

Die modellgestützte geologische Prognose im Tunnelinformationsmodell

Die digitalisierte geologische Prognose – Grundlage für die geotechnische
Planung sowie die interdisziplinäre Ausführungsdocumentation

Mag. rer. nat. Ines M. Massimo-Kaiser

Innsbruck, Januar 2025

Dissertation

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

Doktorin der Technischen Wissenschaften

Erster Beurteiler:	Univ. Prof. DI Dr. techn. Matthias Flora, Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iBT)
Zweiter Beurteiler:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Lulei, Technische Universität Wien, Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, Forschungsbereich Bauwirtschaft und Baumanagement

- Hauptbetreuer: Univ. Prof. DI Dr. techn. Matthias Flora, Universität Innsbruck,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften,
Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iBT)
- Mitbetreuer: Ass. Prof. Bmstr. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Fröch,
Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und
Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Baumanagement,
Baubetrieb und Tunnelbau (iBT)

Jedes Tunnelbauwerk ist ein Kompromiss

Danksagung

Danke an alle meine Konstanten und Variablen.

Zunächst möchte ich Matthias Flora für die Unterstützung während des gesamten Forschungsprozesses und der Mitwirkung an den daraus entstandenen Publikationen danken. Seine Expertise und konstruktiven Rückmeldungen haben maßgeblich zur Entwicklung dieser Arbeit beigetragen.

Georg Fröch danke ich ebenfalls für seine wertvolle Expertise, mit der er mich während der Erstellung dieser Arbeit begleitet hat. Seine konstruktiven Anregungen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Mein Dank gilt zudem meinen Mitautoren und Interviewpartnern Richard Loidl, Frédéric Heil, Karl Grossauer, Nedim Radoncic, Heiko Nehrer, Thomas Marcher, sowie Hans Exenberger, Hannah Salzgeber und Hannah Werkgarner für den teils bereits jahrelangen Wissenstransfer, den fachlichen Austausch, die Unterstützung, die offenen Ohren und die vielen Gespräche.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, meinem familiären Umfeld und meinem Christian, die mir die Werkzeuge und die Unterstützung für all meine Wege bis hierher gegeben haben.

Ein weiterer Dank geht an Larissa Schneiderbauer für ihre jederzeitige Bereitschaft zur Diskussion über den Tellerrand hinaus, sowie an alle Kolleginnen und Kollegen am Arbeitsbereich iBT, die mit mir Ideen austauschten, Diskussionen führten und ein unterstützendes akademisches Umfeld für mich und SeniorScienceDog Bully und JuniorScienceDog Lilo schufen, sowie an alle, die in irgendeiner Form beigetragen haben, diese Dissertation abzuschließen.

Kurzfassung

Diese Dissertation widmet sich der Integration geologischer Planungsprozesse in das Building Information Modeling (BIM) und die Entwicklung eines Tunnelinformationsmodells (TIM) für die modellgestützte geologische Prognose. Speziell die Modelldarstellung des Baugrundes für die geotechnische Planung eines Infrastrukturprojektes findet im Spannungsfeld verschiedenster normativer Vorgaben statt. Ziel ist es, den Level of Information Need (LOIN) mit Fokus auf geologische Aspekte zu definieren und die Harmonisierung bestehender Standards wie Eurocode 7 und ÖGG-Richtlinien zu erreichen.

Die Dissertation wird als kumulative Arbeit verfasst, bestehend aus mehreren thematisch verbundenen wissenschaftlichen Publikationen (Artikel 1-3, Forschungsartikel 1 und Konferenzbeiträge 1 und 2), die in anerkannten Fachzeitschriften veröffentlicht wurden. Der kumulative Ansatz bietet den Vorteil, dass aktuelle Forschungsergebnisse bereits während des Forschungsprozesses einer breiten wissenschaftlichen Gemeinschaft zugänglich gemacht werden können. Darüber hinaus fördert er die enge Verknüpfung von Dissertation und internationalem Forschungsdiskurs und ermöglicht eine differenzierte Betrachtung des Dissertationsthemas aus verschiedenen Perspektiven. Dies stärkt nicht nur die wissenschaftliche Qualität der Arbeit, sondern trägt auch zur nachhaltigen Sichtbarkeit der Forschungsergebnisse bei.

Die Arbeit beginnt nach der Vorstellung der Grundlagen und Methoden mit einer umfassenden Analyse der aktuellen Entwicklungen und Herausforderungen in der digitalen Baugrundmodellierung im Tunnelbau. Durch eine Literaturrecherche und erste Experteninterviews wird der Status Quo ermittelt und Defizite in der aktuellen BIM-Implementierung identifiziert. Die Ergebnisse werden in Artikel 1 veröffentlicht. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sowie auf den gesammelten Erfahrungen bei der Begleitung von sieben Tunnelbauprojekten, in denen die BIM-Methode bereits in der Planung und Ausführung genutzt wurde, erfolgt eine Bewertung der sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen von BIM/TIM, dokumentiert in Forschungsartikel 1. Für den Konferenzbeitrag 1 wird ein Konzept zur Erstellung eines digitalen schematischen, parametrisierten Baugrundmodells entwickelt, das über alle Projektphasen nutzbar bleibt und Kausalitäten zwischen Geologie und Bauwerk aufzeigt. Konferenzbeitrag 2 führt diesen Gesamtprozess weiter und stellt ein Konzept für die baubegleitende Arbeitsvorbereitung und Dokumentation im Tunnelprojekt Angath (ÖBB) auf Basis des Tunnel Information Modeling (TIM) vor. In Artikel 2 wird ein digitaler Workflow zur modellbasierten Darstellung der Prognose(un)sicherheit bei seicht liegenden Tunnels erarbeitet und umgesetzt. Dieses Modell ermöglicht eine dynamische Anpassung und kontinuierliche Aktualisierung geologischer Daten, was zu einer präziseren und effizienteren

geotechnischen Planung führen soll. Weitere Experteninterviews ermöglichen die Bearbeitung und Beantwortungen konkreter Fragestellungen. Schließlich erfolgt in Artikel 3 die Auswertung und Interpretation der Forschungsergebnisse sowie die Definition des Levels of Information Need (LOIN) für Baugrundelemente, um die Forschungsfrage gezielt zu beantworten. Die Definition des LOIN erfolgt durch die Festlegung von Eigenschaften, die projektspezifisch angepasst werden können.

Die Dissertation zeigt, dass die frühzeitige Festlegung der notwendigen geologischen und geotechnischen Eigenschaften sowie die kontinuierliche Integration dieser Daten in ein fortschreibbares Modell erhebliche Vorteile für die Planung und Ausführung von Tunnelbauprojekten bietet. Ein weiterer Aspekt der Arbeit ist die Evaluierung der entwickelten Modelllösungen auf Basis realer Infrastrukturprojekte. Die Ergebnisse zeigen, dass die TIM-Methode nicht nur die Effizienz in der Informationsbereitstellung steigern, sondern auch die Qualität der Zusammenarbeit und die Planungssicherheit erheblich verbessern kann. Die modellgestützte geologische Prognose im Tunnelinformationsmodell stellt somit eine vielversprechende Methode zur Optimierung von Tunnelbauprojekten dar. Diese Arbeit liefert wertvolle Ansätze für die Praxis und legt die Grundlage für zukünftige Forschungen zur Weiterentwicklung der geologischen Modellierung in BIM-Projekten.

Abstract

This dissertation focuses on integrating geological planning processes into Building Information Modeling (BIM) and developing a Tunnel Information Model (TIM) for model-based geological prognosis. The model representation of the ground for geotechnical planning of infrastructure projects operates within the constraints of various normative requirements. The objective is to define the Level of Information Need (LOIN) with a focus on geological aspects and achieve the harmonization of existing standards such as Eurocode 7 and ÖGG guidelines.

The dissertation is written as a cumulative work, consisting of several thematically related scientific publications (article 1-3, research article 1 and conference papers 1 and 2) published in recognized academic journals. The cumulative approach offers the advantage of making current research results accessible to a broad scientific community during the research process. Furthermore, it promotes a close linkage between the dissertation and international research discourse, allowing for a multifaceted examination of the dissertation topic from different perspectives. This not only enhances the scientific quality of the work but also contributes to the sustainable visibility of the research outcomes.

Following an introduction to the foundations and methodologies, the dissertation begins with a comprehensive analysis of current developments and challenges in digital ground modelling in tunnelling. Through a literature review and expert interviews, the status quo is determined, and gaps in the current BIM implementation are identified. The results are published in article 1. Building on these insights and the experiences gathered during the supervision of seven tunnel construction projects where the BIM-method was used in planning and execution, an evaluation of the social and economic impacts of BIM/TIM is conducted, as documented in research article 1. For conference paper 1, a concept for creating a digital, schematic, and parameterized ground model is developed. This model remains usable across all project phases and demonstrates causal relationships between geology and the structure. Conference paper 2 advances this comprehensive process and presents a concept for construction-phase preparation and documentation in the Angath tunnel project (ÖBB) based on TIM. In article 2, a digital workflow for the model-based representation of prognosis unreliability in shallow tunnels is developed and implemented. This model allows for dynamic adjustments and continuous updates of geological data, aiming to achieve a precise and efficient geotechnical planning. Additionally, expert interviews facilitated the addressing and answering of specific questions. As part of the process of defining a scalable LOIN applicable to multiple projects and use cases, a pool of properties was established which can be used tailored to project specific requirements.

The dissertation demonstrates that early determination of the necessary geological and geotechnical properties, as well as the continuous integration of this data into an updatable model, offers significant advantages for the planning and execution of tunnel construction projects. Another aspect of the work is the evaluation of the developed model solutions based on real infrastructure projects. The results show that the TIM method may not only increase the efficiency of information provision but could also significantly improve collaboration quality and planning reliability. Model-based geological prognosis within the Tunnel Information Model thus represents a promising approach to optimizing tunnel construction projects. This work provides valuable approaches for practice and lays the foundation for future research on advancing geological modelling in BIM projects.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis.....	xii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage.....	3
1.3 Liste der Publikationen.....	4
1.4 Struktur der Arbeit.....	7
1.5 Limitationen	8
1.6 Anmerkungen	8
2 Grundlagen und Methoden	9
2.1 Building Information Modeling (BIM)	9
2.2 Tunnel Information Modeling (TIM)	14
2.3 Die geologische Planung und Prognose	15
2.4 Das digitale Baugrundmodell	17
2.5 Methoden.....	18
2.6 Publikationen.....	18
2.7 Durchgeführte Experteninterviews.....	20
3 Publikationen	21
3.1 Artikel 1	21
3.2 Artikel 2	29
3.3 Artikel 3	38
3.4 Weitere Forschungsartikel.....	47
3.4.1 Beitrag open access journal (peer-reviewed).....	47
3.4.2 Konferenzbeitrag 1 (peer-reviewed).....	49
3.4.3 Konferenzbeitrag 2 (peer-reviewed).....	51
4 Experteninterviews.....	53
4.1 Einleitung	53
4.2 Fragestellung	54
4.3 Auswertung der Interviews.....	54

4.4	Zusammenfassung der Interviews.....	59
4.5	Vergleich der Anforderungen von Experten und Normen.....	61
5	Resultate.....	63
5.1	Forschungsprozess im BIM-normativen Kontext	63
5.2	Die modellgestützte geologische Prognose – Festlegung des LOIN für Elemente des Baugrundmodells	65
5.2.1	LOIN – Bedingungen	67
5.2.2	LOIN – Geometrie	68
5.2.3	LOIN – Information.....	69
5.2.4	LOIN – Dokumente	70
5.2.5	Definition des LOIN – Auswahl der Eigenschaften	70
5.2.5.1	Erforderliche Eigenschaften – „Schlüsselparameter“	73
5.2.5.2	Projektspezifische Eigenschaften.....	75
5.3	Ergebniszusammenfassung	76
6	Diskussion und Beantwortung der Forschungsfrage.....	78
6.1	Definition des LOIN im Tunnelinformationsmodell	78
6.2	Harmonisierung von Normen und Richtlinien.....	79
6.3	Implikationen für die Praxis und zukünftige Forschung.....	80
7	Resümee und Ausblick	81
8	Literaturverzeichnis	82
9	Anhang.....	9-1
9.1	Listen der geologisch-geotechnischen Eigenschaften – projektphasenbezogen geologische Planung	9-2
9.2	Weitere Fachbeiträge	9-9
9.2.1	MDPI	9-9
9.2.2	ISRM-Kongress 2023	9-19
9.2.3	ISRM-Kongress 2023	9-27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Auszug ÖNORM EN ISO 19650-1: Bild 4 Generische Spezifikation und Planung der Informationsbereitstellung.....	11
Abbildung 2-2: Beispielhafte Anwendungsfälle (AwF) zur Baugrundmodellierung gem. DAUB-Empfehlung [9]	12
Abbildung 2-3: Auszug ÖNORM EN 17412-1: Bild 8-Teil1 – Beziehungsdiagramm für die Informationsbedarfstiefe.....	12
Abbildung 2-4: Auszug ÖNORM EN 17412-1: Bild 8-Teil2 – Beziehungsdiagramm für die Informationsbedarfstiefe.....	14
Abbildung 2-5: BIM im Lebenszyklus eines Tunnelbauwerkes, Bild 2 aus Flora et.al. [2] aktualisiert iBT 2023	15
Abbildung 2-6: Chronologische Auflistung der Fachpublikationen	19
Abbildung 5-1: Zuordnung der Publikationen zu den Voraussetzungen der Informationsbereitstellung.....	63
Abbildung 5-2: Geologische Planungsphasen im schematischen digitalen 3D-Modell (Kapitel 3.2).....	66
Abbildung 5-3: Darstellung der Relationen der Informationsbedarfstiefe (Kapitel 3.3)	68
Abbildung 5-4: Darstellung eines trassennahen schematischen Baugrundmodells, schematische Ausbruchskörper	69
Abbildung 5-5: Beschreibung des LOIN verschiedener Baugrundelemente (Kapitel 3.3).....	71
Abbildung 5-6: Informationsbedarfstiefe für das Element Bohrung Phasen 1-4 (Kapitel 3.3)	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Geologische Planungsphasen und Beispiele für mögliche digital bearbeitbare Prozesse	65
Tabelle 5-2: Auszug aus der Eigenschaftenliste der erforderlichen Eigenschaften (siehe Anhang 9.1)	75
Tabelle 5-3: Auszug aus der Eigenschaftenliste der projektspezifischen Eigenschaften (siehe Anhang 9.1)	76

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
BIM	Building Information Modeling
CDE	Common Data Environment
CPT	Cone Penetration Test
DAUB	Deutscher Arbeitsgemeinschaft für unterirdisches Bauen
GBR	Geotechnical Baseline Report
GSI	Geological Strength Index
GVT	Gebirgsverhaltenstyp
iiM	Infrastruktur-Informationsmodell
LOIN	Level of Information Need
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
ÖGG	Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik
SIA	Schweizerischer Ingenieur – und Architektenverein
SPT	Standard Penetration Test
SSOT	Single Source of Truth
TIM	Tunnel Information Modeling
UCS	Uniaxial compressive strength

1 Einleitung

Die Effizienz und die Genauigkeit bei der Planung und der Konstruktion von Tunnelbauwerken hat in den letzten Jahren eine bemerkenswerte Entwicklung erlebt. Dabei spielt vermehrt auch das Tunnel Information Modeling (TIM), als erweiterte Anwendung des Building Information Modeling (BIM) im Untertagebau [1], in Verbindung mit einem Baugrundmodell eine wesentliche Rolle.

Die präzise Vorhersage geologischer Bedingungen im Vorfeld eines Tunnelbaus steht dabei im Fokus, um Risiken zu minimieren und effiziente Planungs-, und Bauprozesse zu gewährleisten. In diesem Kontext kann die modellgestützte geologische Prognose mittels digitaler Baugrund – und Bauwerksmodellen eine entscheidende Rolle spielen, da sie innovative digitale Methoden und Technologien vereint, um ein umfassendes Infrastruktur–Informationsmodell (iiM) [2] zu entwickeln. Diese Dissertation widmet sich der vertieften Analyse sowie der Weiterentwicklung modellgestützter Ansätze für die geologische Prognose im Rahmen eines umfassenden Tunnelinformationsmodells. Ein weiterer Aspekt ist die interdisziplinäre Kommunikation zwischen den Fachbereichen Geologie und Geotechnik bzw. den weiteren Planungs– und Projektbeteiligten. Hier gilt:

„Believe me, sometimes it's easy to understand the earth, sometimes not. But it's always hard work to explain the earth to others.“ [Zitat aus Vortrag der Autorin zu Artikel 3; Graz; ATC²; 01.12.2023]

Es werden somit nicht nur die aktuellen Herausforderungen und Entwicklungen aufgegriffen, sondern auch praxisrelevante Anwendungen und potenzielle zukünftige Entwicklungen in diesem interdisziplinären Forschungsfeld betrachtet. Ziel ist es, einen Beitrag zur Optimierung von Tunnelbauprojekten zu leisten. Dies kann durch eine effektive modellbasierte geologische Planung und Prognose erfolgen, deren fachübergreifende Translation, sowie der interdisziplinären Bereitstellung von geologischen und geotechnischen Basisdaten für die weitere Planung im Rahmen eines innovativen Tunnelinformationsmodells.

Es erfolgt unter Berücksichtigung der Richtlinien und Empfehlungen der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) [3]-[5] und der Empfehlungen des Deutschen Ausschuss für Unterirdisches Bauen e. V (DAUB) [6]-[9] die Betrachtung und Erarbeitung, wie sich der *Level of Information Need* (LOIN) [10]-[13] mit Bezug auf die geologischen Eigenschaften in einem digitalen, schematischen Tunnelinformationsmodell über die verschiedenen

Projektphasen der geologischen und geotechnischen Planung hinweg definieren, evaluieren und erhalten lässt.

In induktiver Forschung erfolgen hierfür die Identifizierung und Ausarbeitung der zugehörigen und wechselwirkenden Einflüsse im Rahmen von insgesamt sechs Publikationen (Kapitel 3). Auf Basis der erhobenen Anforderungen an digitale Baugrundmodelle werden entsprechende Prozesse zu deren Erstellung und darauf basierende digitale Lösungen erarbeitet. Weiters finden Experteninterviews hinsichtlich des Themenkreises: Anforderungen der geotechnischen Planung an die geologische Planung und Erkundung, im geologisch-geotechnischen Planungsprozess (Kapitel 4) statt. Die qualitative Inhaltsanalyse dieser Interviews in Anlehnung an Mayring [14] stellt eine weitere Grundlage für die Beantwortung der aufgeworfenen Fragestellung dar.

Zur Evaluierung der entwickelten Modell-Lösung wird eine digitale Modellierung im Sinne von TIM zur geologischen Prognose(-un)sicherheit auf Basis vorhandener geologischer und geotechnischer Grundlagendaten zum Projekt „Perjentunnel 2. Röhre“ der Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft, (ASFINAG) (Kapitel 3.2) durchgeführt.

Das Ergebnis dieser Bearbeitung ist eine Empfehlung im Sinne eines Leitfadens zur Erstellung und zum Inhalt geologischer digitaler Baugrundmodelle. Diese können dadurch über die verschiedenen Projektphasen hinweg fortgeschrieben und auch interdisziplinär verwendet werden. Unerlässlich ist hierbei die Definition von erforderlichen und projektspezifischen Eigenschaften aus dem Fachgebiet Geologie und den im Rahmen der geologischen Planung und Erkundung erhobenen geotechnischen Schlüsselparametern über die jeweilige Projektphasen hinweg. Die Abgrenzung der Leistungen des Fachbereiches Geologie (u.a. dokumentieren, beschreiben, auswerten, beurteilen) zu jenen des Fachbereiches Geotechnik (u.a. berechnen und bewerten) wird dabei berücksichtigt.

1.1 Motivation

Mit der verstärkten Forderung von Auftraggebern und Auftragnehmern in der Bauwirtschaft, die Planung und die Ausführung mittels BIM-Methode zu planen und zu begleiten, ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten der Umsetzung von BIM [2], [15] bzw. TIM.

