Q8 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F2 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DBD7	V_FLYSCH_GHT5_Ausbruch	2035	GA Q8 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F2 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DB4A	V_FLYSCH_GHT5_Ausbruch	477	GA Q8 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F2 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DC07	V_FLYSCH_GHT6	4506237	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBFE	V_FLYSCH_GHT6_Ausbruch	110	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBF5	V_FLYSCH_GHT6_Ausbruch	107	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBE9	V_FLYSCH_GHT6_Ausbruch	9	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB5C	V_FLYSCH_GHT6_Ausbruch	61	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DC01	V_FLYSCH_GHT6_Ausbruch	986	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBEC	V_FLYSCH_GHT6_Ausbruch	52	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB3B	V_FLYSCH_SET1	2204986	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DCB2	V_FLYSCH_SET2	11312947	GA Q4 (> 30 %)	GA Q2 (10 - 30 %) GA Q5 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %) GA F2 (< 10 %) GA F3 (10 %) GA F4 (10 %)	schleifend bis parallel
36DCAA	V_FLYSCH_SET2_Ausbruch	10257	GA Q4 (> 30 %)	GA Q2 (10 - 30 %) GA Q5 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %) GA F2 (< 10 %) GA F3 (10 %) GA F4 (10 %)	schleifend bis parallel
36DB38	V_FLYSCH_SET2_Ausbruch	10592	GA Q4 (> 30 %)	GA Q2 (10 - 30 %) GA Q5 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %) GA F2 (< 10 %) GA F3 (10 %) GA F4 (10 %)	schleifend bis parallel

Handle	Layer	Volumen	Gebirgsart_ dominierend	Gebirgsart_ untergeordnet	Gebirgsart_ sehr_ untergeordnet	Orientierung_Schicht- flaechegefuege
36DD0A	V_FLYSCH_SET3-1	5824376	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	spitzwinkelig bis parallel
36DCBA	V_FLYSCH_SET3-1_Ausbruch	19525	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	spitzwinkelig bis parallel
36DB3E	V_FLYSCH_SET3-1_Ausbruch	19357	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	spitzwinkelig bis parallel
36DEE1	V_FLYSCH_SET3-2	242337315	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	spitzwinkelig bis parallel
36DD00	V_FLYSCH_SET3-2_Ausbruch	486646	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	spitzwinkelig bis parallel
36DCBD	V_FLYSCH_SET3-2_Ausbruch	482430	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	spitzwinkelig bis parallel
36DCF2	V_FLYSCH_SET4-1	28472480	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DCE8	V_FLYSCH_SET4-1_Ausbruch	70858	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DCDA	V_FLYSCH_SET4-1_Ausbruch	69827	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DEEC	V_FLYSCH_SET4-2	184979800	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DCD7	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	208062	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DCD1	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	209268	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DEF7	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	291074	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DEF2	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	290807	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DEEF	V_FLYSCH_SET4-3	5465815	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig

Handle	Layer	Volumen	Gebirgsart_ dominierend	Gebirgsart_ untergeordnet	Gebirgsart_ sehr_ untergeordnet	Orientierung_Schicht- flaechengefuege
36DCD4	V_FLYSCH_SET4-3_Ausbruch	27576	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DCE	V_FLYSCH_SET4-3_Ausbruch	27576	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DB41	V_FLYSCH_SET4-3_Ausbruch	1766	GA F3 (> 30 %)	GA F2 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F1 (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36DCC8	V_FLYSCH_SET5	896687	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DCC2	V_FLYSCH_SET5_Ausbruch	34	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB47	V_FLYSCH_SET5_Ausbruch	1368	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36CF05	V_KONGLOMERAT	11335504	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB2D	V_KONGLOMERAT_SET1	1667043	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DCB7	V_KONGLOMERAT_SET2	31834	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB25	V_KONGLOMERAT_SET2	137955	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB2C	V_KONGLOMERAT_SET2_Ausbruch	29	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB2B	V_KONGLOMERAT_SET3-1	275035	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB2E	V_KONGLOMERAT_SET3-1	300037	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DEE6	V_KONGLOMERAT_SET3-2	9448973	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB33	V_KONGLOMERAT_SET4-1	7786764	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB28	V_KONGLOMERAT_SET4-2	624776	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DEFA	V_KONGLOMERAT_SET4-2	34750004	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36D6C5	V_LOCKERGESTEIN	11828628	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB93	V_LOCKERGESTEIN	26026	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DAFE	V_LOCKERGESTEIN	288	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DAF8	V_LOCKERGESTEIN	73151	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DAFA	V_LOCKERGESTEIN	1244	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DAF9	V_LOCKERGESTEIN	0	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB1D	V_LOCKERGESTEIN	1495868	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB03	V_LOCKERGESTEIN_Ausbruch	19	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB11	V_LOCKERGESTEIN_GHT1	41827	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB14	V_LOCKERGESTEIN_GHT2	662024	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.