Das Thema Baugrund ist bereits in der konventionellen (2D) Projektentwicklung stets präsent in Planung, Ausführung und Betrieb (Bauwerkssanierung, Bauwerksanpassungen etc.), jedoch jeweils in unterschiedlich starken Ausprägungen. Grundsätzlich kann der Baugrund als maßgeblich für die Planung und Herstellung von Infrastrukturbauwerken eingestuft werden, im Betrieb rückt der Stellenwert des Baugrundes deutlich in den Hintergrund. Erst mit anstehenden Sanierungsmaßnahmen oder Umbauten wird das Augenmerk neuerlich auf den Baugrund, bzw. auf die je nach Baumaßnahme notwendigen Informationen zum Baugrund, gerichtet.

Die Entwicklung eines Baugrundmodells für die Geologie und Geotechnik erfolgt grundsätzlich in dreidimensional, da es sich um die Prognose und Darstellung der räumlichen

Ausbildung und das Zusammenspiel und die Wechselwirkung geologischer Einheiten handelt. Bisher erfolgt das Herabbrechen dieser räumlichen Informationen und deren Darstellungen auf Schnittebenen (Längsschnitte, Sub-Horizontalschnitte, Querprofile), um den weiteren planenden Projektmitgliedern die Grundlagen für ihre Gewerkplanungen zu gewähren. Die maßgeblichen Gebirgs- und Gesteinsparameter werden in Tabellen und/oder Datenblattform zusammengefasst. Die räumlichen und strukturellen Zusammenhänge und Auswirkungen der dargestellten 2D-Geologie bleiben Projektbeteiligten ohne Erklärung durch die geologischen Bearbeiter oftmals verschlossen.

Tunnel Information Modeling gibt auch den geologischen Fachplanern die Möglichkeit ein digitales Baugrundmodell als informationsbelegtes 3D-Modell darzustellen [16], [17]. Somit ermöglicht ein geologisches Modell mit den entsprechenden geologischen und geotechnischen Informationen als Eigenschaften oder Attributen [12], [13] eine effektivere geotechnische Planung und daraus resultierende Bauwerksplanung. Zudem ermöglicht es ein rasches Einarbeiten ergänzender Erkundungsergebnisse und Erkenntnisse in bestehende Datengrundlagen. Darüber hinaus dient es im Rahmen der Vortriebsdokumentation als Basis zur Vortriebsprognose und zum steten Soll-Ist-Vergleich.

Bisher fehlen umfassende Erfahrungen und geeignete Datenstrukturen, um das 3D-Baugrundmodell über alle Projektphasen hinweg (Lebenszyklus) aussagekräftig und konsistent zu halten. Eine zentrale Aufgabe der TIM-Forschung besteht darin, die wissenschaftliche und formale Basis zu schaffen, um diese Strukturen als zentralen Verwaltungseinheit für Planungs- und Konstruktionsdaten in Bauprojekten zu etablieren und als „Single Source of Truth“ (SSOT) für alle geologischen Planungsschritte zu definieren. Die vorliegende Arbeit leistet einen maßgeblichen Beitrag dazu.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Als allgemeine Zielsetzung für ein digitales 3D-Baugrundmodell gilt, dass die Bearbeitung und Erstellung von weiterführenden Planungsschritten mit dem gleichen Modell möglich ist und die Planung dadurch erleichtert und qualitativ verbessert wird. Das digitale Modell basiert auf den Grundlagen und deren Interpretationen der geologischen Fachplaner. Die den Interpretationen zu Grunde liegenden Daten und Dokumente sollten zur Evaluierbarkeit verfügbar sein. Somit entstehen zum einen Transparenz und Prüfbarkeit der im Modell verwendeten Daten, zum anderen eine bessere Verständlichkeit des Gesamtmodells, trotz hoher Datendichte.

Aus der scheinbar trivialen Frage, „was braucht der Geotechniker vom Geologen um ein Tunnelbauwerk (modellbasiert) planen zu können“, ergibt sich aus der Sichtung der bisherigen Herangehensweisen in der Praxis sowie den Forschungsergebnissen zu TIM die grundlegende Frage:

Wie lässt sich der Level of Information Need (LOIN), sprich die Informationsbedarfstiefe [10], [11], welcher die strukturierte Bereitstellung und Detaillierung von Informationen gemäß den Anforderungen bestehender Standards gewährleistet, in einem schematischen Tunnelinformationsmodell mit Bezug auf die geologischen Eigenschaften über die verschiedenen Projektphasen hinweg definieren und

wie lassen sich die Vorgaben bestehender Standards zur geologischen Planung und Prognose, sowie zu deren Ergebnissen gem. Eurocode 7 [18] und der ÖGG-Richtlinien [3]-[5] mit den BIM-Grundlagen gem. den ÖNORMEN EN 17412-1 und EN ISO 19650-1 [10]-[13] harmonisieren und darstellen?

Die Rahmenbedingungen zu den genannten Fragestellungen sind in den ÖGG-Richtlinien klar definiert, eine Aufbereitung als umsetzbarer TIM-Prozess ist bisher jedoch ausständig.

1.3 Liste der Publikationen

Die angeführten Publikationen stellen den Kernteil der Dissertationsschrift dar. Gemäß dem Curriculum für das Doktoratsstudium Technische Wissenschaften an der Fakultät für Technische Wissenschaften der Universität Innsbruck, Stand 01.10.2020, kann: „*die Dissertation aus mindestens drei inhaltlich oder methodisch in Zusammenhang stehenden Artikeln (peer-reviewed) bestehen, die in anerkannten Fachzeitschriften, welche im Web of Science oder Scopus gelistet sind, zur Veröffentlichung angenommen sind, wobei die bzw. der Studierende in mindestens zwei Publikationen als Erstautorin bzw. Erstautor genannt sein muss. Sind die Artikel von mehreren Autorinnen und/oder Autoren verfasst, muss der Eigenanteil klar dargelegt sein.*“

Die Verfasserin der Dissertationsschrift ist bei den herangezogenen gelisteten Publikationen zweimal Erstautorin und einmal Zweitautorin.

Zusätzlich zu diesen Publikationen werden ein weiterer Fachartikel, publiziert bei MDPI (Herausgeber wissenschaftlicher Open-Access-Fachzeitschriften, online), sowie zwei aufeinander bezogene Tagungsbeiträge zum ISRM-Kongress Salzburg; Oktober 2023 – alle ebenfalls peer-reviewed – inkludiert. Die Verfasserin der Dissertationsschrift ist bei diesen weiteren Artikeln zweimal Erstautorin und einmal Zweitautorin.

Eine Zusammenfassung zu den Artikeln hinsichtlich des Inhaltes und der Bearbeitungsanteile der beteiligten Autoren erfolgt in den jeweiligen Unterkapiteln in Kapitel 3.

In „Web of Science“ und/oder in „Scopus“ gelistete Publikationen:

- **Artikel 1:** Exenberger, Hans; **Massimo-Kaiser, Ines;** Flora, Matthias (2022):
Current developments of digital ground modelling in tunnelling.
Geomechanics and Tunnelling 15/3, S. 284 - 289.
<http://dx.doi.org/10.1002/geot.202100065>
Scopus CiteScore (2022): 0,9
- **Artikel 2:** Massimo-Kaiser, Ines; Salzgeber, Hannah; Flora, Matthias (2023):
Model based representation of geological prognosis (un)reliability for shallow tunnels /
Modellbasierte Darstellung der Prognose(un)sicherheit bei seicht liegenden Tunnels.
Geomechanics and Tunnelling 16/6, S. 661 - 667.
<http://dx.doi.org/10.1002/geot.202300033>
Scopus CiteScore (2023): 1,2
- **Artikel 3:** Massimo-Kaiser, Ines; Fröch, Georg; Salzgeber, Hannah; Flora, Matthias (2024):
LOIN für Elemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells. Bautechnik
<https://doi.org/10.1002/bate.202400052>
Web of Science – Journal Impact Faktor (2023): 0,5; Scopus CiteScore (2023): 1,3

Weitere Fachartikel und Tagungsbeiträge:

Beitrag open access journal (peer-reviewed, gelistet)

- **Forschungsartikel 1:** *Massimo-Kaiser, Ines; Exenberger, Hans; Hruschka, Sabine; Heil, Frédéric; Flora, Matthias (2022): Streamlining Tunnelling Projects through BIM. Sustainability 14/18, Nr. 11433*
<http://dx.doi.org/10.3390/su141811433>
Web of Science – Journal Impact Faktor (2022): 3,9; Scopus CiteScore (2022): 5,8

Konferenzbeiträge (peer-reviewed):

- **Beitrag 1:** *Massimo-Kaiser, Ines; Exenberger, Hans; Salzgeber, Hannah; Werkgarner, Hannah; Loidl, Richard; Flora, Matthias (2023): From prognosis Ground Model to Tender Model and Tunnel Construction Framework Plan with Tunnel Information Modelling.* In: Proceedings of the ISRM 15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering, Schubert, W. & Kluckner, A. (eds), Salzburg, Austria, October 9-14, 2023. Austrian Society for Geomechanics: Salzburg. pp. 668-673, <https://eposter.at/ISRM2023/data/PDF/1740.pdf>
- **Beitrag 2:** *Exenberger, Hans; Massimo-Kaiser, Ines; Salzgeber, Hannah; Kompolschek, Peter; Heil, Frédéric; Flora, Matthias (2023): Concept for Tunnel Information Modelling based work-preview and documentation during construction at Tunnel Angath.* In: Proceedings of the ISRM 15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering, Schubert, W. & Kluckner, A. (eds), Salzburg, Austria, October 9-14, 2023. Austrian Society for Geomechanics: Salzburg. pp. 697-702, <https://eposter.at/ISRM2023/data/PDF/1779.pdf>

1.4 Struktur der Arbeit

Die Dissertationsschrift besteht aus sieben Hauptkapiteln, dem Literaturverzeichnis und dem Anhang.

Nach einer Einführung in Kapitel 1 mit einer Beschreibung der Ziele und der Struktur der Arbeit wird in Kapitel 2 ein Überblick zu Grundlagen und Methoden gegeben.

Kapitel 3 beinhaltet die Publikationen, sowie Zusammenfassungen der weiteren Forschungsartikel, welche im Anhang vollständig zu finden sind.

Kapitel 3.1 präsentiert den ersten in „*Geomechanics and Tunnelling*“ publizierten Artikel, welcher den Status-Quo zur aktuellen Entwicklung der digitalen Baugrundmodellierung im Tunnelbau im Jahr 2021 darstellt.

In Kapitel 3.2 erfolgt mit dem 2023 in „*Geomechanics and Tunnelling*“ veröffentlichten Artikel zur Darstellung der Prognose(-un)sicherheit in einem Tunnelinformationsmodell die Beschreibung der Entwicklung und Darstellung eines angewandten Modellierprozesses.

Kapitel 3.3 beinhaltet den 2024 in „*Bautechnik*“ veröffentlichten Artikel, in welchem die Informationsbedarfstiefe für verschiedene Baugrundelemente auf Basis der Normen zur Geologie und zur BIM-Methode beschrieben wird.

Kapitel 3.4 enthält Zusammenfassungen zu den weiteren publizierten Forschungsbeiträgen. In dem 2022 in „*Sustainability*“ erschienenen Forschungsartikel erfolgt eine Bewertung, wie sich die Anwendung von BIM bzw. TIM auf soziale und wirtschaftliche Aspekte von Tunnelbauprojekten auswirken kann.

Weiters liegen zwei Konferenzbeiträge zum *ISRM-Kongress 2023* vor, welche das entwickelte Konzept zur schematischen Darstellung eines digitalen tunnelbautechnischen Baugrundmodells sowie dessen Weiterentwicklung zur baubegleitenden Arbeitsvorbereitung und Dokumentation im Tunnelbau beschreiben.

Die Veröffentlichungen sind aufeinander aufbauend (siehe Abbildung 2-6). Die erarbeiteten Ergebnisse wurden jeweils in den folgenden Artikeln berücksichtigt und weiterentwickelt.

In Kapitel 4 wird die qualitative Auswertung der Experteninterviews durchgeführt.

Das Kapitel 5 beinhaltet die Zusammenschau und die Resultate der durchgeföhrten Forschungsleistung.

In Kapitel 6 erfolgt die Diskussion der Forschungsergebnisse in Hinblick auf die herausgearbeitete Forschungsfrage.

Das Kapitel 7 beinhaltet das Resümee und den Ausblick.

1.5 Limitationen

Diese Arbeit ist konzeptionell ausgerichtet und beschäftigt sich mit der Definition des Level of Information Need (LOIN) in Bezug auf den Baugrund, wobei die ÖGG-Richtlinien, der Eurocode 7 und die österreichischen Standards als Grundlage dienen.

Der definierte LOIN gilt projektspezifisch für seicht – und tiefliegende Tunnel und kann sowohl für maschinelle als auch konventionelle Vortriebsmethoden zur Verwendung kommen..

Der vorliegende Ansatz stellt einen ersten wichtigen Schritt dar, der sich der Strukturierung und der harmonisierten Standardisierung nähert, um das Anwendungsziel *Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für geotechnische Planung* zu erfüllen. Dabei erfolgt für geologisch-geotechnische Baugrundelemente eine Annäherung an Themen wie Objektbenennungen, Parameterbelegungen, Datenstrukturen, Datenhierarchien und Modellstrukturen sowie mögliche Umsetzungsstrategien. Es werden allerdings keine detaillierten Vorgaben zur Modellierung formuliert, um Flexibilität für projektindividuelle Anforderungen zu gewährleisten.

Die Arbeit legt einen besonderen Fokus auf die detaillierte Betrachtung geologischer Eigenschaften, da diese für die Baugrundbeschreibung und die geologische Prognose von zentraler Bedeutung sind. Das Themenfeld der Hydrogeologie wird hingegen lediglich oberflächlich gestreift. Ziel dieser konzeptionellen Herangehensweise ist es, eine standardisierte Grundlage für den Umgang mit Baugrunddaten zu schaffen.

1.6 Anmerkungen

Im Laufe der Bearbeitung dieser Dissertation wurde die ursprüngliche ÖNORM EN 17412-1 [10] in die ÖNORM EN ISO 7818-1 [11] überführt. Die Bearbeitung basiert auf der ursprünglichen ÖNORM EN 17412-1, da diese zum Zeitpunkt der Bearbeitungsaufnahme gültig war. Da die neue ÖNORM EN ISO 7818-1 (2024-11-15) inhaltlich mit der ursprünglichen ÖNORM EN 17412-1 übereinstimmt, gelten die Verweise in dieser Arbeit auf die alte Norm unverändert auch für die neue Norm.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Folgenden auf die gleichzeitige Verwendung weiblicher, männlicher oder neutraler Sprachformen verzichtet und das generische Maskulinum verwendet.

Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

2 Grundlagen und Methoden

In diesem Kapitel werden die theoretischen und methodischen Rahmenbedingungen der kumulativen Arbeit dargelegt. Zunächst werden die zentralen Konzepte und Begriffe definiert, um ein einheitliches Verständnis zu schaffen. Anschließend werden die angewandten Methoden beschrieben, die zur Analyse und Bearbeitung der Fragestellung herangezogen werden. Der Abschnitt zu den Grundlagen dient dazu, das Themenfeld einzuschränken und relevante theoretische Perspektiven zu beleuchten. Der Methodenteil beschreibt die Vorgehensweise, die bei der Erstellung der Veröffentlichungen verfolgt wird. Ziel dieses Kapitels ist es, die theoretischen und methodischen Verknüpfungen zwischen den Beiträgen der kumulativen Arbeit herauszustellen und so deren wissenschaftliche Einheitlichkeit zu unterstreichen.

2.1 Building Information Modeling (BIM)

Bei Building Information Modeling (BIM) handelt es sich um einen prozessorientierten digitalen Ansatz für das Entwerfen, Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden oder Infrastrukturen. BIM basiert auf der Erstellung und Verwendung digitaler Modelle, die umfassende Informationen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks enthalten. Die Methode BIM ist im Hochbau durchaus etabliert. Vorhandene Softwarelösungen, sowie erarbeitete Elementkataloge ermöglichen bereits eine entsprechende Verwendung für die Planung [12], [13], [19].

Building Information Modeling ist durch mehrere Elemente geprägt, die den integrativen Ansatz dieser Methode verdeutlichen. Ein zentraler Aspekt ist die 3D-Modellierung, die mit der Erstellung eines umfassenden, dreidimensionalen digitalen Modells des geplanten Bauwerks beginnt, dabei werden 3D-Bauteile mit alphanumerischen Informationen angereichert. Jedes Objekt im Modell enthält präzise Informationen zu seinen physikalischen, funktionalen und weiteren Eigenschaften. Dadurch entsteht ein Modell, das weit über die rein geometrischen Darstellungen hinausgeht und umfassende Informationen für verschiedene Phasen des Bauprojekts bereitstellt. Die 3D-Modellierung ermöglicht nicht nur eine visuelle Darstellung des gesamten Projekts, sondern fordert auch ein vertieftes Verständnis für Planungsentscheidungen. BIM fördert außerdem die Kollaboration und Koordination zwischen verschiedenen Fachleuten im Baubereich. Durch die Erstellung eines gemeinsamen Datenmodells wird eine nahtlose Koordination zwischen Architekten, Ingenieuren, Bauunternehmern und anderen Stakeholdern ermöglicht. Konflikte und Probleme können

frühzeitiger in der Planungsphase erkannt und behoben werden, was die Effizienz des gesamten Bauprozesses verbessert.

Ein weiterer Vorteil von BIM ist die phasenübergreifende Planung, die sich über den gesamten Lebenszyklus eines Bauprojekts erstreckt. Angefangen bei der Entwurfsplanung bis zur Bauausführung und dem Facility Management ermöglicht diese umfassende Betrachtung eine effiziente Nutzung von Ressourcen. Änderungen und Aktualisierungen können in Echtzeit vorgenommen werden. Abschließend werden standardisierte Datenformate und Protokolle in BIM verwendet, um eine reibungslose Datenübertragung und -verwaltung zu gewährleisten. Dies erleichtert die Integration von BIM in bestehende Arbeitsabläufe [10]-[13].

Die wichtigsten Merkmale und Ziele von Building Information Modeling lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- [1] **Digitale Modelle:** BIM verwendet digitale Modelle, die geometrische Darstellungen der Bauprojekte sowie umfangreiche Informationen über Materialien, Kosten, Zeitpläne, physische Eigenschaften und mehr enthalten.
- [2] **Kollaboration:** BIM fördert die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Bauprojektbeteiligten einschließlich Architekten, Ingenieuren, Bauunternehmern und Facility-Management-Teams. Alle Parteien können auf ein zentrales Modell zugreifen und Informationen austauschen.
- [3] **Datenaustausch:** BIM fördert das Bereitstellen strukturierter Daten für eine optimale Zusammenarbeit. Somit wird gewährleistet, dass jeder Projektbeteiligte Zugriff auf einen aktuellen Datenstand hat.
- [4] **Integration von Daten:** BIM integriert verschiedenste Projektdaten wie beispielsweise Daten zur Nachhaltigkeit. Dies ermöglicht umfassende Analysen und eine profunde Entscheidungsfindung.
- [5] **Lebenszyklusmanagement:** BIM deckt den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks ab, von der Projektidee über die Bauausführung und Inbetriebnahme bis zur Erneuerung, siehe Abbildung 2-5.
- [6] **Effizienzsteigerung:** Durch die Verwendung von BIM können Planungsprozesse optimiert, Konflikte im Vorfeld erkannt und behoben sowie Änderungen effizienter umgesetzt werden. Dies trägt zur Reduzierung von Bauzeit und Baukosten bei.
- [7] **Visualisierung und Simulation:** 3D-Modelle ermöglichen ein tieferes Verständnis des geplanten Bauprojektes. Darauf hinaus können Simulationen durchgeführt werden, um beispielsweise Energieeffizienz, Raumauslastung oder Bauabläufe zu analysieren.

Building Information Modeling bietet somit einen ganzheitlichen Ansatz für die Planung und Umsetzung von Bauprojekten, indem es den Informationsaustausch verbessert, die Effizienz steigert und die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Disziplinen fördert.

Damit die angeführten Ziele von BIM erreicht werden können, empfiehlt es sich, bereits vorgegebenen Strukturen, welche in Normen und Empfehlungen enthalten sind, zu folgen.

So ermöglicht ein **Informationsmanagement** gem. ÖNORM EN ISO 19650-1 und 2 [12], [13], bzw. gemäß der DAUB-Empfehlung Modellanforderungen – Teil 2 [8], eine strukturierte BIM-Projektabwicklung, siehe beispielsweise Abbildung 2-1.

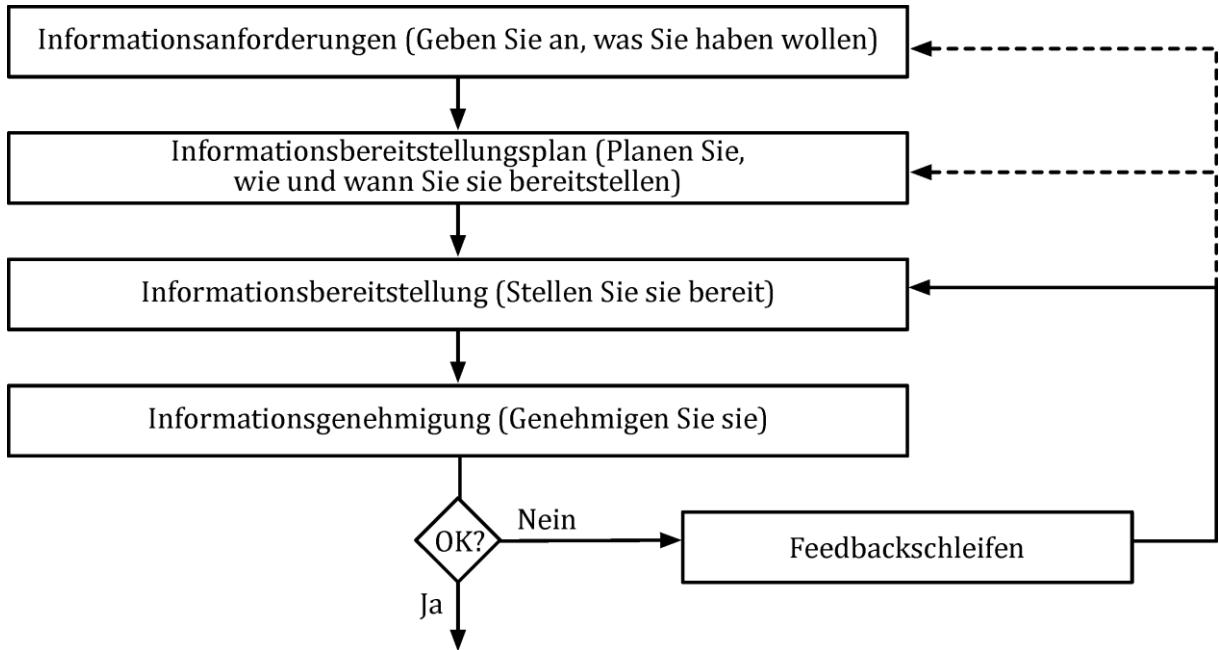


Abbildung 2-1: Auszug ÖNORM EN ISO 19650-1: Bild 4 Generische Spezifikation und Planung der Informationsbereitstellung

Mit der Definition von **Anwendungsfällen** werden konkrete Ziele bezüglich der Modellierung festlegt. Ein Anwendungsfall stellt eine „aus den BIM-Zielen abgeleitete spezielle Leistungserbringung unter Nutzung der BIM-Methodik“ ([7], Seite 16) dar, um die gezielte Aufbereitung einer Fragestellung in BIM durchzuführen, siehe hierzu Abbildung 2-2.

3.1.2 Baugrundmodellierung

Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfassung und Darstellung aller (hydro-)geologisch und geotechnisch relevanter Daten über den kompletten Projektverlauf ▪ Nutzung der Daten als Eingangsgröße für weitere Anwendungsfälle ▪ Stetige Aktualisierung des Modells bei Erkenntnisgewinn
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erstellung einer modellbasierten, konsistenten Datengrundlage des jeweils aktuellen Informationsstands für alle Projektbeteiligten zur transparenten und kooperativen Projektabwicklung ▪ Erfassung und Visualisierung möglicher bzw. tatsächlicher (hydro-)geologischer und geotechnischer Einheiten mit Berücksichtigung von interpretatorischen Unschärfen

3.2.3 Geotechnische Beurteilung und Bemessung/Nachweisführung

Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Übertragung geometrischer Randbedingungen und Eingabeparameter aus dem Baugrundmodell für die statische Bemessung von Untertagebauwerken ▪ Berechnung und Visualisierung verschiedener (hydro-)geologischer/geotechnischer Szenarien unter Verwendung des jeweiligen Sub-Fachmodells
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Steigerung der Effektivität und Unterstützung des Tragwerksplaners unter Berücksichtigung geotechnischer Randbedingungen ▪ Rückführung neuer Erkenntnisse in das Modell zur Schärfung der Prognosesicherheit

Abbildung 2-2: Beispielhafte Anwendungsfälle (AwF) zur Baugrundmodellierung gem. DAUB-Empfehlung [9]

Durch die Anwendung der normativ vorgegebenen Bestimmung **des Level of Information Need (LOIN)**, definiert als Informationsbedarfstiefe gem. ÖNORM EN 17412-1 [10], [11] werden grundlegenden Fragen zur Datenbereitstellung geklärt. Der LOIN legt fest, welche Informationen in welchem Umfang und Detaillierungsgrad in welcher Lebenszyklusphase eines Bauprojekts benötigt werden. Diese normative Definition des LOIN bietet einen standardisierten Ansatz für ein ganzheitliches, konsistentes Informationsniveau. Durch die Definition von Anwendungsfällen wird die Kommunikation erleichtert und werden Inkonsistenzen minimiert. Die Definition des LOIN fördert die Erstellung prüfbarer digitaler Modelle, verbessert Entscheidungsprozesse und schafft eine Grundlage für die automatisierte Prüfung strukturierter und unstrukturierter Informationen gemäß ÖNORM EN ISO 19650-1 [12]. Hierfür wird eine vorgegebene Struktur (siehe Abbildung 2-1) angewendet, die einheitlich für alle Fachbereiche gilt.

Die Festlegung des LOIN basiert auf folgenden Bedingungen (siehe Abbildung 2-3):

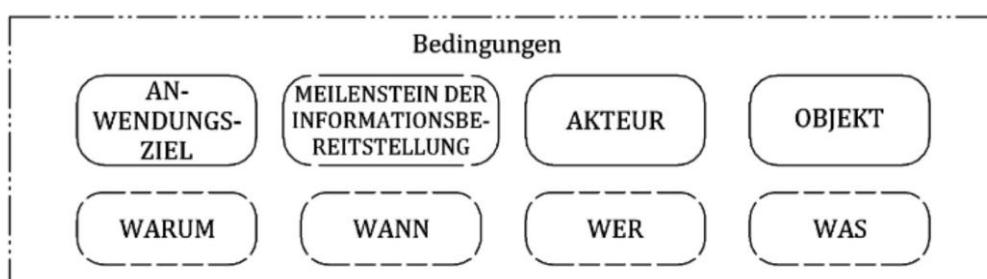


Abbildung 2-3: Auszug ÖNORM EN 17412-1: Bild 8-TeilI – Beziehungsdiagramm für die Informationsbedarfstiefe

Anwendungsziel: Die Informationsanforderungen werden so definiert, dass sie zielgerichtet und auf die jeweilige Aufgabe abgestimmt sind, um relevante und nützliche Daten aus der Baugrundkundung bereitzustellen.

Meilensteine der Informationsbereitstellung: Entsprechend den einzelnen Projektphasen – von der Planung über den Bau bis hin zum Betrieb und zur Wartung – werden spezifische Anforderungen formuliert, die den variierenden Informationsbedarf der geologischen Planung berücksichtigen.

Akteure: Rollen und Verantwortlichkeiten der Projektbeteiligten werden klar festgelegt, sodass transparent wird, welche geologischen Informationen von wem für die geotechnische Planung bereitgestellt werden sollen.

Objekte: Bauelementklassen wie Bohrungen, geologische Strukturen oder Grundwasserstände dienen als Grundlage für die Semantik eines BIM-Modells. Diese Objekte enthalten geometrische, materialtechnische und weitere relevante Daten, die während des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks genutzt werden können.

Die Festlegung des Anwendungsziels einer allgemeinen Informationsanforderung ermöglicht die Ableitung spezifischer Anwendungsfälle. Obwohl diese nicht zwingend als Grundlage für die Definition des LOIN dienen, können sie sinnvoll daraus hervorgehen.

Die Beschreibung des LOIN erfolgt gemäß [10], [11] anhand dreier Komponenten, welche die notwendigen Informationen für verschiedene Phasen eines Bauprojekts eindeutig und zweckmäßig festlegen (siehe Abbildung 2-4):

Geometrische Informationen beinhalten die Beschreibung der Darstellung, der Dimensionen, der Detailgenauigkeit, der Lage und des parametrischen Verhaltens eines Objekts in einem digitalen Modell. Das parametrische Verhalten sorgt dafür, dass die Form, die Position und die Ausrichtung eines Objekts von zugeordneten Informationen abhängen, was eine Neukonfiguration ermöglicht. Diese Informationen sind wichtig für die visuelle und räumliche Darstellung, wie etwa die genaue Beschreibung von Bohrungen in der Baugrundkundung durch ihre Koordinaten, deren Bohrtiefe und den Durchmesser.

Alphanumerische Informationen ergänzen die geometrischen Informationen und umfassen Daten zur Beschreibung der Eigenschaften von Bauelementen, wie zum Beispiel Identitätsmerkmale, Zertifizierungen, Ökobilanzen, Funktionsmerkmale, geologische Strukturen, geotechnische Eigenschaften und Materialbeschaffenheit.

Die **Dokumentation** umfasst schriftliche Nachweise und Belege wie Pläne, Berichte, Bohrprofile und Versuchsergebnisse, die die anderen Informationsarten ergänzen. Der LOIN legt für jede Projektphase den Umfang und das Datenformat der Dokumentation fest, um Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Projektablaufs zu gewährleisten und eine umfassende Dokumentation des Bauwerks zu ermöglichen.

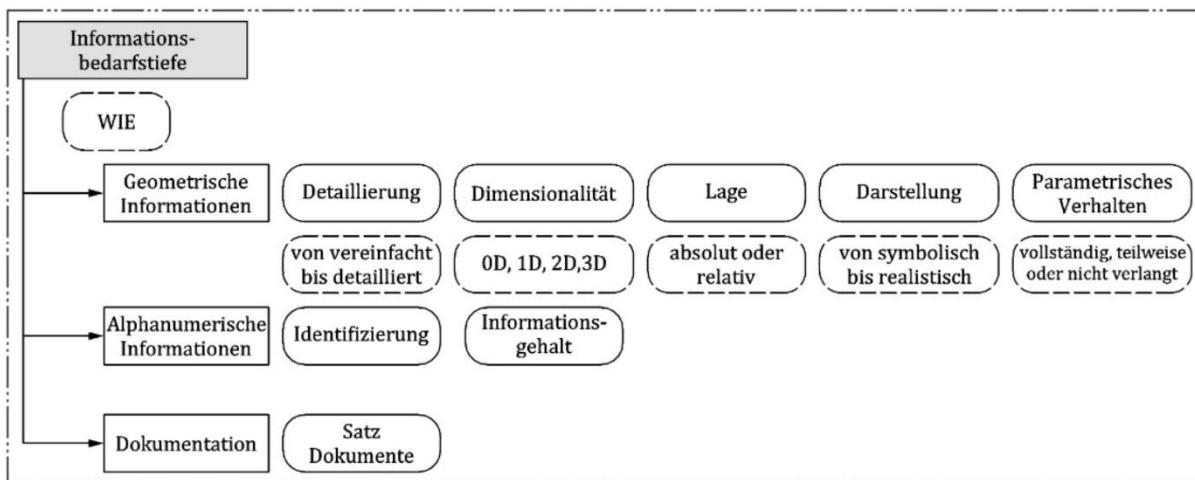


Abbildung 2-4: Auszug ÖNORM EN 17412-1: Bild 8-Teil2 – Beziehungsdiagramm für die Informationsbedarfstiefe

Der LOIN stellt durch die Definition des Umfangs und Detaillierungsgrads der geometrischen, alphanumerischen Informationen und Dokumente sicher, dass die bereitgestellten Daten präzise und vollständig sind, um den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden, ohne unnötige Informationen zu liefern. Dadurch werden fundierte Entscheidungsfindungen ermöglicht, Unsicherheiten verringert und eine effiziente Planung, Ausführung und Wartung des Bauwerks über seinen gesamten Lebenszyklus gefördert.

2.2 Tunnel Information Modeling (TIM)

TIM ist die Erweiterung der BIM-Methodik auf den Untertagebau und konzentriert sich auf die Planung, den Bau und den Betrieb von Tunnelprojekten. Dabei sind die spezifischen Anforderungen und Herausforderungen von Tunnelbauvorhaben zu berücksichtigen und die Vorteile der digitalen Modellierung auf diesen Bereich anzuwenden. Die Umsetzung der digitalen Baugrundmodellierung in TIM gestaltet sich durchaus schwierig, da grundlegende Fragen zum notwendigen Informationsgehalt noch nicht geklärt sind. Es gilt zu berücksichtigen, dass die geologischen Parameter, welche für die Planung von Tunnelprojekten erhoben und beurteilt werden sollen, [20]-[23] umfassend sind.

Die wichtigsten Merkmale von TIM sind dieselben wie jene von BIM. Herausfordernd ist jedoch die Vielzahl an zusätzlichen Eigenschaften, welche durch die Berücksichtigung des Baugrundes, sowie dessen meist großflächigen lateralen und horizontalen Erstreckung die Modelldatenstruktur deutlich beeinflusst. Die Abbildung der Unschärfen der geologischen Prognose stellt eine weitere Herausforderung dar, da die weitere Bauwerksplanung direkt davon abhängig ist.

Infrastrukturprojekte sind durch hohe Projektdauern gekennzeichnet. Dementsprechend steht im Lebenszyklus des Infrastrukturbauwerkes kein Abbruch, sondern die Sanierung und Revitalisierung der Infrastruktur im Fokus.

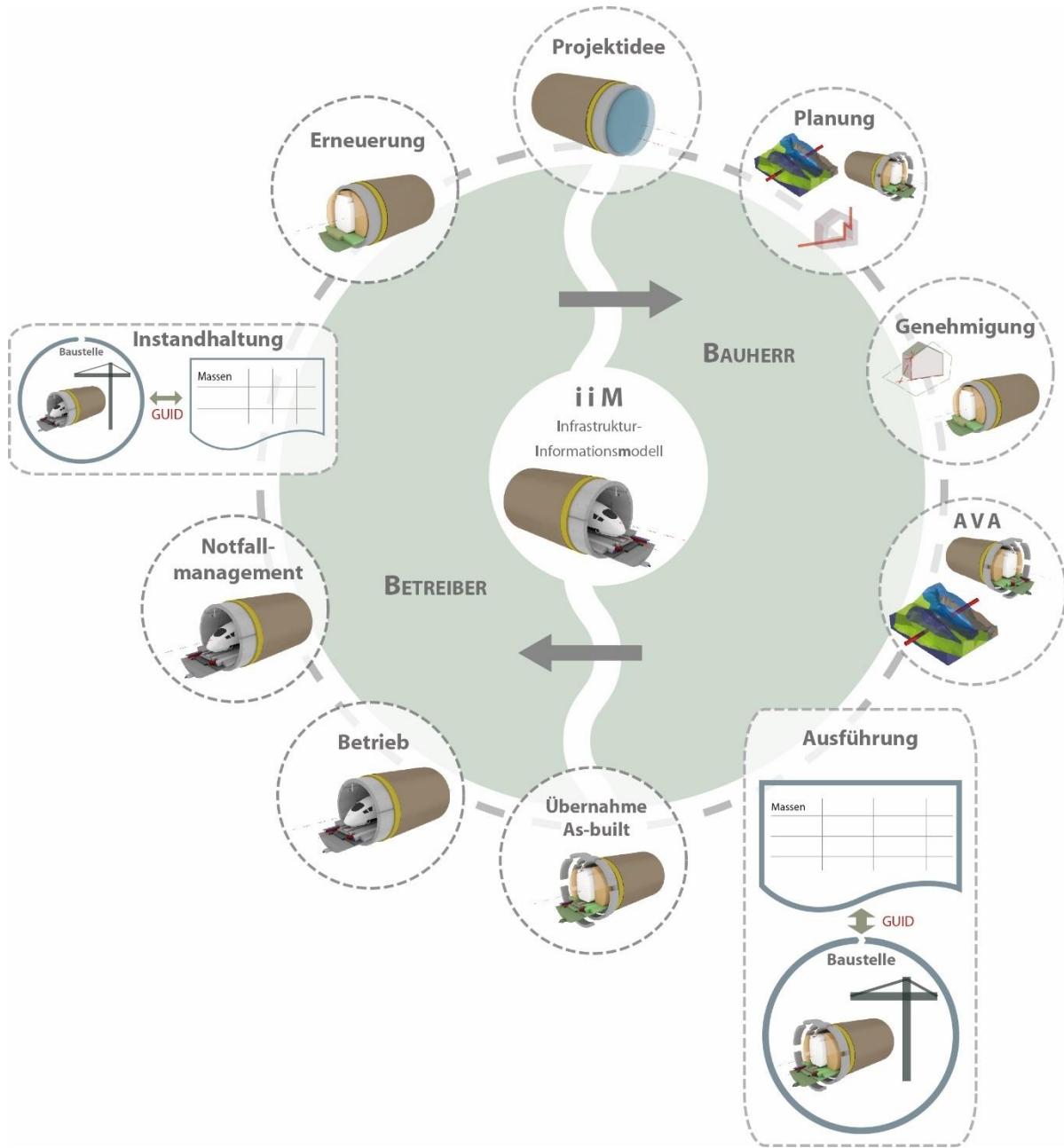


Abbildung 2-5: BIM im Lebenszyklus eines Tunnelbauwerkes, Bild 2 aus Flora et.al. [2] aktualisiert iBT 2023

Tunnel Information Modeling ermöglicht erhöhte Effizienz und Präzision durch frühzeitiges Erkennen von Herausforderungen und eine höhere Sicherheit von Tunnelbauprojekten durch die Nutzung digitaler Modelle und integrierter Informationsdaten. Eine umfassende Darstellung des Tunnelprojekts über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg wird möglich.

2.3 Die geologische Planung und Prognose

Für die Planung und Herstellung von Infrastruktur – und Tunnelbauwerken ist eine umfassende Erkundung des Baugrundes unerlässlich. Die Untersuchung, Bewertung und Datenaufbereitung der geologischen Gegebenheiten bilden die Basis der geologischen Planung und

Baugrunderkundung, um eine evaluierbare geologische Prognose für die Bauwerksplanung zu erarbeiten. Dies erfolgt auf Basis vorhandener Normen und Richtlinien [3], [20]-[22] sowie mit Bezug auf den Eurocode 7 [18].

Der Eurocode 7 (ÖNORM EN 1997-1) und die ÖGG-Richtlinien (Österreichische Gesellschaft für Geomechanik) legen spezifische Vorgaben für die geologische Erkundung im Untertagebau fest, um eine fachgerechte geologische Prognose sowie, eine sichere und wirtschaftliche Planung für den Bau von Tunnelbauwerken zu gewährleisten. Die genannten Regelwerke zielen darauf ab, geotechnische Daten zu erheben, die eine stabile und dauerhafte Gestaltung der untertägigen Bauwerke ermöglichen.