Handle	Layer	Volumen	Gebirgsart_ dominierend	Gebirgsart_ untergeordnet	Gebirgsart_ sehr_ untergeordnet	Orientierung_Schicht- flaechengefuege
36DBC3	V_LOCKERGESTEIN_GHT3	156147	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBB7	V_LOCKERGESTEIN_GHT3_Ausbruch	0	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB17	V_LOCKERGESTEIN_GHT3_Ausbruch	802	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBCC	V_LOCKERGESTEIN_GHT4	621397	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB1A	V_LOCKERGESTEIN_GHT4_Ausbruch	12	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBDD	V_LOCKERGESTEIN_GHT5	81661	GA Q8 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F2 (< 10 %)	k.A.
36DBDA	V_LOCKERGESTEIN_GHT5_Ausbruch	283	GA Q8 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F2 (< 10 %)	k.A.
36DB0E	V_LOCKERGESTEIN_GHT5_Ausbruch	1665	GA Q8 (> 30 %)	GA F3 (10 - 30 %) GA F4 (10 - 30 %)	GA F2 (< 10 %)	k.A.
36DC0A	V_LOCKERGESTEIN_GHT6	2499942	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBFB	V_LOCKERGESTEIN_GHT6_Ausbruch	4631	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBF8	V_LOCKERGESTEIN_GHT6_Ausbruch	2450	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBE3	V_LOCKERGESTEIN_GHT6_Ausbruch	4231	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB20	V_LOCKERGESTEIN_GHT6_Ausbruch	25	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DC04	V_LOCKERGESTEIN_GHT6_Ausbruch	4538	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBF2	V_LOCKERGESTEIN_GHT6_Ausbruch	33608	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBEF	V_LOCKERGESTEIN_GHT6_Ausbruch	2060	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DBE6	V_LOCKERGESTEIN_GHT6_Ausbruch	5722	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DCA4	V_LOCKERGESTEIN_SET1	5065544	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DAEB	V_LOCKERGESTEIN_SET1_Ausbruch	800	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DCA1	V_LOCKERGESTEIN_SET1_Ausbruch	11686	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DC9E	V_LOCKERGESTEIN_SET1_Ausbruch	122726	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DCAF	V_LOCKERGESTEIN_SET2	2847595	GA Q4 (> 30 %)	GA Q2 (10 - 30 %) GA Q5 (10 - 30 %)	GA Q3 (< 10 %)	k.A.
36DCA7	V_LOCKERGESTEIN_SET2_Ausbruch	34731	GA Q4 (> 30 %)	GA Q2 (10 - 30 %) GA Q5 (10 - 30 %)	GA Q3 (< 10 %)	k.A.
36DAE8	V_LOCKERGESTEIN_SET2_Ausbruch	34751	GA Q4 (> 30 %)	GA Q2 (10 - 30 %) GA Q5 (10 - 30 %)	GA Q3 (< 10 %)	k.A.
36DAEE	V_LOCKERGESTEIN_SET3-1	1177298	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DEE9	V_LOCKERGESTEIN_SET3-2	18384553	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DAFD	V_LOCKERGESTEIN_SET4-1	1595042	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.

Handle	Layer	Volumen	Gebirgsart_ dominierend	Gebirgsart_ untergeordnet	Gebirgsart_ sehr_ untergeordnet	Orientierung_Schicht- flaechengefuege
36DAF3	V_LOCKERGESTEIN_SET4-1	1194663	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DAFC	V_LOCKERGESTEIN_SET4-2	2484600	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DF03	V_LOCKERGESTEIN_SET4-2	231024	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DEFD	V_LOCKERGESTEIN_SET4-2	12377710	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DAFB	V_LOCKERGESTEIN_SET4-3	314	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DF00	V_LOCKERGESTEIN_SET4-3	81943	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DCCB	V_LOCKERGESTEIN_SET5	26609	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB0B	V_LOCKERGESTEIN_SET5	4366	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DCC5	V_LOCKERGESTEIN_SET5_Ausbruch	9	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36DB08	V_LOCKERGESTEIN_SET5_Ausbruch	111	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	k.A.
36D272	V_ST01	118545	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	schleifend bis parallel
36D278	V_ST02	44268	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	schleifend bis spitzwinkelig
36D26C	V_ST03	3804987	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	schleifend bis spitzwinkelig
36D266	V_ST04	6885249	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	schleifend
36D1BE	V_ST05	1709740	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	spitzwinkelig
36D260	V_ST07	2149461	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	spitzwinkelig
36B0A4	V_ST07	2149461	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	spitzwinkelig
36D25A	V_ST08	3668934	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	spitz- bis stumpfwinkelig
36D254	V_ST09	29730	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig
36D24E	V_ST10	7588203	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	spitzwinkelig
36D248	V_ST11	2305985	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig
36D236	V_ST12	2502071	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	schleifend bis spitzwinkelig
36D242	V_ST13	10549	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36D23C	V_ST14	428925	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36D230	V_ST15	4576093	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36D206	V_ST17	82969	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36D224	V_ST18	25935	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36D1C4	V_ST19	32169	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	spitzwinkelig
36D218	V_ST20	3669114	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig
36D212	V_ST22	368795	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig

Handle	Layer	Volumen	Gebirgsart_ dominierend	Gebirgsart_ untergeordnet	Gebirgsart_ sehr_ untergeordnet	Orientierung_Schicht- flaechegefuege
36D20C	V_ST23	8112	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36D200	V_ST24	44678	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig
36D1FA	V_ST25	74198	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig
36D1EE	V_ST26	540564	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	spitzwinkelig
36D1F4	V_ST27	10773	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig
36D1CA	V_ST28	15501	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig
36D1E8	V_ST29	74030	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig
36D1E2	V_ST30	59327	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig
36D1DC	V_ST31	48829	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig
36D1D6	V_ST32	946160	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpf- bis rechtwinkelig
36D1D0	V_ST33	574067	k.A. (> 30 %)	k.A. (10 - 30 %)	k.A. (< 10 %)	stumpfwinkelig

Vollständige Tabelle des PSET Koesa_Pset_IfcGeotechnicalStratum_Gebirgsverhaltenstypen:

Handle	km-Anfang	km-Ende	Abschnittslänge	Layer	Volumen	Gebirgsverhaltenstyp_ dominierend	Gebirgsverhaltenstyp_ untergeordnet	Gebirgsverhaltenstyp_ sehr_ untergeordnet	Gebirgsverhaltenstyp_ zusätzlich	
36DCAA	294,343	294,75	407	V_FLYSCH_SET2_Ausbruch	10257	GVT7	GVT8	GVT9	GVT10	
36DB38	294,343	294,75	407	V_FLYSCH_SET2_Ausbruch	10592	GVT7	GVT8	GVT9	GVT10	
36DB2C	294,343	294,75	407	V_KONGLOMERAT_SET2_Ausbruch	29	GVT7	GVT8	GVT9	GVT10	
36DAE8	294,343	294,75	407	V_LOCKERGESTEIN_SET2_Ausbruch	34751	GVT7	GVT8	GVT9	GVT10	
36DCA7	294,343	294,75	407	V_LOCKERGESTEIN_SET2_Ausbruch	34731	GVT7	GVT8	GVT9	GVT10	
36DCBA	294,75	294,925	175	V_FLYSCH_SET3-1_Ausbruch	19525	GVT4	GVT2	GVT7	GVT10	
36DB3E	294,75	294,925	175	V_FLYSCH_SET3-1_Ausbruch	19357	GVT4	GVT2	GVT7	GVT10	
36DCBD	294,925	300,68	5755	V_FLYSCH_SET3-2_Ausbruch	482430	GVT4	GVT2	GVT9	GVT10	
36DD00	294,925	300,68	5755	V_FLYSCH_SET3-2_Ausbruch	486646	GVT4	GVT2	GVT9	GVT10	
36DCE8	300,68	301,518	838	V_FLYSCH_SET4-1_Ausbruch	70858	GVT4	GVT2	GVT9	GVT10	
36DCDA	300,68	301,518	838	V_FLYSCH_SET4-1_Ausbruch	69827	GVT4	GVT2	GVT9	GVT10	
36DEF2	301,518	307,42	5902	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	290807	GVT4	GVT2	GVT9	GVT10	
36DEF7	301,518	307,42	5902	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	291074	GVT4	GVT2	GVT9	GVT10	
36DCD7	301,518	307,42	5902	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	208062	GVT4	GVT2	GVT9	GVT10	
36DCD1	301,518	307,42	5902	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	209268	GVT4	GVT2	GVT9	GVT10	
36DCD4	307,42	307,67	250	V_FLYSCH_SET4-3_Ausbruch	27576	GVT7	-	-	GVT10	
36DCE	307,42	307,67	250	V_FLYSCH_SET4-3_Ausbruch	27576	GVT7	-	-	GVT10	
36DB41	307,42	307,67	250	V_FLYSCH_SET4-3_Ausbruch	1766	GVT7	-	-	GVT10	
36DBA8	307,83	308,18	350	V_FLYSCH_GHT2_Ausbruch	26651	GVT7	GVT8	GVT9	GVT10	
36DBA5	307,83	308,18	350	V_FLYSCH_GHT2_Ausbruch	27653	GVT7	GVT8	GVT9	GVT10	
36DB50	307,83	308,18	350	V_FLYSCH_GHT2_Ausbruch	31	GVT7	GVT8	GVT9	GVT10	
36DB1A	308,4	309,16	760	V_LOCKERGESTEIN_GHT4_Ausbruch	12	GVT4	GVT2	GVT3	GVT8	GVT9
36DBCF	308,4	309,16	760	V_FLYSCH_GHT4_Ausbruch	57511	GVT4	GVT2	GVT3	GVT8	GVT9
36DBC9	308,4	309,16	760	V_FLYSCH_GHT4_Ausbruch	54219	GVT4	GVT2	GVT3	GVT8	GVT9
36DB56	308,4	309,16	760	V_FLYSCH_GHT4_Ausbruch	31	GVT4	GVT2	GVT3	GVT8	GVT9
36DB4A	309,16	309,19	30	V_FLYSCH_GHT5_Ausbruch	477	GVT7	-	-	GVT10	
36DB0E	309,16	309,19	30	V_LOCKERGESTEIN_GHT5_Ausbruch	1665	GVT7	-	-	GVT10	
36DBDA	309,16	309,19	30	V_LOCKERGESTEIN_GHT5_Ausbruch	283	GVT7	-	-	GVT10	
36DBD7	309,16	309,19	30	V_FLYSCH_GHT5_Ausbruch	2035	GVT7	-	-	GVT10	