Der **Eurocode 7** legt fest, dass über die geologische Erkundung die geotechnischen Eigenschaften des Baugrunds bestimmt werden sollten, einschließlich geologischer Schichten, Bodenarten, Grundwasserverhältnissen und geomechanischen Parametern. Der Umfang und die Tiefe der Erkundung sollten an die Größe und Art des Bauwerks sowie an die geologischen Gegebenheiten angepasst werden. Für große oder tiefliegende Bauwerke ist eine umfangreichere Erkundung erforderlich, während kleinere Projekte mit einer weniger detaillierten Untersuchung auskommen können. Der Eurocode 7 empfiehlt eine Kombination aus Bohrungen, geophysikalischen Verfahren und Laboruntersuchungen, um die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Baugrunds zu bestimmen. Dies umfasst unter anderem Laboruntersuchungen wie Triaxialversuche und Vororttests wie den Standard Penetration Test (SPT) oder den Cone Penetration Test (CPT), um die Scherfestigkeit und das Setzungsvermögen zu ermitteln. Die Untersuchung und Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse sind ebenfalls zentrale Bestandteile, da das Grundwasser die Tragfähigkeit und Stabilität des Bauwerks beeinflusst. Der Eurocode 7 fordert zudem eine kontinuierliche und aktualisierte Erkundung während des gesamten Projektverlaufs, insbesondere wenn unvorhergesehene geologische Bedingungen auftreten oder bei Tunnel- und Tiefbauarbeiten neue geologische Informationen gewonnen werden. Alle erhobenen Daten sollen dokumentiert und ausgewertet werden, um eine fundierte Risikoanalyse zu ermöglichen und die weitere Planung sowie den Bau effizient durchführen und abwickeln zu können.

Die **ÖGG-Richtlinie** ergänzt diese Anforderungen und legt detaillierte Vorgaben für die geologische Erkundung im Untertagebau fest. Hierbei spielen geophysikalische Untersuchungen und Bohrungen ebenfalls eine zentrale Rolle, um präzise Informationen zu geologischen Schichten, mechanischen Eigenschaften des Gesteins und hydrogeologischen Verhältnissen zu erhalten. Gezielte Bohrungen entlang der geplanten Tunnelstrecke oder des Bauwerks werden empfohlen, um die geologischen Verhältnisse im Trassenverlauf zu ermitteln. Der Umfang der physikalischen und mechanischen Eigenschaften auf welche die Gesteinsproben im Labor projektspezifisch untersucht werden können, ist in der Richtlinie in Anhang A dargestellt [3]. Ebenso wird die kontinuierliche Überwachung von geotechnischen Parametern während der Bauausführung und nach Abschluss des Projekts gefordert, um

Veränderungen im Baugrund zu erkennen. Daten zur Grundwasserführung, zum Wasserdruck und zur Wasserqualität sollen sorgfältig erfasst werden.

Zusammenfassend stellen der Eurocode 7 und die ÖGG-Richtlinien sicher, dass die geologische Erkundung alle relevanten geotechnischen und hydrogeologischen Aspekte ausreichend abdeckt, um die Sicherheit und Effizienz des Bauprojekts zu gewährleisten und potenzielle Risiken frühzeitig zu identifizieren. Somit erfolgt nach Eurocode 7 [18] auf die geologische Basisarbeit (Grundlagenerhebung, geologische Kartierung und Auswertung natürlicher Aufschlüsse etc.) projektspezifisch die Erkundungsplanung, die Dokumentation und Auswertung der Erkundungsergebnisse aus Feld und Laborversuchen, um gem. ÖGG-Richtlinie [3] die geologischen und geotechnischen Schlüsselparameter für die geotechnische Planung zu bestimmen (Druckfestigkeit, Kohäsion, Scherwinkel, etc.). Somit können in weiterer Folge für seicht- oder tiefliegende Tunnelbauwerke das Gebirgsverhalten und daraus das Systemverhalten für konventionelle und maschinelle Vortriebe bestimmt werden.

Umfassende geologische Erkundungen dienen demzufolge dazu, den Erkenntnisgewinn zum Baugrund und dadurch die Prognosesicherheit zu erhöhen, um ein realitätsnahe Baugrundmodell zu erstellen. Die frühzeitige Implementierung der geotechnischen Planung in die geologische Basisarbeit ermöglicht eine zielgerichtete Erkundung- und Versuchsplanung, Ausführung, Auswertung und Interpretation der Erkundungsmaßnahmen.

2.4 Das digitale Baugrundmodell

Das Überführen des soeben beschriebenen „klassischen“ geologischen Planungsablaufes in die Erstellung eines digitalen 3D-Tunnelinformationsmodells, sowie die digitale Aufbereitung der erhoben geologischen Daten erweisen sich als herausfordernd. Das Umsetzen und Harmonisieren der normativen Vorgaben der Fachbereiche Geologie und Geotechnik, der BIM-Methode und des Eurocode 7 [18] ermöglicht jedoch, auch im Hinblick auf die Empfehlung des DAUB-Empfehlungen [6], [9] eine modellbasierte geologische Planung.

Im Zuge der meist langwierigen geologischen Erhebungen wird eine große Menge an Daten generiert. Um diese Daten für weitere Bearbeitungen verwenden zu können, sollten sie stets fachgerecht ausgewertet, beurteilt, zusammengefasst und interpretiert werden. Ein großräumiges digitales Geologie-, bzw. Baugrundmodell mit diesen laufend neu erhaltenen Daten, Interpretationen und Bewertungen aktuell zu halten, ist herausfordernd und ressourcenintensiv. Die Erstellung von digitalen Modellen und den zugehörigen, gut strukturierten Datenrepositories (Datenbanken) bieten die Möglichkeit diese hohe Anzahl an Daten nutzbar zu machen, bzw. die Daten zu erhalten.

Wird der Fokus auf das Bauwerk, bzw. die Bauwerksumgebung gelegt, kann eine zusammenfassende, schematisierte Darstellung der geologischen Gegebenheiten entlang des Bauwerksbereiches zweckmäßig sein. Die Größe ist variabel, so kann zum Beispiel ein

schematische Ausbruchskörper auf der Tunneltrasse oder ein schematischer Aushubskörper über den Trassenbereich hinweg betrachtet werden. Auch die DAUB-Empfehlung [9] beschreibt als Annäherung dazu ein „Streckenabschnittsmodell“. Eine schematische Darstellung, ermöglicht mit den aktuellen Mitteln eine schnelle und teilautomatisierte Anpassung eines Modells. Festgelegte Informationen und Eigenschaften werden den schematischen Körpern zugewiesen.

2.5 Methoden

Um die aufgeworfenen Fragestellungen gem. 1.2 hinsichtlich des notwendigen Informationsgehaltes eines digitalen Baugrundmodells zu erörtern, erfolgt zum Thema TIM-Baugrundmodell eine ausführliche Literaturrecherche. Um bei diesem jungen und schnelllebigen Thema auf dem neuesten Stand zu sein, wird für die vorliegende Arbeit vorwiegend Literatur ab 2016 herangezogen. Auf der Basis der Literaturrecherche erfolgt die Erarbeitung von Fragen zum Thema TIM und Baugrund, um mit semi-strukturieren, Experteninterviews praxisnahe Forschung durchzuführen. Im Zuge der Forschungsarbeit wird eine eingehende Sichtung und Gegenüberstellung der gängigen Normen und Richtlinien zu den Themen Geologie, Geotechnik und BIM durchgeführt.

Dieser empirischen und induktiven Methode folgend entwickelt sich ein fortschreitender Forschungsprozess, welcher sich in den vorgestellten Publikationen widerspiegelt.

Von der Erhebung des Status-Quo, über die Bewertung der Anwendung und des Nutzens von TIM in laufenden Tunnelprojekten, erfolgt als Teilausarbeitung eines entwickelten Gesamtprozesses (von Planung bis Ausführung) die Konzeptionierung von Modelllösungen. Die schematische Darstellung eines tunnelbautechnischen Rahmenplanes, die baubegleitende Arbeitsvorbereitung und Dokumentation, sowie die Ausarbeitung eines Prozesses zur Darstellung der geologischen Prognosesicherheit im Tunnelinformationsmodell, wurden umgesetzt. In weiterer Folge wird der LOIN für ausgewählte Baugrundelemente definiert.

2.6 Publikationen

Der Forschungsprozess, der dieser Dissertation zu Grunde liegt, basiert auf den erfolgten Recherchen und Defizitanalysen hinsichtlich der Verwendung von BIM und TIM in Bezug auf den Baugrund, sowie den erhobenen Anforderungen an den Informationsgehalt eines digitalen Baugrundmodells. Der Konnex der publizierten Forschungsarbeiten ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

Mittels Recherche und Interviews erfolgt eine Erhebung des Status Quo zur aktuellen Entwicklung der digitalen Baugrundmodellierung im Tunnelbau, dargestellt in *Artikel 1*.

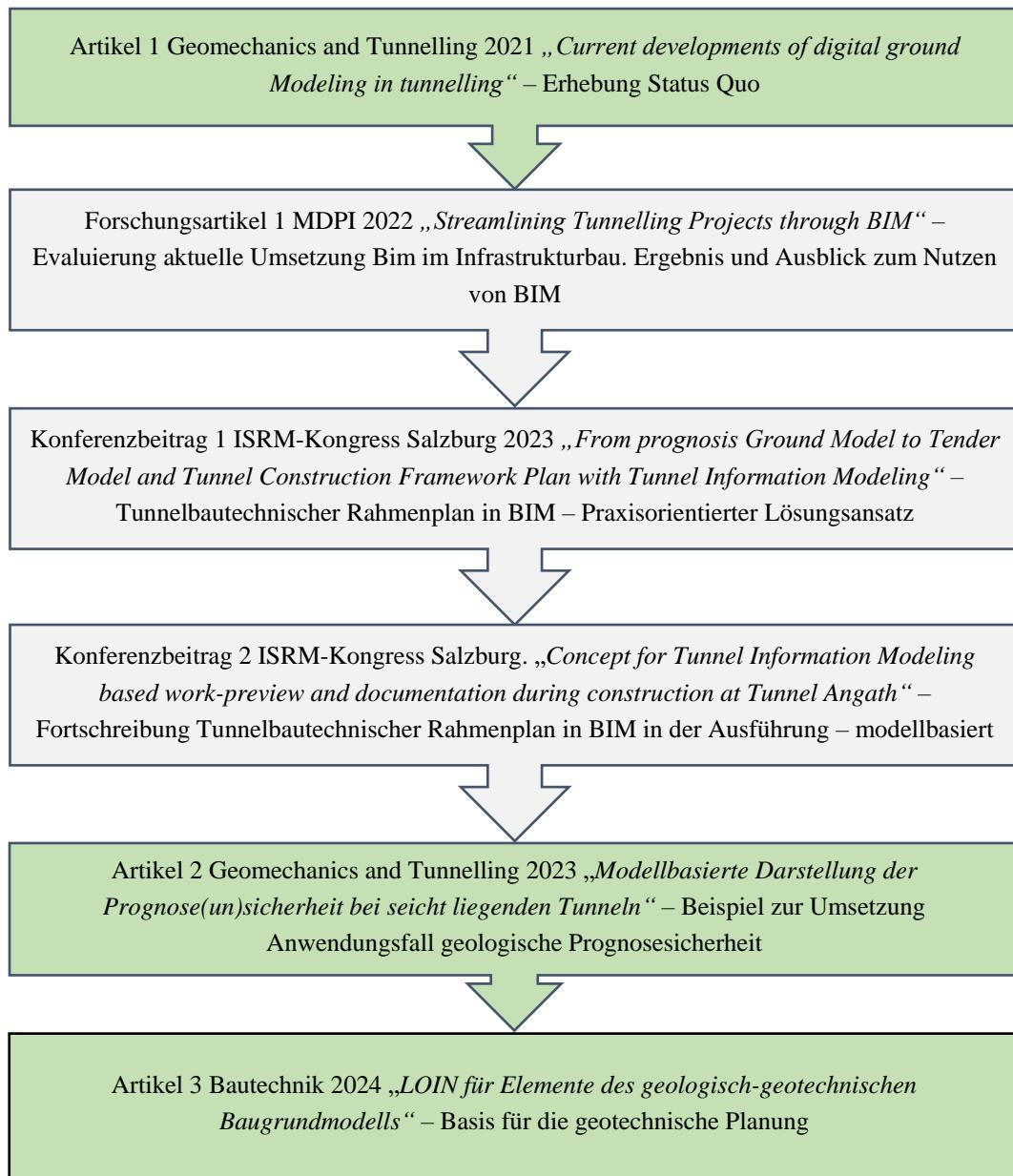


Abbildung 2-6: Chronologische Auflistung der Fachpublikationen

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse und der Forschungsarbeit an realen Infrastrukturprojekten, in welchen die BIM-Methode bereits in der Planung zur Anwendung kommt, erfolgt im *Forschungsartikel 1* eine Analyse wie sich die Anwendung von BIM / TIM auf soziale und wirtschaftliche Aspekte auswirkt.

Aufbauend auf den Ergebnissen wird für den *Konferenzbeitrag 1* als Teil eines erarbeiteten Gesamtprozesse zur Planung und Ausführung eines Tunnelbauprojektes ein Konzept zur Erstellung eines digitalen tunnelbautechnischen Baugrundmodells entwickelt, welches über alle

Projektphasen nutzbar ist und Kausalitäten zwischen Geologie und Bauwerk ersichtlich macht. *Konferenzbeitrag 2* beinhaltet darauf aufbauend, bzw. dem Gesamtprozess folgend ein Konzept zur baubegleitenden Arbeitsvorbereitung und Dokumentation im Rohbaustollen Angath (ÖBB) gemäß der TIM-Methodik.

Artikel 2 beinhaltet, basierend auf den bisherigen Forschungsergebnissen, die Erarbeitung und Umsetzung eines digitalen Workflows zur modellbasierten Darstellung der Prognose(un)-sicherheit bei seicht liegenden Tunnels.

Um sich konkret mit der Beantwortung der Forschungsfrage auseinanderzusetzen, erfolgt in **Artikel 3** die Auswertung und Interpretation der kumulierten Forschungsergebnisse, und die Festlegung des LOIN für Baugrundelemente.

2.7 Durchgeführte Experteninterviews

Als Teil der induktiven Forschung werden zur Erörterung der Fragestellung „Anforderungen der Geotechnik an die Geologie“ mit dem Fokus auf den Informationsgehalt des Baugrundmodells im Tunnelinformationsmodell Interviewgespräche mit vier ausgewählten Experten aus den Bereichen Planung, Ausführung und Wissenschaft Interviewgespräche geführt.

Die zusammenfassende Auswertung findet sich in Kapitel 4.

3 Publikationen

3.1 Artikel 1

Current developments of digital ground modelling in tunnelling.

[Aktuelle Entwicklung der digitalen Baugrundmodellierung im Tunnelbau]

Exenberger, H.; Massimo-Kaiser, I. M.; Flora, M. (2022)

Geomechanics and Tunnelling 15, No. 3, pp. 284–289. <https://doi.org/10.1002/geot.202100065>

Scopus CiteScore (2022): 0,9

Verantwortlichkeiten in der Bearbeitung (individueller Beitrag):

Konzeptualisierung, Methodik, Datenerhebung, Verfassen des ursprünglichen Entwurfs:

- Hans Exenberger und Ines Massimo-Kaiser

Verfassen, Überprüfung und Redaktion:

- Hans Exenberger, Ines Massimo-Kaiser, Matthias Flora

Alle Autoren haben sich an der Durchsicht und Bearbeitung dieses Beitrags beteiligt.

Inhalt:

Der Artikel „*Aktuelle Entwicklung der digitalen Baugrundmodellierung im Tunnelbau*“ behandelt den Stand der Technik in der Entwicklung digitaler Baugrundmodelle im Tunnelbau. Die Forschung umfasst eine Literaturübersicht, Experteninterviews und eine Defizitanalyse, um aktuelle Herausforderungen und Chancen von „BIM im Baugrund“ zu identifizieren. Die Einleitung hebt die rasante Entwicklung von BIM im Tunnelbau und im Infrastrukturbau hervor. Der Fokus der Studie liegt auf der Anwendung und Umsetzung von Tunnel Information Modeling im Jahr 2021. Ziel ist es, einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand von TIM sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie zu bieten. Sechs wesentliche Fragen werden für semi-strukturierte Experteninterviews entwickelt, um das Defizit in der aktuellen BIM-Implementierung im Tunnelbau zu analysieren.

In der Ausarbeitung wird auf die Bedeutung der Zusammenarbeit und des Datenaustauschs über verschiedene Projektphasen und Interessengruppen hinweg, sowie auf den Bedarf einer einheitlichen Datenstruktur, der Integration von Standards und der Bewältigung tunnelbauspezifischer Herausforderungen hingewiesen.

Die qualitativen Interviews unterstreichen das vielfältige Verständnis der Anforderungen und Möglichkeiten von BIM. Die Vorteile von BIM, wie die konzentrierte Verfügbarkeit von Informationen, das Streben nach einer einzigen Informationsquelle und die verbesserte Kommunikation, werden anerkannt.

Die Defizitanalyse identifiziert mehrere Herausforderungen bei der BIM-Implementierung, darunter das Fehlen eines universellen Datenformats, inkompatible Softwarelösungen, hohe Anforderungen an Pilotprojekte und deren ressourcenintensive Umsetzungen und Schwierigkeiten bei der Harmonisierung von fachübergreifenden Basisdaten. Darüber hinaus fehlen klare Spezifikationen, Harmonisierung von Anforderungen und Anpassungen an die Gesetzgebung.

Der Artikel schließt mit der Feststellung, dass weitere Softwareentwicklungen, einheitliche Datenaustauschformate und Standardisierungen im Datenmanagement entscheidend sind, um BIM im Tunnelbau voranzubringen. Ein Wandel in Kultur und Philosophie, kollaborative Planung und Fokus auf Projektoptimierung werden als notwendige Schritte für eine erfolgreiche BIM-Implementierung hervorgehoben. Der Artikel hebt die Notwendigkeit weiterer Forschung, realer Anwendungen in Projekten und der Entwicklung digitaler Tools hervor, um das Potenzial von BIM im Tunnelbau zu realisieren.

DOI: 10.1002/geot.202100065

Hans Exenberger, Ines Maria Massimo-Kaiser, Matthias Flora

TOPICS

Current developments of digital ground modelling in tunnelling

This article analyses and discusses the current state of the art in the development of digital ground models in tunnelling. Following a review and discussion of the literature research combined with interview responses, a deficit analysis was performed. It shows why current projects mainly work with models and software that function as isolated solutions. A lack of software developments and limited collaborative work mean that the effects of current findings cannot immediately be implemented in models. Accordingly, the enormous potential of full coaction can only be imagined. A further problem is the lack of loss-free data exchange across varying project phases and participants. Science is already moving in the right direction with the goal of harmonising the basic systematics. Finally, requirements for a digital ground model are formulated, and in combination with collaborative working and improved communication, these result in a large number of advanced possible applications.

Aktuelle Entwicklung der digitalen Baugrundmodellierung im Tunnelbau

In diesem Beitrag wird der aktuelle Stand der Technik der Entwicklung des digitalen Baugrundmodells im Tunnelbau analysiert und erörtert. Nach der Zusammenschau und Diskussion von Literatuturauswertung und Interviewantworten wurde eine Defizitanalyse durchgeführt. Sie zeigt auf, warum derzeitige Projekte vorwiegend mit Modellen und Softwareanwendungen arbeiten, welche als Insellösungen funktionieren. Fehlende Softwareentwicklungen und eingeschränkte kollaborative Bearbeitungen führen dazu, dass die Auswirkungen aktueller Erkenntnisse in den derzeit zur Anwendung kommenden Modellen oft nicht unmittelbar eingearbeitet werden. Dementsprechend können die enormen Potenziale der Zusammenwirkung derzeit nur erahnt werden. Ein weiterer Schwachpunkt ist die fehlende Möglichkeit eines verlustfreien Datenaustausches über Projektphasen und Projektbeteiligte hinweg. Mit dem Ziel einer Harmonisierung der grundlegenden Systematik geht die Wissenschaft bereits in die richtige Richtung. Abschließend werden Anforderungen für ein digitales Baugrundmodell formuliert, die in Kombination mit einer kollaborativen Bearbeitung und verbesserten Kommunikation eine Vielzahl an erweiterten Anwendungsmöglichkeiten ergeben.

Keywords Tunnel Information Modelling (TIM); Building Information Modelling (BIM); tunnelling; digitisation; digital ground model

Stichworte Tunnel Information Modelling (TIM); Building Information Modeling (BIM); Tunnelbau; Digitalisierung; digitales Baugrundmodell

1 Introduction

With the advancing introduction of Building Information Modelling (BIM) in tunnelling and infrastructure construction, the topic is currently experiencing a rapid development. On the one hand, this promotes development and adoption and on the other hand this makes it difficult to keep a comprehensive overview of all initiatives, new developments and proven methods. The start of the new research field Tunnel Information Modelling (TIM) at the University of Innsbruck provides the opportunity to prepare a thorough analysis of the current state of the art in the DACH region (Germany, Austria and Switzerland).

The aim of this publication is to generate a representative overview of the current application of TIM in science and industry in 2021. In addition to the survey of the current status of scientific publications by an obligatory literature review, 20 expert interviews were conducted for this publication to generate empirical data from the industry. For this practice-oriented approach, a large number of responses from the interviews with employers, contractors,

design offices, and service providers were evaluated at the level of both BIM management and BIM users to provide a representative state of the art for TIM in 2021. The focus of the work lies on the current developments and problems of digital ground modelling and its interactions with the structure and site model, which together form the infrastructure information model (iiM) [1].

2 Methods

The first step was to conduct a literature review according to the snowball sampling method and thereby aim for an independent review of the basics. For the purpose of keeping up with current and fast-moving developments and research, only literature published since 2016 was considered. Fundamental core statements were worked out from the relevant publications in the DACH region.

On this basis, six essential, general questions were developed for the semi-structured expert interviews. The questions dealt with the perception of TIM, current advantag-

H. Exenberger, I. M. Massimo-Kaiser, M. Flora: Aktuelle Entwicklung der digitalen Baugrundmodellierung im Tunnelbau

es and disadvantages, required changes and the current implementation of TIM as well as used software. The comparison and discussion of literature and interviews enabled the deficit analysis of the current implementation of BIM in tunnelling, as well as the formulation of requirements for a digital ground model.

3 Research results

3.1 Literature review

Based on the described methods, the literature review has shown that publications in the field of digital ground modelling and BIM in tunnelling are still scarce. The relevant publications show that the basic BIM development is strongly influenced by structural engineering.

Fundamental for successful implementation of BIM is “a thoroughly conceived and generically developed project structure, which is decisive for all applications.” [2] For such a uniform data structure, the integration of established standards, but also “special characteristics of tunnelling like time-dependant costs, geological risk, imprecision due to geology etc.” is also required. [3] On the one hand, this task is already performed by the Industry Foundation Classes (IFC, buildingSMART) exchange format in the field of mapping geological reports. [4] On the other hand, IFC is viewed very critically in other areas, such as a described BIM use case of payment of tunnel excavation classes. Such a “standardised procedure for data exchange in the documentation process [...] for the payment of construction works” is currently missing for tunnelling. [5]

It is considered crucial, especially on the part of the design offices, to clearly define the requirements for BIM by the employer [2, 6, 7]. However, on part of the employer, “the construction industry is thus expected to define uniform standards” [3].

A much-discussed topic in current publications is uniform data structures for integral use including required properties. For open BIM, there is an approach to divide the data into three groups: geometry, semantics, and topology. [8] From experience, it is also described that each company creates its own property lists to be able to work according to its modelling goals. [5] One reason for this is the lack of specifications for data structures, which encourages isolated solutions. [7]

In any case, it takes a lot of effort to structure the data right from the start. [3] However, project execution with BIM at an early stage is always advantageous, also to avoid falling back into existing patterns of work. [2] In addition to the “hope of significantly easier and more factual communication” [9], visualisations for a wide range of needs (e.g., public relations) as positive side effects of 3D modelling are also added values of BIM implementation. [2]

The lack of a uniform software solution is considered an obstacle to application. Since the rapid software development for infrastructure construction [4] is not yet as advanced as expected in the literature in 2016/17, a wide variety of software applications must still be linked to generate practical solutions. [2, 5, 8]

3.2 Qualitative interviews

A basic, underlying core statement from the analysis of the interviews is that everyone has a different understanding of the requirements and possibilities of BIM. All interviewees were aware that BIM goes beyond the bare 3D model and must also contain semantic data. Based on these varying perceptions, there are also very different definitions and requirements for the people involved. For successful collaboration, it is therefore necessary to align the maps to reduce interdisciplinary translation problems. The resulting more structured communication makes it possible to pick up all project participants at the same point.

The application of the BIM method results in a

- concentrated availability of information at an earlier stage of the project. This allows for faster and more effective work and leads to the early detection of initial conflicts and problems with interfaces. This not only increases the understanding of the building, but also makes each basis for decision-making comprehensible for those involved in the project, especially under the aspect of different project members for each project phase. [10]
- single source of truth (SSOT) with one model, including model-based data retrievability and increased planning quality and above all improved communication.

At the project level, a standardised, uniform, open-data format that can be integrated into existing data structures is still missing for the complete implementation of BIM. Similarly, there is currently no software solution for the entire tunnelling sector. Due to the small number of users in the infrastructure sector, it is primarily small software manufacturers who produce specialised isolated solutions. The situation is aggravated by the fact that there are currently only few trained personnel for the application of these products and there is also a certain technological generation conflict in existing work structures. Therefore, the use of BIM is currently still very demanding on the resources (e.g. software, hardware, and necessary training). These additional expenses are usually only insufficiently compensated and form a major obstacle in the implementation of BIM.

On the employer's side, there is a need for harmonisation and concretisation of the TIM requirements over the entire life cycle. Stakeholders can only provide their appropriate services with clear profiles of requirement. In infrastructure construction, these requirements must also consider the operating phase, as this takes up to 80–95% of

H. Exenberger, I. M. Massimo-Kaiser, M. Flora: Current developments of digital ground modelling in tunnelling

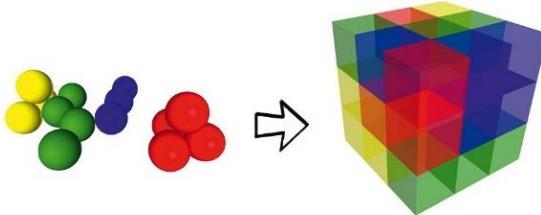


Fig. 1 Visual depiction of the desired transition from isolated tangent applications towards an overall solution.

the lifetime. Therefore, it is essential to involve the operators right from the start of the project.

In the medium to long term, in addition to current legislation, which is in part diametrical to the BIM method, regulator processes must also be adapted. Furthermore, the currently valid BIM standards must be expanded to include the special requirements of tunnelling.

In summary, a change in culture and philosophy is expected with the introduction of BIM to take a step toward joint construction and away from the pure processing of a contract. Otherwise, the status of current applications will be maintained, in which BIM is only used in sub-areas and only punctual interfaces exist between them. The goal has to be, as shown in Fig. 1, to achieve a transition from touching spheres to fully integrated units.

4 Conclusion

4.1 Deficit analysis

After reviewing the literature and evaluating the expert interviews, the following picture emerged in summer 2021 with regard to existing deficits concerning BIM in infrastructure construction:

- In general, there is no common perception of BIM, and expectations and requirements regarding the result differ.

Current software products:

- Do not offer fully compatible solutions, which makes the effective application of BIM more difficult.
- Are often in-house developments to meet the demands of the employer as well as the high demands of the users. There is a lack of a standardised data exchange format for the interaction of these isolated solutions, which among other things would also have to provide the hydro-geological and geotechnical parameters. IFC does not yet offer universal applicability in this context.
- Are often designed for structural engineering and have not yet been extended to meet the needs of tunnel and infrastructure construction.



Fig. 2 Overview of the current software landscape for BIM in tunnelling according to the interviews without claiming completeness

H. Exenberger, I. M. Massimo-Kaiser, M. Flora: Aktuelle Entwicklung der digitalen Baugrundmodellierung im Tunnelbau

From the interviews, an excerpt overview of currently used software products is shown in Figure 2.

For the implementation of BIM projects,

- the requirements for ongoing pilot projects are currently too high.
- there is a lack of references in the construction phase. As a result, the specifications and work proposals focus very much on the design phase.
- the existing (cross-trade) inventory data are partly incompatible and difficult to harmonise.
- additional costs resulting from the adapted working method and necessary in-house developments are usually not covered by the current service items, as they cannot be sold on the market in a cost-covering way due to the currently still unclear market and price situation.
- there is still a lack of understanding to increase the budget at the beginning of a project to build and maintain project structures from the beginning to reduce the total costs in the later course of the project.

Furthermore, there is a lack of

- clear, harmonised specifications from public contractors on data and project structures, as well as standardised Employer Information Requirements (EIR) including use cases.
- specifications on the responsibilities for data storage over the entire life cycle and how the data is to be archived.
- operator requirements from the very beginning of the project to be able to align the models for operations (e.g. maintenance, service, controls etc.).

- adjustments to the legislation and the authority processes so that BIM models are recognised by the authorities and to establish the possibility of cross-project phase working, to shorten the project duration, among other things.
- predefined principles and structures for generating project templates which can be used in a structured, cost-effective and semi-automated way.
- further development of project and industry philosophies toward collaborative planning and construction and corresponding financial compensation for the provided services.
- risk minimising and fair liability regulations regarding the intellectual property of individual project participants.

In addition, there are

- not enough trained personnel and, in some cases, across generations, there is a different understanding of BIM and, above all, its added value and potential.
- reservations regarding collaborative working on BIM projects, as this currently also reveals one's own knowledge advantage.

4.2 Requirements for a digital ground model

Only in recent years, the particular topic of BIM in tunnelling has received increased attention. Ideally, a digital ground model for tunnelling makes it easier to process and prepare the expert opinions, but it cannot replace these. The model reflects the results and interpretations of the specialist planner. The underlying data, as well as their interpretation in the form of reports and statements,

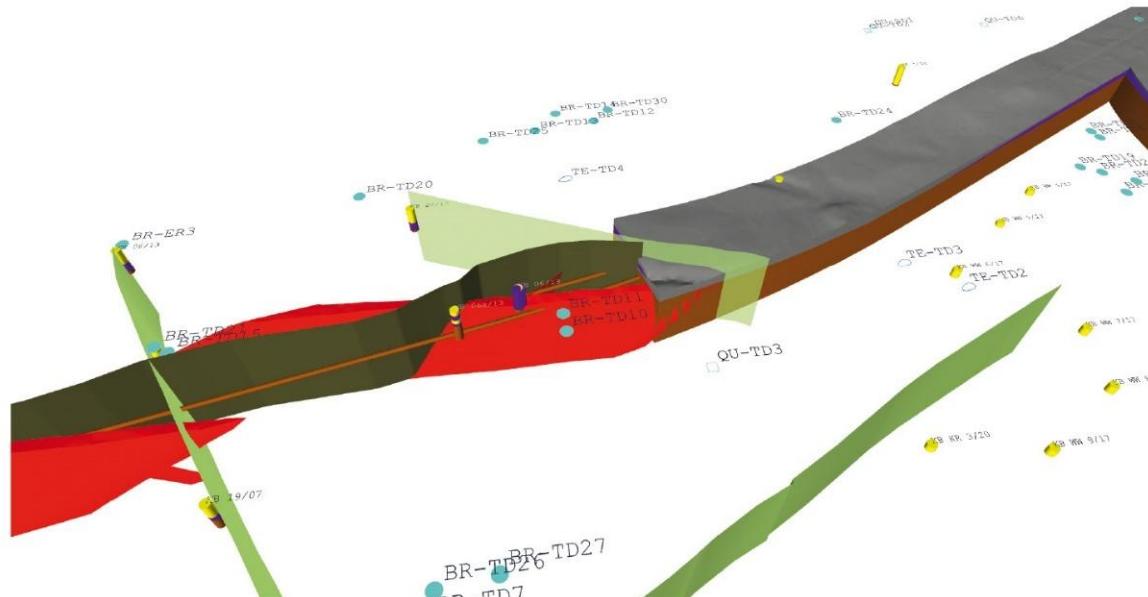


Fig. 3 Section of the ground corridor model of the ÖBB pilot project Köstendorf-Salzburg showing geophysical and drilling exploration measures (Source: 3G Gruppe Geotechnik Graz/ÖBB).

H. Exenberger, I. M. Massimo-Kaiser, M. Flora: Current developments of digital ground modelling in tunnelling

must therefore be linked to the model. This creates transparency for the deduction of the expert opinions and verifiability for the authorities on the one hand and on the other hand an easy viewability of the overall model, despite the high data density.

The creation of a ground model usually starts with a high level of detail (LOD) [4] (e.g., drill core logging in the cm range) and undergoes a generalisation and summary of properties in the further course of the project in accordance with the Austrian Society for Geomechanics (ÖGG) guidelines. A high data density in the model and especially uncommented raw data must be avoided.

The quality of a ground model depends on the exploration density and the geologists and geotechnical engineers working on it. It is also essential to assign the ground model to a specific project phase and a Level of Information Need (LoIN).

Fig. 3 shows a section of a ground model with ground examinations and the predicted geological units and fault zones. Despite the geometrically explicit representation, the model does not reduce the geological forecast uncertainty.

The desired medium-term continuation of the ground model over the entire life cycle is currently almost impossible due to the lack of a data exchange format that is fully comprehensive. This is why, for example, a demand-related remodelling for the documentation of construction must be carried out.

Different concepts show similar results for the mapping of ground-specific properties. In the literature, the Tunelpixelconcept [11] as well as a strongly abstracted segment model [9] are described and already implemented in pilot projects.

In the design phases, the interaction between the ground and the structure is obvious, as the structure model is based on the geological prognosis. Until now, the geologist had to break down his spatial understanding and evaluation of the geological situation to 2D to create a basis for planning. BIM now provides the tools to set the spatial position of the structure in discussion with the ground right from the beginning.

References

- [1] Flora, M.; Fröch, G.; Gächter, W. (2020) *Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle in Bautechnik*, 97, 11, pp. 780–788. <https://doi.org/10.1002/bate.201900095>.
- [2] Fentzloff, W. (2021) *BIM und Lean im Doppelpack – Logistikuntersuchung eines langen Tunnels mit Methoden von BIM und Lean* in Geomechanics and Tunnelling, 14, 3, pp. 286–297. <https://doi.org/10.1002/geot.202100012>.
- [3] Cudrigh-Maislinger, S. (2020) *Karawankentunnel Nord, Konzept und Ausführung eines BIM-Pilotprojekts in Geomechanics und Tunnelling*, 13, 2, pp. 178–190. <https://doi.org/10.1002/geot.201900072>.
- [4] Weichenberger, F. P.; Schwaiger, C.; Höfer-Öllinger, G. (2020) *Von der geologischen Aufnahme zur BIM-Repräsentation* in Geomechanics and Tunnelling, 13, 2, pp. 199–211. <https://doi.org/10.1002/geot.201900076>.
- [5] Wenighofer, R. (2020) *BIM-Anwendungsfall (AwF) Abrechnung-Vortrieb am Beispiel des Zentrums am Berg* in Geomechanics and Tunnelling, 13, 2, pp. 237–248. <https://doi.org/10.1002/geot.201900079>

H. Exenberger, I. M. Massimo-Kaiser, M. Flora: Aktuelle Entwicklung der digitalen Baugrundmodellierung im Tunnelbau

- [6] Frodl, S.; Mayer, P.-M. (2018) *BIM-Modellierung im konventionellen Tunnelbau – Diskussion und Empfehlung für die zu berücksichtigende Bauwerksgeometrie in 3D-Modellen* in Geomechanik und Tunnelbau, 11, 4, pp. 357–365. <https://doi.org/10.1002/geot.201800020>.
- [7] Weil, J. (2020) *Digitale Baugrundmodelle im Tunnelbau – Status, Chancen und Risiken* in Geomechanics and Tunnelling, 13, 2, pp. 221–236. <https://doi.org/10.1002/geot.201900078>
- [8] Exinger, C. et al. (2018) *BIM-Pilotprojekt Tunnelkette Granitztal – Entwicklung von Datenstrukturen für den Tunnelrohbau und Oberbau* in Geomechanik und Tunnelbau 11, 4, pp. 348–356. <https://doi.org/10.1002/geot.201800022>.
- [9] Stefan Franz (2020) *BIM-Pilotprojekt an der östlichen Tunnelkette A 44 in Hessen* in Taschenbuch für den Tunnelbau 2021, pp. 243–260.
- [10] §25; §26; §78 Bundesgesetz über die Vergabe von Aufträgen (Bundesvergabegesetz 2018 – BVergG 2018), BGBl. I Nr. 65/2018.
- [11] Exenberger, H. (2020) *Entwicklung eines digitalen parametergestützten Baugrundmodells – Konzeptentwicklung und Anwendungsbeispiel* in Universität Innsbruck [Master's thesis]. <https://digilib.uibk.ac.at/ulbtirolhs/content/titleinfo/5490959>.

Authors



Dipl.-Ing. Hans Exenberger B.Sc.
(corresponding author)
hans.exenberger@uibk.ac.at
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iBT)
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck
Austria



Mag. Ines Maria Massimo-Kaiser
ines.massimo@uibk.ac.at
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iBT)
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck
Austria



Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Matthias Flora
matthias.flora@uibk.ac.at
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iBT)
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck
Austria

How to Cite this Paper

Exenberger, H.; Massimo-Kaiser, I. M.; Flora, M. (2022) *Current developments of digital ground modelling in tunnelling*. Geomechanics and Tunnelling 15, No. 3, pp. 284–289.
<https://doi.org/10.1002/geot.202100065>

This paper has been peer reviewed. Submitted: 16. September 2021; accepted: 30. January 2022.

3.2 Artikel 2

Model-based representation of geological prognosis (un)reliability for shallow tunnels.

[Modellbasierte Darstellung der Prognose(un)sicherheit bei seicht liegenden Tunneln.]

Massimo-Kaiser, I.; Salzgeber, H.; Flora, M. (2023)

Geomechanics and Tunnelling 16, H. 6, S. 661–667. <https://doi.org/10.1002/geot.202300033>

Scopus CiteScore (2023): 1,2

Verantwortlichkeiten in der Bearbeitung (individueller Beitrag):

Konzeptualisierung, Methodik, Datenerhebung, Verfassen des ursprünglichen Entwurfs:

- Ines Massimo-Kaiser

Verfassen, Überprüfung und Redaktion:

- Ines Massimo-Kaiser, Hannah Salzgeber, Matthias Flora

Alle Autoren haben sich an der Durchsicht und Bearbeitung dieses Beitrags beteiligt.

Inhalt:

In diesem Artikel erfolgt die Vorstellung eines Modellkonzeptes, welches die Darstellung der geologische Prognosesicherheit in einem digitalen Baugrundmodell ermöglicht. Mit dem Einsatz von Tunnel Information Modeling im Infrastrukturbau ist im Rahmen der trassenbezogenen Planungstätigkeit auch die Bewertung der geologischen Prognosesicherheit als Basisinformation für die geotechnische Planung im Baugrundmodell auszuweisen. Speziell in der Planung und Ausführung von seichten Tunneln, ist dies ein wesentlicher Faktor um eine kosteneffiziente Planung bzw. die richtige Wahl der notwendigen Baumaßnahmen zu ermöglichen. Als Teil des digitalen tunnelbautechnischen Rahmenplans soll die modellbasierte Darstellung der Prognosesicherheit in der Planung u.a. als Indikator für Detailerkundungen und in der Ausführung als Basisinformation für das laufende Risikomanagement, bzw. die vorauseilende Prognose und allfällige Anpassungen des Bauablaufes dienen.

Aus der Zusammenschau vorhandener geologischer und hydrogeologischer Grundlagen entsteht ein parametrisiertes dreidimensionales trassennahes Baugrundmodell, welches neben geologisch-geotechnischen Eigenschaften um die Informationen zur Prognosesicherheit angereichert wird. Dieses bildet die Grundlage für die laufende Bewertung der geologischen Prognosesicherheit.

Über die farbliche Ausweisung (heatmapping) beliebiger Modellattribute kann somit eine graphische Darstellung der Prognosesicherheit entlang der Trasse erfolgen. Sowohl das trassennahe Baugrundmodell, als auch das Bauwerksmodell können damit im Sinne von Bewertungsbändern graphisch ergänzt werden. Mit einer Defizitanalyse des Erkundungsstands erfolgt eine Einstufung der Prognosesicherheit je nach Projektanforderung (z.B. hoch, mittel, gering).