Vollständige Tabelle des PSET *Koesa_Pset_IfcGeotechnicalStratum_Ortsbrustverhalten*:

Handle	km-Anfang	km-Ende	Abschnittslänge	Layer	Volumen	Ortsbrustverhalten_ dominierend	Ortsbrustverhalten_ untergeordnet	Ortsbrustverhalten_ sehr_untergeordnet
36DD00	294,925	300,68	5755	V_FLYSCH_SET3-2_Ausbruch	486646	OBV4	OBV3 OBV8	OBV2 OBV9
36DCBD	294,925	300,68	5755	V_FLYSCH_SET3-2_Ausbruch	482430	OBV4	OBV3 OBV8	OBV2 OBV9
36DCDA	300,68	301,518	838	V_FLYSCH_SET4-1_Ausbruch	69827	OBV4	OBV3 OBV8 OBV9	OBV2 OBV7
36DCE8	300,68	301,518	838	V_FLYSCH_SET4-1_Ausbruch	70858	OBV4	OBV3 OBV8 OBV9	OBV2 OBV7
36DCD1	301,518	307,42	5902	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	209268	OBV4	OBV3 OBV8 OBV9	OBV2 OBV7
36DCD7	301,518	307,42	5902	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	208062	OBV4	OBV3 OBV8 OBV9	OBV2 OBV7
36DEF7	301,518	307,42	5902	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	291074	OBV4	OBV3 OBV8 OBV9	OBV2 OBV7
36DEF2	301,518	307,42	5902	V_FLYSCH_SET4-2_Ausbruch	290807	OBV4	OBV3 OBV8 OBV9	OBV2 OBV7

Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre, dass ich meine Masterarbeit selbständig verfasst und alle in ihr verwendeten Unterlagen, Hilfsmittel und die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Ich nehme zur Kenntnis, dass auch bei auszugsweiser Veröffentlichung meiner Masterarbeit die Universität, das/die Institut/e und der/die Arbeitsbereich/e, an dem/denen die Masterarbeit ausgearbeitet wurde, und die Betreuerin/nen bzw. der/die Betreuer zu nennen sind.

Ich nehme zur Kenntnis, dass meine Masterarbeit zur internen Dokumentation und Archivierung sowie zur Abgleichung mit der Plagiatssoftware elektronisch im Dateiformat pdf ohne Kennwortschutz bei der/dem Betreuer/in einzureichen ist, wobei auf die elektronisch archivierte Masterarbeit nur die/der Betreuerin/Betreuer der Masterarbeit und das studienrechtliche Organ Zugriff haben.

Innsbruck am
.....
Hans Exenberger, BSc