Es entsteht modellbasiert die Basis um POIN's (**Point's of Information Need**) zu identifizieren und zu bewerten. Ebenso resultiert die Beurteilungsgrundlage für weitere Erkundungen oder zur Anpassung der geotechnischen Planung und Risikobewertung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die TIM-Methode einen Informationsgewinn sowie eine strukturierte Datenweitergabe und -nutzung ermöglicht. Die einheitliche Unterteilung des Modells erleichtert die automatische Verwendung der Daten für Planungstätigkeiten. Die kontinuierliche Neubewertung der Prognosesicherheit ermöglicht eine optimierte Planung und effiziente Durchführung von Erkundungsarbeiten bis zur Kostenverfolgung. Die Anwendung der TIM-Methode verbessert somit die Qualität der Zusammenarbeit und die Planungssicherheit erheblich.

DOI: 10.1002/geot.202300033

Ines Massimo-Kaiser, Hannah Salzgeber, Matthias Flora

TOPICS

Model based representation of geological prognosis (un)reliability for shallow tunnels

Modellbasierte Darstellung der Prognose(un)sicherheit bei seicht liegenden Tunneln

This article describes how the prognosis reliability in a tunnel information model can be updated during the geological design phases. Using Tunnel Information Modelling (TIM), the distribution of prognosis-reliability-classes along the structure can be graphically represented in the model by attribute-based colour coding. In the design and construction of shallow tunnels, this factor enables cost-effective design and appropriate selection of the necessary construction measures. Starting with the baseline survey, a dynamic, parameterised 3D geological model is generated from the summary of geological survey results. Updating the model with further exploration results allows for a continuous, model-based reassessment of the reliability of the geological prognosis. This provides the basis for further exploration, geotechnical design and risk assessment. Visualisation of the prognosis risk in the model supports project communication and transparent decision-making during project execution. Centralised data storage allows information on the model to be retrieved and validated (single source of truth), enabling collaborative and efficient project management.

Keywords TIM; Tunnel Information Modelling; digitalization; digital ground model; geological prognosis reliability

1 Introduction

Valid information about the ground and the ground risk is essential for the design and construction of tunnels. Near-surface ground conditions are often difficult to predict due to small-scale variations in geological conditions and topographical uncertainties. This makes the design of shallow tunnels particularly complex and challenging. Comprehensive geological investigations provide a more detailed understanding of the ground, enabling ground models to be generated that are as realistic as possible. In this context, the expert assessment of the reliability of geological prognosis advocated by the Austrian Society for Geomechanics in their guideline (ÖGG) [1] is an important decision-making tool not only for geological design and ground investigations, but for general construction design and risk assessment as well. The classified prognosis reliability reflects the "state of

Dieser Artikel beschreibt, wie die Aktualisierung der Prognosesicherheit während der geologischen Planungsphasen in einem Tunnel-Informationsmodell dargestellt werden kann. Mittels Tunnel Information Modelling (TIM) kann eine grafische Darstellung der Verteilung der Prognosesicherheitsklassen entlang des Bauwerks im Modell über die farbliche Ausweitung dieses Attributs erfolgen. Bei der Planung und Ausführung von seicht liegenden Tunneln ist dies ein Faktor, der eine kosteneffiziente Planung sowie die geeignete Wahl der notwendigen Baumaßnahmen ermöglicht. Aus der Zusammenschau geologischer Untersuchungsergebnisse wird ab der Grundlagenerhebung ein dynamisches, parametrisiertes 3D-Geologiemedell generiert. Die Fortschreibung des Modells mit Erkundungsergebnissen ermöglicht eine kontinuierliche, modellbasierte Neubewertung der geologischen Prognosesicherheit. Diese bildet die Beurteilungsgrundlage für weitere Erkundungen, die geotechnische Planung und Risikobewertung. Die Visualisierung des Prognoserisikos im Modell unterstützt die Projektkommunikation und die transparente Entscheidungsfundung in der Projektabwicklung. Durch die zentrale Datenhaltung sind die verfügbaren Informationen über das Modell auffindbar und validierbar (single source of truth), wodurch eine kollaborative und effiziente Projektabwicklung ermöglicht wird.

Stichworte TIM; Tunnel Information Modelling; Digitalisierung; digitales Baugrundmodell; geologische Prognosesicherheit

1 Einleitung

Für die Planung und Herstellung von Tunnelbauwerken ist eine valide Aussage zum Baugrund sowie des Baugrundrisikos unerlässlich. Aufgrund kleinräumig wechselnder geologischer Bedingungen sowie topographischer Unschärfen sind seicht liegende Baugrundverhältnisse oft schwierig vorherzusagen. Deshalb ist die Planung solcher seicht liegender Tunnelbauwerke besonders erschwert und herausfordernd. Umfassende geologische Erkundungen dienen dazu, den Erkenntnisgewinn zum Baugrund zu erhöhen, um ein möglichst realitätsnahe Baugrundmodell zu erstellen. In diesem Kontext nimmt die fachliche Bewertung der geologischen Prognosesicherheit, wie sie gemäß der Richtlinie der Öster-

I. Massimo-Kaiser, H. Salzgeber, M. Flora: Model-based representation of geological prognosis (un)reliability for shallow tunnels

knowledge" in the construction area and allows for targeted measures and investigations to be designed on an ongoing basis to obtain the necessary and desired understanding of the ground conditions.

This article describes the concept of a model-based representation of geological prognosis reliability and its integration into the tunnel information model. It explains how the TIM method can be used to supplement the geological design and survey process. The aim is to create a simplified, transparent and interdisciplinary project environment in which project participants can evaluate and verify the results of geological investigations despite different data origins.

2 General aspects

Geological investigations that aim to determine and increase geological prognosis reliability are conducted in four key stages:

- Baseline survey
- Exploration planning
- Exploration phase
- Interpretation.

The baseline survey (geological groundwork) involves inspecting and validating existing data, geological mapping and evaluating natural outcrops. The results of this survey inform project-specific exploration planning [2], which includes mapping artificial exposures (including position and depth of boreholes, trenches and exploratory tunnels) and defining a geotechnical test programme. Seismic investigations can increase and significantly improve knowledge of the ground, especially in the case of shallow tunnels. The exploration phase generates a comprehensive body of data and knowledge about the ground. Exploration data are compiled, processed and validated on a project-specific basis in accordance with the ÖGG guideline [1] and applicable standards. This supports the prognosis of geological conditions and the interpretation of the ground and ground risk as well as providing the underlying information for construction design and tendering.

3 Problem and objective

Despite existing guidelines and standards, the data structure, data formats and documentation methods used to record, evaluate and interpret geological investigations tend to be mostly project-specific. It can be hard to make sense of the different document versions and revisions and a great deal of effort is needed to prepare them for further editing, especially in an interdisciplinary context. The often considerable volume of data can only be understood and evaluated with great difficulty, if at all. Documents must be repeatedly retrieved, harmonised and evaluated, often leading to significant delays in decision-making.

reichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) [1] ein gefordert wird, eine zentrale Rolle ein, da sie eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für die geologische Planung, Baugrunderkundung aber auch allgemeine Bauwerkspflege und Risikobewertung ist. Die klassifizierte Prognosesicherheit spiegelt den „Stand des Wissens“ im Bauwerksbereich wider und ermöglicht fortlaufend eine gezielte Maßnahmen- und Erkundungsplanung, um den notwendigen und gewünschten Informationsstand zum Baugrund zu erreichen.

In diesem Artikel wird das Konzept und die Umsetzung einer modellbasierten Darstellung der geologischen Prognosesicherheit im Tunnel-Informationsmodell vorgestellt. Es wird erläutert, wie die geologische Planung mithilfe der TIM-Methode ergänzt werden kann. Das Ziel lautet, eine vereinfachte, transparente und interdisziplinäre Projektbearbeitung zu realisieren, um die Evaluierbarkeit und Prüfbarkeit geologischer Untersuchungsergebnisse für Projektbeteiligte trotz unterschiedlicher Datenherkunft zu ermöglichen.

2 Allgemeine Aspekte

Geologische Untersuchungen und Ausarbeitungen zur Bestimmung und Erhöhung der geologischen Prognosesicherheit erfolgen in vier wesentlichen Phasen:

- Grundlagenerhebung,
- Erkundungsplanung,
- Erkundungsphase,
- Interpretation.

Die Grundlagenerhebung (geologische Basisarbeit) besteht aus Sichtung und Validierung von Bestandsdaten, geologischer Kartierung und Auswertung natürlicher Aufschlüsse. Die darauf basierende projektspezifische Erkundungsplanung [2] umfasst die Konzipierung künstlicher Aufschlüsse (u.a. Position und Tiefe von Bohrungen, Schürfen oder auch Erkundungsstollen), sowie die Festlegung eines geotechnischen Versuchsprogramms. Speziell für seicht liegende Tunnel können seismische Untersuchungen das Wissen zum Baugrund ergänzen und wesentlich verbessern. Die Erkundungsphase generiert einen umfassenden Daten- und Wissensstand zum Baugrund. Die Zusammenschau, Aufbereitung und Validierung der gewonnenen Erkundungsdaten erfolgt projektspezifisch gemäß ÖGG-Richtlinie [1] und geltenden Normen. Dies ermöglicht eine geologische Prognose und Interpretation des Baugrunds sowie des Baugrundrisikos, und bildet die Informationsbasis zur Bauwerkspflege und Leistungsausschreibung.

3 Problemstellung und Zielsetzung

Die Erfassung, Auswertung und Interpretation geologischer Untersuchungen gestaltet sich trotz vorhandener Richtlinien und Normen meist individuell in Bezug auf Datenstruktur, Dateiformate und Dokumentationsmethoden. Entstehende Dokumente in ihren unterschiedlichen Versionen und

I. Massimo-Kaiser, H. Salzgeber, M. Flora: Modellbasierte Darstellung der Prognose(un)sicherheit bei seicht liegenden Tunneln

The aim of implementing the TIM method into the geological design phase is to optimise the data acquisition process and the sharing and use of data within the project and to gain insights for future projects. Based on the maxim “gE-gD-gI” (good exploration – good documentation – good interpretation) [3], ground information relating to the planned tunnel construction should be compiled, visualised and prepared in the geological 3D model [2]. Exploration results should be continuously integrated into a standardised, collective, interdisciplinary data environment – while exploration work is still underway. This improves the sharing of information in real time and ensures that data are always up-to-date. Furthermore, the results of exploration measures already carried out can be evaluated at any time. This increases prognosis reliability and enables the exploration programme to be adjusted accordingly. While the method focuses on data availability and data management, the ability to present the results to third parties in the form of a 3D model confers significant added value.

4 Dynamic modelling to illustrate geological prognosis reliability

The German Tunnelling Committee (DAUB) [4] has developed specific requirements for ground models. These underpin the exploration phases presented here and include three key additional aspects:

- Standardised subdivisions (automation potential),
- Model-based communication,
- Classification of prognosis reliability.

Reliability classes defined for the geological investigations to indicate geological prognosis reliability within the construction area (1 – high; 2 – medium; 3 – low) are modelled using traffic light colour coding (1 – green; 2 – orange; 3 – red). The geotechnical synthesis model defined by the DAUB recommendation [5] is divided into small, standardised sections along the route (e.g. by the metre) [3]. The aim of these subdivisions is to aggregate data with similar properties, thereby enabling a greater degree of automation in generating the geometric model and integrating and validating information. This makes for more efficient data provision and processing and reduces information losses. Furthermore, project information is communicated to project participants via the model and a common data environment (CDE). Decisions taken within the project are documented in chronological order via the CDE and are thus traceable. This simplifies the classification of prognosis reliability and ensures transparency.

The enhanced model was digitally developed and validated on the basis of exploration and design data from the 2nd tube of the Perjen Tunnel provided by ASFINAG (the Austrian federal agency responsible for constructing and operating motorways and expressways). The use of colour coding to indicate the current prognosis reliability in the model from the start of the project enables the geological design process to be continuously optimised. Model-based coopera-

Revisionen sind oftmals unübersichtlich und nur mit hohem Aufwand für weitere Bearbeitungen, speziell spartenübergreifend, aufzubereiten. Die Nachvollziehbarkeit und Evaluierbarkeit des oft beträchtlichen Datenvolumens ist herausfordernd, eingeschränkt oder gar nicht möglich. Entscheidungsfindungen werden dadurch oft deutlich verzögert, da Unterlagen wiederholt erhoben, harmonisiert und evaluiert werden müssen.

Die Implementierung der TIM-Methode in die geologische Planung zielt darauf ab, den Prozess der Datenerfassung, deren Weitergabe und Nutzung innerhalb eines Projekts zu optimieren sowie Erkenntnisse für künftige Projekte zu gewinnen. Dem Grundsatz „gE-gD-gI“ (gute Erkundung – gute Dokumentation – gute Interpretation) [3] folgend, sollen Baugrundinformationen im Bezug zum geplanten Tunnelbauwerk im geologischen 3D-Modell zusammengeführt, visualisiert und bereitgestellt werden [2]. Anfallende Erkundungsergebnisse sollten spartenübergreifend bereits während der Erkundungsarbeiten kontinuierlich in eine standardisierte kollektive Datenumgebung integriert werden. Dies verbessert die zeitnahe Weitergabe von Informationen, und gewährleistet die Aktualität der Daten. Weiters besteht jederzeit die Möglichkeit der Evaluierung der durchgeführten Erkundungsmaßnahmen und deren Resultate, um somit die Prognosesicherheit zu erhöhen und das Erkundungsprogramm dementsprechend zu adaptieren. Während Datenverfügbarkeit und Datenmanagement bei der Implementierung der Methode im Vordergrund stehen, bildet die grafische Aufbereitung der Daten im dreidimensionalen Raum zur Moderierung und Darstellung von Ergebnissen gegenüber Dritten einen weiteren Mehrwert ab.

4 Dynamischer Modellaufbau zur Darstellung der geologischen Prognosesicherheit

Der Deutsche Ausschuss für Unterirdisches Bauen (DAUB) [4] hat spezifische Modellanforderungen für den Baugrund entwickelt. Diese werden als Grundlage für die hier vorgestellte Bearbeitung verwendet und um drei wesentliche Aspekte erweitert:

- Einheitliche Unterteilung (Automatisierungspotenzial),
- Modellbasierte Kommunikation,
- Klassifizierung der Prognosesicherheit.

Um die geologische Prognosesicherheit in Bezug auf den Bauwerksbereich modellbasiert darzustellen, erfolgt in der geologischen Bearbeitung eine Klassifizierung (1 – hoch; 2 – mittel; 3 – gering) und mittels Ampelfarben (1 – grün; 2 – orange; 3 – rot) eine entsprechende Ausweisung im Modell. Das durch die DAUB-Empfehlung definierte Streckenabschnittsmodell (geotechnical synthesis model) [5] wird in einheitliche kleine Abschnitte (z. B. meterweise) unterteilt [3]. Mit dieser Unterteilung werden Daten aggregiert, wodurch das Potenzial für Automatisierung von Aufgaben im Zusammenhang mit der Erstellung des geometrischen Modells sowie der Integration und Prüfbarkeit von Informa-

I. Massimo-Kaiser, H. Salzgeber, M. Flora: Model-based representation of geological prognosis (un)reliability for shallow tunnels

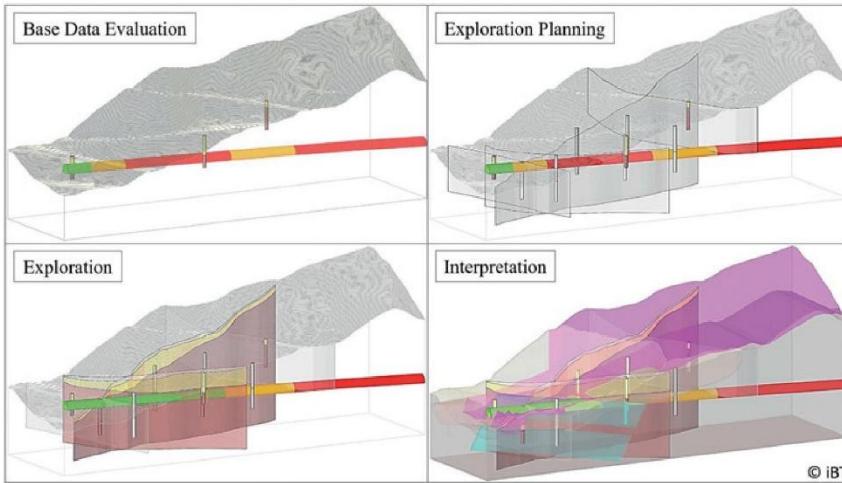


Fig. 1 Model representation on the geological planning phases and the change in prognosis reliability in a TIM model

Bild 1 Modellabbildungen der geologischen Planungsphasen und veränderter Prognosesicherheit im TIM Modell

tion between project participants on the client and contractor sides enables the dynamic model described to be generated.

Figure 1 shows the four phases of the dynamic geological design process, which is supported and updated using the TIM method:

- Baseline survey (base data evaluation): a preliminary geodocu model of the geological conditions [3, 4] can be semiautomatically generated from the evaluation and digital processing of existing geological data (maps, existing documentation, drill logs) and geological surveys of natural outcrops. On the basis of this survey, an initial assessment of prognosis reliability can be made and graphically illustrated using the geotechnical synthesis model.
- Exploration planning: after the initial classification of prognosis reliability, model-based exploration planning is undertaken to refine the geological prognosis (gE). Planned exploration measures (boreholes, trenches, seismic measurements) are represented in the model to clarify project-specific geotechnical, construction- and ground-related issues and thus increase prognosis reliability.
- Exploration: the direct or real-time mapping of ongoing exploration results (gD) in the 3D model (positioning of exploration points, geological findings, depths, tests) generates a continuously updated and thus dynamic information flow. This enables the reliability of the geological prognosis to be continuously reassessed and updated, supported by the 3D visualisation. It also provides reasonable justification for optimising (reducing or expanding) the exploration programme. On completion of the exploration phase, a factual model is generated which summarises the main findings in relation to the geological and geotechnical features (GeoDocu model[4]).
- Interpretation: all relevant information about the geology is integrated into the model for the interpretation. The

tionen erhöht wird. Dies steigert die effiziente Datenbereitstellung und deren Verarbeitung. Informationsverluste werden reduziert. Darüber hinaus erfolgt die Projekt-kommunikation der Projektbeteiligten über das Modell und eine gemeinsam genutzte Datenumgebung (Common Data Environment – CDE). Gefällte Entscheidungen im Projekt werden über die CDE in chronologischer Reihenfolge dokumentiert und nachvollziehbar gemacht. Somit wird die Klassifizierung der Prognosesicherheit erleichtert und transparent gestaltet.

Der erweiterte Modellaufbau wurde anhand von Erkundungs- und Planungsdaten der Asfinag aus dem Projekt Neubau Perjentunnel 2. Röhre digital entwickelt und validiert. Über die farbliche Ausweisung der jeweils aktuellen Prognosesicherheit im Modell von Projektbeginn an, kann der laufende geologische Planungsprozess projektspezifisch optimiert werden. Die modellbasierte Zusammenarbeit der Projektbeteiligten aus den Sphären Auftraggeber und Auftragnehmer ermöglicht den beschriebenen dynamischen Modellaufbau.

Bild 1 visualisiert die vier Phasen des dynamischen geologischen Planungsprozesses, der mittels TIM-Methode begleitet und aktualisiert wird:

- Grundlagenerhebung (Base Data Evaluation): Aus der Auswertung und digitaler Aufbereitung vorhandener geologischer Grundlagen (Kartenwerke, Bestandsdokumentationen, Bohrprofile) und den geologischen Aufnahmen natürlicher Aufschlüsse, ergibt sich ein erstes semiautomatisch erstellbares Bestandsmodell [3, 4] zu den geologischen Gegebenheiten. Anhand dieses kann bereits die Ersteinschätzung der Prognosesicherheit erfolgen und mittels Streckenabschnittmodells (geotechnical synthesis model) grafisch ausgewiesen werden.
- Erkundungsplanung (Exploration Planning): Modellbasiert erfolgt nach der ersten Klassifizierung der Prognosesicherheit die Erkundungsplanung, um die geolo-

I. Massimo-Kaiser, H. Salzgeber, M. Flora: Modellbasierte Darstellung der Prognose(un)sicherheit bei seicht liegenden Tunneln

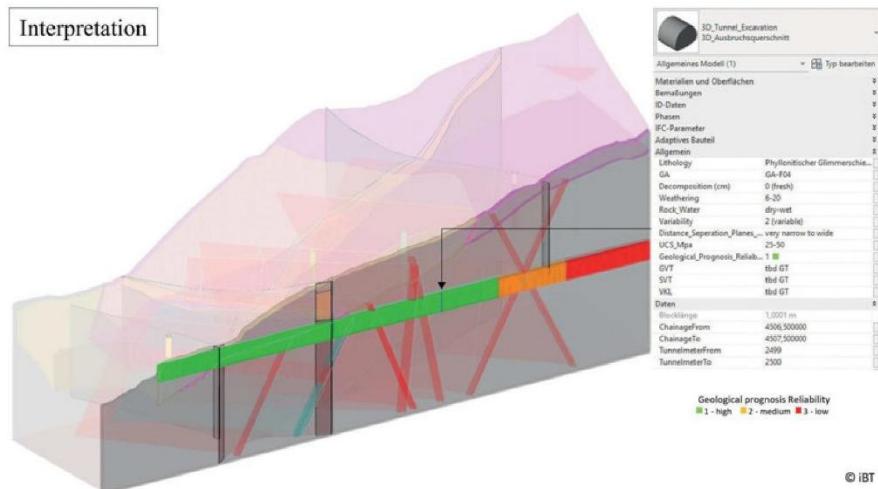


Fig. 2 Model representation of the interpretation with colour coding of the classified forecast reliability along the structure
Bild 2 Modelldarstellung der Interpretation mit farblicher Ausweisung der klassifizierten Prognosesicherheit entlang des Bauwerks

model-based interpretation (gI) of the exploration results and its representation is the prerequisite for the prognosis of expected ground conditions – indicating the classified geological prognosis reliability and resulting ground risk – based on current knowledge.

Figure 2 shows a summary of the interpreted geological ground model overlaid with the geotechnical synthesis model indicating the colour-coded geological prognosis reliability. The model can be used to optimise the design of further exploration measures before and during the construction phase. Different construction measures (pipe screen drillings, sheet pilings, piles) can be included in the model as additional explorations. Depending on the project phase, the model can be progressively updated with further exploration results, enabling prognosis reliability to be continually reassessed. The colour coding of prognosis reliability classes in the model clearly indicates where uncertainties in the geological prognosis lie within the construction area. This in turn has a bearing on risk and cost planning.

5 Results

The modelling shows that integrating the TIM method into the geological design phases provides additional information and enables the structured transfer and use of data. Semiautomated, graphic formatting helps to make geological research data transparent and understandable. With its standardised subdivision and standardised data, the geotechnical synthesis model can be used in (semi-)automated workflows for the planning activities of other project participants. The continuous reassessment of prognosis reliability and consequently of the ground risk thus enables optimised project planning and efficient execution, from exploration work to cost control.

These results emphasise that use of the TIM method not only makes the provision of information more efficient; it

gesche Prognose zu schärfen (gE). Geplante Erkundungsmaßnahmen (Bohrungen, Schürfe, seismische Messungen) werden im Modell dargestellt, um projektspezifische Fragestellungen zu Bauwerk, Baugrund und Geotechnik abzuklären und somit die Prognosesicherheit zu erhöhen.

- Erkundung (Exploration): Über die direkte oder zeitnahe Erfassung laufender Erkundungsergebnisse (gD) im 3D-Modell (Verortung der Erkundungspunkte, geologische Erkenntnisse, Teufen, Versuche), wird ein stets aktueller und somit dynamischer Informationsstand generiert. Dies ermöglicht, unterstützt von der räumlichen Darstellung, eine unmittelbare Neubewertung und Aktualisierung der Prognosesicherheit. Eine Optimierung (Reduktion oder Erweiterung) des Erkundungsprogramms kann nachvollziehbar begründet werden. Mit Abschluss der Erkundungsphase erfolgen die Zusammenschau und Darstellung maßgeblicher Erkundungsergebnisse zu den geologischen und geotechnischen Gegebenheiten (GeoDoku Modell [4]).
- Interpretation (Interpretation): Für die Interpretation werden alle relevanten Informationen zur Geologie im Modell integriert. Die modellbasierte Interpretation (gI) der Erkundungsergebnisse und deren Darstellung ergibt gemäß dem vorhandenen Kenntnisstand die Baugrundprognose, die sowohl die Ausweisung der klassifizierten geologischen Prognosesicherheit als auch daraus folgend das Baugrundrisiko enthält.

Bild 2 zeigt die Zusammenschau des interpretierten geologischen Baugrundmodells mit dem Streckenabschnittmodell und der ausgewiesenen geologischen Prognosesicherheit. Auf dieser Basis erfolgt modellbasiert die optimierte Planung weiterer Erkundungsmaßnahmen vor und während der Bauausführung. Verschiedene Baumaßnahmen (Rohrschirmbohrungen, Spundwände, Pfähle) können als weitere Erkundungen im Modell erfasst werden. Je nach Projektphase fließen somit fortlaufend Erkundungsergebnisse für die Neubewertung der Prognosesicherheit ein. Die grafische

I. Massimo-Kaiser, H. Salzgeber, M. Flora: Model-based representation of geological prognosis (un)reliability for shallow tunnels

also significantly improves the quality of cooperation and resulting planning certainty. The model-based representation of geological prognosis reliability marks an important step towards reliable, collaborative and efficient project implementation.

The enormous potential of a tunnel information model can only be fully realised if Building Information Modelling in infrastructure and tunnel construction is not simply regarded as a necessary evil prescribed by law; instead, project participants must be made aware of the added value and the collaborative, model-based approach must not run parallel to the traditional planning process, but replace it.

Ausweisung der Klassen zur Prognosesicherheit zeigt im Modell klar auf, in welchen Bauwerksbereichen welche Unsicherheit bzw. Unschärfe der geologischen Prognose vorliegt. Dies ist wiederum für die Risiko- und Kostenplanung von Bedeutung.

5 Ergebnis

Mit der durchgeführten Modellierung zeigt sich, dass die Implementierung der TIM-Methode in die geologischen Planungsphasen einen Informationsgewinn, sowie eine strukturierte Datenweitergabe und deren Nutzung ermöglicht. Eine semi-automatisierte grafische Aufbereitung erleichtert die Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit geologischer Untersuchungsdaten. Die einheitliche Unterteilung des Streckenabschnittsmodells, das standardisierte Daten beinhaltet, ermöglicht deren (semi-) automatische Verwendung für Planungstätigkeiten weiterer Projektbeteiligter. Die fortlaufende Neubewertung der Prognosesicherheit und in weiterer Folge des Baugrundrisikos ermöglicht somit eine optimierte Planung, sowie eine effiziente Durchführung von Erkundungsarbeiten bis hin zur Kostenverfolgung.

Diese Ergebnisse unterstreichen, dass die Anwendung der TIM-Methode nicht nur die Effizienz in der Informationsbereitstellung steigert, sondern auch die Qualität der Zusammenarbeit und die daraus entstehende Planungssicherheit erheblich verbessert. Mit der modellbasierten Darstellung der geologischen Prognosesicherheit gelingt ein essentieller Schritt auf dem Weg zur planungssicheren, kollaborativen und effizienten Projektrealisierung.

Die enormen Potenziale eines Tunnel-Informationsmodells werden erst dann voll ausgeschöpft, wenn Building Information Modelling im Infrastruktur- und Tunnelbau nicht nur als notwendiges, vom Gesetzgeber vorgeschriebenes Übel angesehen wird, vielmehr die Mehrwerte den Projektbeteiligten bewusst werden und der kollaborative modellbasierte Ansatz nicht parallel zum klassischen Planungsprozess läuft, sondern diesen ersetzt.

References

- [1] ÖGG (2021) *Richtlinie für die Geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb, Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung*. Austrian Society for Geomechanics, Salzburg.
- [2] Werner Gächter et.al. (2021) *Possible applications for a digital ground model in infrastructure construction / Anwendungsmöglichkeiten eines digitalen Baugrundmodells im Infrastrukturbau*. Geomechanics and Tunnelling 14, No. 5, pp. 510–521. <https://doi.org/10.1002/geot.202100051>
- [3] Ines Massimo-Kaiser et.al. (2023) *From prognosis Ground Model to Tender Model and Tunnel Construction Framework Plan with Tunnel Information Modelling*. Paper accepted for 15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium.
- [4] DAUB (2022): *Recommendation Digital Design, Building and Operation of Underground Structures*. German Tunnelling Committee, Cologne.
- [5] Georg Erharder et.al. (2023) *Building information modelling based ground modelling for tunnel projects – Tunnel Angath/Austria*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 135, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105039>

I. Massimo-Kaiser, H. Salzgeber, M. Flora: Modellbasierte Darstellung der Prognose(un)sicherheit bei seicht liegenden Tunneln

Authors

Mag. Ines M. Massimo-Kaiser (Corresponding author)
ines.massimo@uibk.ac.at
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iBT)
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck
Austria



Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Matthias Flora
matthias.flora@uibk.ac.at
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iBT)
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck
Austria



Dipl.-Ing. Hannah Salzgeber
hannah.salzgeber@uibk.ac.at
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iBT)
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck
Austria

How to Cite this Paper

Massimo-Kaiser,I.; Salzgeber, H.; Flora, M. (2023) *Model-based representation of geological prognosis (un)reliability for shallow tunnels*. Geomechanics and Tunnelling 16, H. 6, S. 661–667.
<https://doi.org/10.1002/geot.202300033>

This paper has been peer reviewed. Submitted: 16. June 2023; accepted: 24. September 2023.

Zitieren Sie diesen Beitrag

Massimo-Kaiser,I.; Salzgeber, H.; Flora, M. (2023) *Modellbasierte Darstellung der Prognose(un)sicherheit bei seicht liegenden Tunneln*. Geomechanik und Tunnelbau 16, H. 6, S. 661–667.
<https://doi.org/10.1002/geot.202300033>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 16. Juni 2023; angenommen: 24. September 2023.

3.3 Artikel 3

LOIN für Elemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells

Massimo-Kaiser, I.; Fröch, G.; Salzgeber, H.; Flora, M. (2024)

Bautechnik. <https://doi.org/10.1002/bate.202400052>

Web of Science – Journal Impact Faktor (2023): 0,5; Scopus CiteScore (2023): 1,3

Verantwortlichkeiten in der Bearbeitung (individueller Beitrag):

Konzeptualisierung, Methodik, Datenerhebung, Verfassen des ursprünglichen Entwurfs:

- Ines Massimo-Kaiser

Verfassen, Überprüfung und Redaktion:

- Ines Massimo-Kaiser, Georg Fröch, Hannah Salzgeber, Matthias Flora

Alle Autoren haben sich an der Durchsicht und Bearbeitung dieses Beitrags beteiligt.

Inhalt:

Der Artikel behandelt die Definition und Anwendung der Informationsbedarfstiefe (Level of Information Need) für Elemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells. Ziel ist es, eine Systematik zu entwickeln, die den Level of Information Need (LOIN) für Baugrundelemente präzise definiert. Dabei werden Normen wie die ÖNORM EN 17412-1 und spezifische Richtlinien der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) herangezogen, um den Informationsbedarf in verschiedenen Projektphasen (Planung, Bau, Betrieb) klar zu strukturieren und zu standardisieren.

Der LOIN beschreibt den erforderlichen Umfang an geometrischen, alphanumerischen und dokumentarischen Informationen, die für ein Bauprojekt benötigt werden. Diese Definition ermöglicht eine effiziente und konsistente Planung sowie eine verbesserte Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen den Projektbeteiligten.

Die geologische Planung, die in mehreren Phasen erfolgt, ist eine wesentliche Grundlage für Tunnelbauprojekte. Um diese modellbasiert durchzuführen wird der LOIN für spezifische Baugrundelemente, wie beispielsweise Bohrungen, detailliert beschrieben. Dadurch wird sichergestellt, dass die relevanten Daten präzise und vollständig erfasst und für die geotechnische Planung genutzt werden können.

Abschließend wird betont, dass die frühzeitige Einbindung der geotechnischen Planung und eine klare Definition des LOIN eine effiziente Ressourcenplanung und eine umfassende Informationsweitergabe ermöglichen. Zukünftig sollen weitere geologisch-geotechnische Themenbereiche untersucht und Modell-Bausteine für spezifische Anwendungsfälle entwickelt werden.

LOIN für Elemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells

Die ÖNORM EN 17412-1 definiert die Informationsbedarfstiefe bzw. den Level of Information Need (LOIN) durch klare Vorgaben zu Anforderungen und Verantwortlichkeiten, die Einbindung von geometrischen und alphanumerischen Informationen sowie Dokumentationsvorgaben. Für geologisch-geotechnische Baugrundmodelle wurde der LOIN mit dem Ziel einer Definition für Baugrundelemente noch nicht näher beschrieben. Bisherige Arbeiten fokussierten sich auf die geometrische Umsetzung von Baugrundmodellen, hier erfolgt nun die erweiterte Beschreibung des LOIN um alphanumerische Informationen. Es wird erläutert, wie geologische Informationen der vier Planungsphasen Grundlagenerhebung, Erkundungsplanung, Erkundung und Interpretation strukturiert und vollständig in digitale Modelle zu implementieren sind, um eine verlustfreie Übergabe an die geotechnische Planung zu gewährleisten. Eine projektbezogene Definition des LOIN für spezifische Baugrundelemente, sowie beispielhaft für das Element Bohrung, ermöglicht eine präzise und strukturierte Bereitstellung von Daten, vermeidet Informationsüberschuss und unterstützt fundierte Entscheidungen sowie eine effiziente Planung über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. Betont werden die Notwendigkeit eines klar definierten LOIN sowie die frühzeitige Einbindung und Abstimmung mit den Projektbeteiligten für eine effektive geotechnische Planung und die fortlaufende Modellierung geologischer Daten.

Stichworte BIM; digitales Baugrundmodell; geologisch-geotechnische Planung; LOIN; Baugrundelemente

1 Einleitung

Der Level of Information Need (LOIN) wird benötigt, um in Bauprojekten sicherzustellen, dass die richtigen Informationen zur richtigen Zeit und in der passenden Detaillierung bereitgestellt werden, damit alle Projektbeteiligten effizient arbeiten und Entscheidungen treffen können. Diese Herangehensweise bewährt sich bereits seit Jahren in BIM-Projekten und schafft sowohl auf der Seite der Auftraggeber als auch der Auftragnehmer mehr Klarheit in der Definition der zu liefernden Informationen und damit auch Leistungen. Dieser Beitrag behandelt die Informationsbedarfstiefe bzw. den Level of Information Need (LOIN) für Elemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells. Das Ziel ist die Darlegung einer Systematik, welche zur Definition des LOIN für Baugrundelemente anwendbar ist. In den wissenschaftlichen Bearbeitungen zum Thema Building Information Modeling (BIM) im Baugrund von Massimo et al. [1]

LOIN for elements of the geological-geotechnical ground model

The ÖNORM EN 17412-1 defines the Level of Information Need (LOIN) through clear specifications on requirements and responsibilities, as well as the integration of geometric and alphanumeric information and as well as documentation requirements. For geological-geotechnical ground models with the aim of defining ground elements, the LOIN has not yet been described in more detail. Previous work focused mainly on the geometric realisation of ground models, in this paper the focus of the LOIN is set on the alphanumeric information. It is explained how geological information of the four planning phases the basic survey, exploration planning, exploration and interpretation can be implemented in digital models in a structured and comprehensive way to ensure a transfer without loss of information to geotechnical planning. A project-related definition of the LOIN for selected ground elements, for example the element "borehole", enables a precise and structured provision of data, avoids information overload and supports well-founded decisions and efficient planning over the entire life cycle of a building. It emphasizes the need for a well-defined LOIN, as well as early involvement and coordination with project stakeholders for effective geotechnical planning and ongoing modelling of geological data.

Keywords BIM; digital ground model; geological-geotechnical planning; LOIN; ground elements

und Erharder et al. [2] erfolgte die Betrachtung der geometrischen Umsetzung des Baugrundmodells. Die Beschreibung des LOIN in Umfang und Struktur basierend auf Daten aus der geologischen Planung wurde bisher jedoch in keinem wissenschaftlichen Rahmen bearbeitet. Mit Juni 2023 listet die ÖIAV [3] den Anwendungsfall 02: BIM Baugrundfassung als möglichen Anwendungsfall auf, dieser ist für die Fragestellungen der tunnelbau-technischen Planung in der vorliegenden Beschreibung nicht ausreichend. Im Rahmen dieses Beitrags erfolgt daher eine Bestimmung des LOIN zur *Bereitstellung von geologisch-geotechnischen Informationen für die geotechnische Planung*. Im Zuge der Erarbeitung erfolgt die Betrachtung der Informationsstruktur in digitalen Modellen mit Bezug auf die BIM-ÖNORM EN 17412-1:2021-06-01 [4]. Die geltende ÖGG-Richtlinie Geotechnische Planung von Untertagebauten Zyklischer und Kontinuierlicher Vortrieb und die ihr zugehörigen Normen [5] mit ihren geologisch-geotechnischen Aspekten dienen als Basis

I. M. Massimo-Kaiser, G. Fröch, H. Salzgeber, M. Flora: LOIN für Elemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells

zur Festlegung der Informationsinhalte. Basierend auf dieser Aufgabenstellung können z. B. ein Anwendungsfall für Geotechnik (AwF_GT) *Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für Tunnelplanung* sowie ein Anwendungsfall für Geologische Dokumentation (AwF_GD) *Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für Ausführungsdocumentation* bedient werden. Die Betrachtungen in diesem Aufsatz erfolgen unter dem Aspekt des angeführten AwF_GT. Es werden einzelne Baugrundelemente vorgestellt, für das Element Bohrung erfolgt beispielhaft eine detaillierte Betrachtung des LOIN.

2 Grundlagen/Allgemeine Aspekte

Das Überführen eines klassischen geologischen Planungsablaufs in ein BIM-Modell sowie die digitale Aufbereitung geologischer Daten mit der BIM-Methode erweisen sich als herausfordernd. Das Folgen und Harmonisieren der normativen Vorgaben der Fachbereiche Geologie und Geotechnik [5], der BIM-Methode [4, 6] und des Eurocode 7 [7] ermöglicht jedoch die Definition der Informationsbedarfstiefe = LOIN, um die geologische Planung über ein digitales Modell darzustellen. Die ÖNORM EN 17412-1 [4] befasst sich mit dem Konzept des LOIN. Der LOIN beschreibt die erforderliche Menge und den Detaillierungsgrad an Informationen, die in verschiedenen Phasen eines Bauprojekts benötigt werden. Hierfür ist einer vorgegebenen Struktur zu folgen (Bild 1), welche für jeden Fachbereich gleichermaßen gültig ist.

Der Vorteil der normativen Vorgabe zur Definition des LOIN nach [4] besteht darin, dass sie einen standardisierten und konsistenten Ansatz für das erforderliche Informationsniveau über verschiedene Projektphasen und Anwendungsfälle bietet. Dadurch erleichtert sich die Kommunikation, verringern sich Inkonsistenzen und erhöht sich die Effizienz und Eindeutigkeit des Informationsaustauschs zwischen Projektbeteiligten. Die Erstellung automatisiert prüfbarer und vergleichbarer digitaler Modelle wird erleichtert, wodurch Entscheidungsprozesse und die Gesamtergebnisse der Projekte verbessert werden können. Somit wird eine Grundlage zur automatisierten Prüfung aller strukturierten (geometrischen und alphanumerischen Informationen) sowie unstrukturierten Informationen (Dokumente) gemäß ÖNORM EN ISO 19650-1:2018 [6] geschaffen. Aus der Bauwerksart kann sich ein unterschiedlicher Informationsanspruch zur Geometrie, Alphanumerik und Dokumentation ergeben. So werden für die Bauwerke Brücke und Tunnel zum Teil unterschiedliche geologisch-geotechnische Informationen benötigt. Ein erstes Ziel ist nun, die Vorgaben für Untertagebauten der ÖGG-Richtlinie [5] gemäß der LOIN-Definition [4] in einem 3D-Baugrundmodell zu implementieren.

2.1 Erläuterung der allgemeinen Bedingungen und Voraussetzungen

Zentrales Element der ÖNORM EN 17412-1 sind eine für alle Projektbeteiligten verständliche Definition sowie eine nutzbare Strukturierung von Informationsanforderungen. Zur Beschreibung des LOIN (Bild 1) sind folgende Voraussetzungen wesentlich:

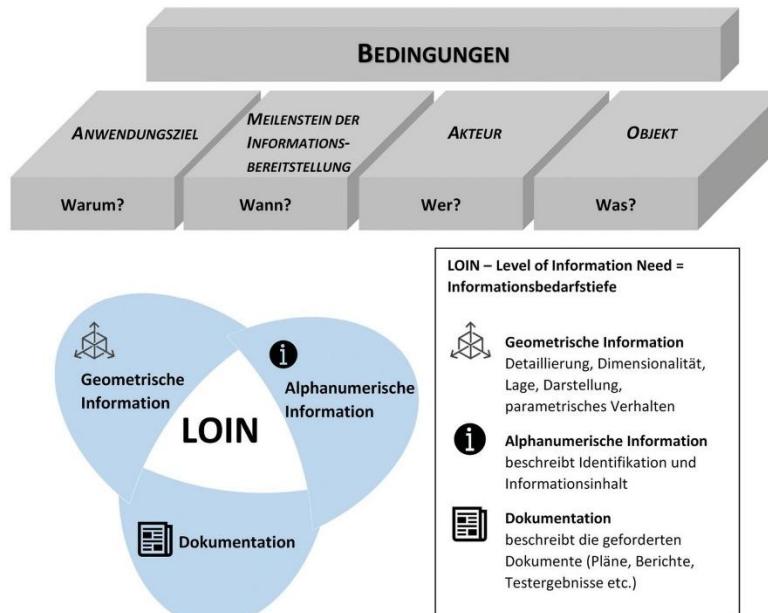


Bild 1 Darstellung der Relationen für die Informationsbedarfstiefe gemäß [4]
Representation of the relations for the information requirement depth acc. to [4]

I. M. Massimo-Kaiser, G. Fröch, H. Salzgeber, M. Flora: LOIN for elements of the geological-geotechnical ground model

Anwendungsziel: Der Zweck und die Ziele der Informationsanforderungen werden klar definiert. Dies stellt sicher, dass die bereitgestellten Informationen aus der Baugrunderkundung für die jeweilige Aufgabe relevant und nützlich sind.

Meilenstein der Informationsbereitstellung: Die spezifischen Anforderungen für jede Projektphase (Planung, Bau, Betrieb, Wartung) werden festgelegt. Der jeweils unterschiedliche Informationsbedarf der geologischen Planungsetappen muss entsprechend berücksichtigt werden (gemäß Phasenmodell).

Akteur: Die Rollen und Verantwortlichkeiten der am Projekt beteiligten Parteien werden klar definiert. Dies stellt sicher, dass den Beteiligten bekannt ist, welche geologischen Informationen für die geotechnische Planung von wem bereitzustellen sind.

Objekt: Bauelementklassen sind grundlegende Bestandteile der Semantik eines BIM-Modells und umfassen sowohl strukturelle als auch nicht strukturelle Teile eines Bauwerks bzw. des Baugrunds wie Bohrungen, geologische Strukturen oder Grundwasserstände. Jedes Bauelement kann detaillierte Informationen zu seinen geometrischen Eigenschaften, Materialeigenschaften und weitere relevante Daten enthalten, die während des gesamten Lebenszyklus des Bauwerks genutzt werden können.

Aus der Festlegung des Anwendungszwecks einer (allgemeinen) Informationsanforderung kann in weiterer Folge definiert werden, welche Anwendungsfälle damit bedient werden können. Die Definition eines Anwendungsfalls ist somit nicht zwingend die Grundlage zur Festlegung des LOIN, kann aber jedenfalls daraus resultieren.

2.2 Definition der Informationsbedarfstiefe bzw. Level of Information Need (LOIN)

Die Beschreibung des generellen LOIN erfolgt gemäß [4] über drei Komponenten, welche die notwendigen Informationen eindeutig und zweckmäßig für verschiedene Phasen eines Bauprojekts bestimmen (Bild 1).

Die *geometrischen Informationen* umfassen die Beschreibungen zu Darstellung, Dimensionalität, Detaillierungsgrad, Lage und parametrischem Verhalten in einem digitalen Modell. Parametrisches Verhalten beschreibt, ob Form, Position und Ausrichtung eines Objekts so gestaltet sind, dass sie abhängig von anderen Informationen bleiben, die dem Objekt oder dem Kontext, in den das Objekt eingefügt wird, zugeordnet sind, wodurch eine vollständige oder teilweise Neukonfiguration ermöglicht wird. Diese Informationen sind entscheidend für die visuelle und räumliche Darstellung des Bauelements. So werden Bohrungen zur Baugrunderkundung u.a. über ihre Koordinaten und ihre Ausmaße wie Durchmesser und Bohrtiefe eindeutig beschrieben.

Die *alphanumerischen Informationen* umfassen Informationen, die zur Beschreibung der Eigenschaften von Bauelementen erforderlich sind. Dazu gehören z.B. geologische Strukturen und geotechnische Eigenschaften sowie Materialeigenschaften. Diese in alphanumerischer oder numerischer Form verfügbaren Daten ergänzen die geometrischen Informationen.

Die *Dokumentation* umfasst Schriftstücke und Nachweise, die zur Ergänzung der anderen Informationsarten dienen. Sie umfasst u.a. Pläne, Berichte, Bohrprofile und Versuchsergebnisse. Über den LOIN werden Umfang und Spezifität (u.a. Datenformat) der Dokumentation für jede Projektphase definiert. Dies trägt zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Projektverlaufs bei und ermöglicht eine umfassende Dokumentation des gesamten Prozesses – von der Planung über die Ausführung bis zu Betrieb und Wartung des Bauwerks.

Durch die Definition des erforderlichen Umfangs und des Detaillierungsgrads der geometrischen und alphanumerischen Information sowie die notwendigen Dokumente für jede Projektphase stellt der LOIN sicher, dass die Daten präzise und vollständig bereitgestellt werden, um den jeweiligen Anforderungen und Anwendungsfällen gerecht zu werden, ohne dabei überflüssige Informationen zu liefern. Somit werden fundierte Entscheidungen ermöglicht, Unsicherheiten und Missverständnisse reduziert und eine effiziente Planung, Ausführung und Erhaltung eines Bauwerks über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg erleichtert.

2.3 Ablauf der geologischen Planung

Als Basis zur Planung von Tunnelbauwerken dienen Erkenntnisse aus der geologischen Planung, Erkundung und Erhebung. Daher ist eine qualitativ hochwertige geologische Planung und Erkundung für solide Prognosen und Entscheidungsfindungen sowie als Basis für die geotechnische Planung unumgänglich. Dazu sind erhobene Daten und gewonnene Erkenntnisse in nachvollziehbarer und evaluierbarer Form zu dokumentieren, zu bewerten und darzustellen. Die geologische Planung erfolgt auf Basis vorhandener Normen und Richtlinien [5] sowie mit Bezug auf Eurocode 7 [7] in den vier Phasen: (1) Grundlagenerhebung – umfasst (1a) die Erhebung von Bestandsdaten aus Bohrungen und geologischen Karten und (1b) die Evaluierung und Erhebungen durch geologische Neuaufnahme der Geländedaten, (2) Erkundungsplanung auf Basis der ersten Prognose der Geologie, (3) Erkundung mit weiterer Erhebung geologischer Daten und (4) Interpretation und Bereitstellung der geologischen Daten und Prognose für die weitere geotechnische Planung auf Basis der Phasen 1–3 (Bild 2).

Die geotechnischen Eigenschaften des Untergrunds beeinflussen die Bauwerksplanung und -ausführung (Trassenwahl, Vortriebsmethode, Machbarkeit, Schutzmaßnahmen etc.) maßgeblich. Eine qualitativ hochwertige

I. M. Massimo-Kaiser, G. Fröch, H. Salzgeber, M. Flora: LOIN für Elemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells

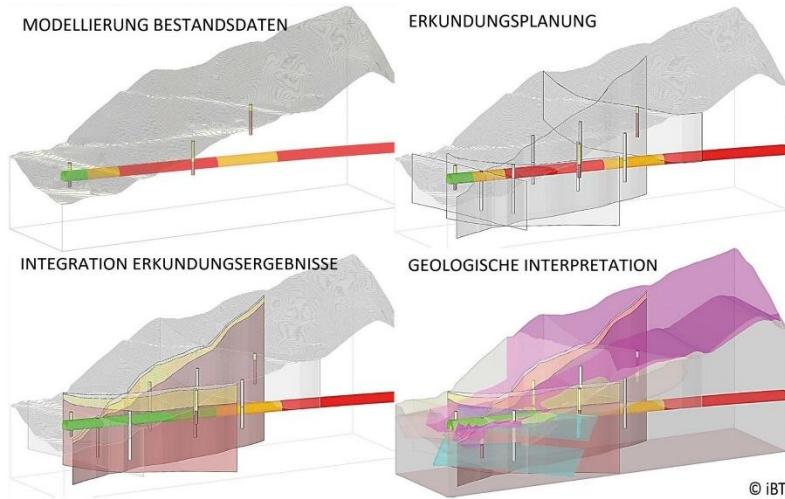


Bild 2 Modelldarstellung der Phasen der geologischen Planung [1]
Model representation of the phases of geological planning [1]

geologisch-geotechnische Planung stellt die Grundlage jedes Tunnelbauprojekts dar. Mit dem Blick in die Praxis zeigt sich die Entwicklung der Datendichte sowie der Anzahl der zur Verfügung stehenden Datensätze projektphasenübergreifend wie in Bild 3 dargestellt.

Aufgrund der umfangreichen Datenmengen (blaue durchgehende Linie) stellt sich die Frage, welche erhobenen geologisch-geotechnischen Daten in welcher Detailierung vom geologischen Fachpersonal in ein Baugrundmodell integriert werden müssen, um auch der geotechnischen Planung die projektspezifisch notwendigen Grundlagendaten friktionsfrei, eindeutig und vollständig zur

Verfügung zu stellen. In der Praxis ist die Vergleichbarkeit neuer Informationen mit Altdaten im herkömmlichen Projektverlauf (blau strichlierte Linie) aufgrund von schlechter Strukturierung, Informationsverlusten bei Datenübergaben an neue Beteiligte, unterschiedlicher Dokumentenstandards oder Generalisierung der Untersuchungsergebnisse gemäß ÖGG-Richtlinie [5] ohne nachvollziehbare Dokumentation nicht gegeben. Das wiederholte Evaluieren von nicht aufbereiteten und unstrukturierten Grundlagendaten führt zumindest zur Doppelung von Arbeit. Für die Ausführungsarbeiten, während derer eine immense Menge neuer Daten gesammelt wird (grüne Kurve), kann es wiederum maßgeblich

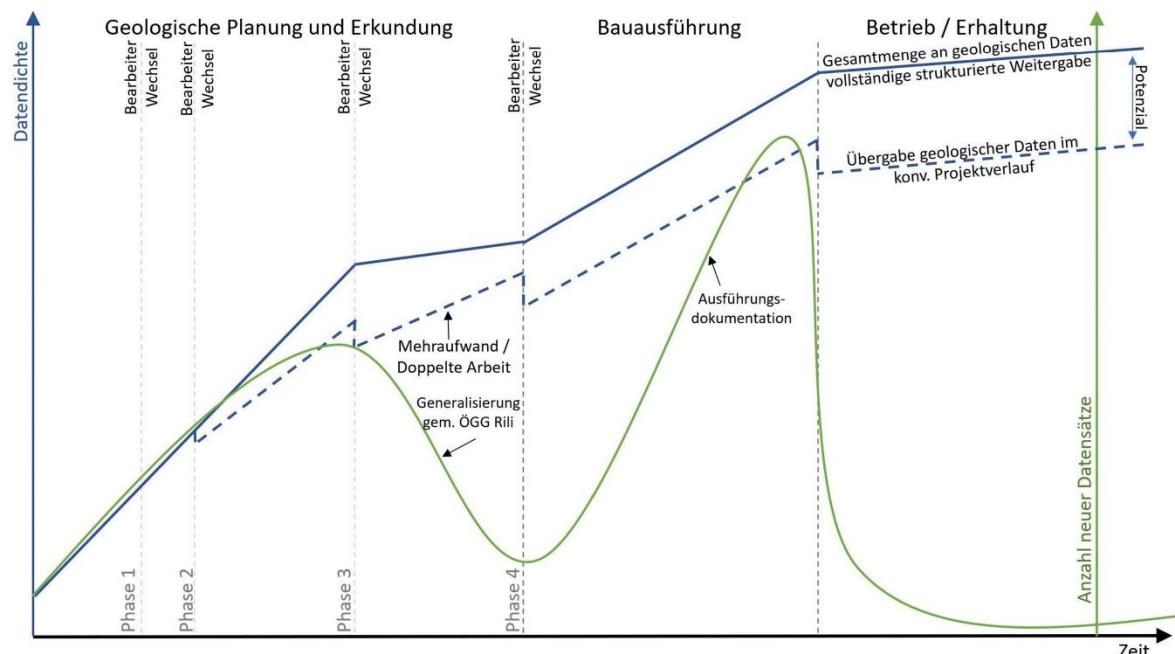


Bild 3 Darstellung der geologischen Informationsmengen und Datensätze im Projektverlauf
Presentation of the geological information volumes and data sets in the course of the project

I. M. Massimo-Kaiser, G. Fröch, H. Salzgeber, M. Flora: LOIN for elements of the geological-geotechnical ground model

sein, vollständige geologische Grundlagendaten zur Verfügung zu haben, um eine Neubewertung der geologischen Gegebenheiten durchführen zu können. Unbestritten ist, dass die Qualität der geologischen Interpretationen und Prognosen zu jedem Zeitpunkt von den zugrunde liegenden Daten und deren fachlicher Beurteilung abhängt. Um einen Informationsverlust zu verhindern, ermöglicht das Bereitstellen geologischer Erkenntnisse und Informationen in digitaler strukturierter Form effektive Datenübergaben. Mit der Festlegung des LOIN können diese Strukturen und deren Anforderungen gezielt aufgebaut und erfüllt werden.

3 LOIN für Baugrundelemente

Als Teil der laufenden Forschungsarbeiten zum modellbasierten geologisch-geotechnischen Baugrundmodell [1] erfolgt im Rahmen der Dissertation der Hauptautorin eine mögliche Beschreibung des LOIN für ein konkretes Anwendungsziel und ausgewählte Baugrundelemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells gemäß ÖNORM EN 17412-1. Dabei entsteht eine Datenbasis, welche eine Evaluierung und automatisierte Prüfung der geologischen Planung und des Baugrundmodells in den Planungsphasen sowie in der Ausführungsphase ermöglicht. Im Zuge der Forschungsarbeit wurden hierfür zu definierende Voraussetzungen gemäß der Beschreibung des LOIN wie folgt festgelegt:

- *Warum*: Bereitstellung geologisch-geotechnischer Daten und Eigenschaften für geotechnische Planung
- *Wann*: Projektphasen der geologischen Planung
- *Wer*: geologische Planung (projektspezifisch in Abstimmung mit geotechnischer Planung)
- *Was*: Baugrundelemente wie Geländeauschluss/Tiefenaufschluss (Bohrung, Schurf)/Seismik/schematischer Ausbruchskörper

Die Informationsanforderung an die projektspezifische geologische Planung folgt fachlichen normativen Vorgaben wie dem Eurocode 7 [7] bzw. dem jeweiligen Erkundungsziel [5]. Herausfordernd ist die Strukturierung dieser umfassenden Daten gemäß Projektanforderung und Bauwerksart in einem Baugrundmodell. Über die Definition eines Anwendungsfalls können Umfang und Art der Information spezifiziert werden. Gelingt es, die Effizienz der Datenbereitstellung über die Definition des Informationsbedarfs zu gewährleisten, wird ein Datenüberschuss vermieden. Um geologisch-geotechnische Daten strukturiert zu erfassen und somit erhobene Grundlagen für weitere Anwendungsfälle nutzbar zu machen, folgt die Bestimmung des Umfangs geometrischer und alphanumerischer Informationen sowie der Dokumentationen für die Phasen der geologischen Planung.

Die in den Bildern 4, 5 angeführten Eigenschaften bilden einen Auszug einer Gesamtliste geologisch-geotechnischer alphanumerischer Informationen ab, welche Baugrundelementen für die jeweiligen Planungsphasen

(Bild 2) zugewiesen werden können. Zusätzlich zu den alphanumerischen Informationen müssen geometrische Informationen sowie relevante Dokumente berücksichtigt werden, um die gewünschte Informationstiefe (LOIN) zu erreichen. Bild 4 zeigt ausgewählte Beispiele für Elemente des Baugrundmodells in verschiedenen Projektphasen.

Anhand dieser Elemente wird die Notwendigkeit eines einheitlichen Bezeichnungssystems unterstrichen, denn auf Basis der Informationen des Geländeauschlusses und der Bodengeophysik leiten sich die Inhalte der Eigenschaften für den schematischen Ausbruchskörper, auch als Tuxel bezeichnet [8], ab. Über dieses Baugrundelement können in weiterer Folge in einem adaptiven Modell geologisch-geotechnische Informationen dem Bauwerk zugeordnet und beliebig farblich ausgewiesen und ausgewertet werden.

4 LOIN für das Baugrundelement Bohrung

Für den Tiefenaufschluss Bohrung erfolgt die detaillierte Beschreibung des LOIN für das Anwendungsziel *Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für geotechnische Planung*. Der zugehörige Akteur der Informationsbereitstellung ist das *geologische Fachpersonal*.

4.1 Festlegung der geologisch-geotechnischen Informationsbedarfstiefe

Der LOIN definiert, welche Daten zu welchem Zeitpunkt in welcher Form im digitalen Modell bereitgestellt werden müssen. In den verschiedenen Phasen der geologischen Erkundung (Abschnitt 2.3) werden unterschiedlichste Informationen zu den festgelegten Eigenschaften erhoben. Somit wird nachfolgend auch die Modellevolution über die geologischen Planungsphasen hinweg für ein Element verdeutlicht. Auf Basis der vorhandenen geometrischen und alphanumerischen Informationen der Bestandsdaten, deren Dokumentation und Evaluierung (Phasen 1a, 1b) im Baugrundmodell kann einebauwerksbezogene Erkundungsplanung (Phase 2) erfolgen und im Detail im Modell dargestellt werden.

In den Phasen 1a, 1b der geologischen Planung werden erste Daten mit Bezug auf ein geplantes Bauwerk erhoben. Maßgeblich hierbei sind die geometrischen Informationen, auf deren Basis sich eine erste Prognose zur Baugrundsituation ergibt. Da Bestandsdaten zu Tiefenaufschläßen meist unterschiedlichste Informationstiefen und Strukturierungen aufweisen, ist eine schematische Darstellung der vorhandenen geologischen Informationen in einem ersten Modellstadium ausreichend. Nach erfolgter Evaluierung kann eine Anpassung der geometrischen und alphanumerischen Informationen erfolgen. Auf Basis dieser Informationen erfolgt die Erkundungsplanung (Phase 2), um modellbasiert festgestellte Informationsdefizite aufzufüllen und eine Kostenschätzung der Erkundungsmaßnahmen zu erleichtern. In der Er-

I. M. Massimo-Kaiser, G. Fröch, H. Salzgeber, M. Flora: LOIN für Elemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells

Anwendungsziel: Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für geotechnische Planung	Objekt: Geländeaufschluss	Objekt: Tiefenaufschluss, Bohrung	Objekt: Bodengeophysik, Seismik	Objekt: Schematischer Ausbruchskörper	
Meilenstein Phase	Phase 1b: Grundlagenerhebung, Geländeaufnahme, Evaluierung	Phase 3: Erkundung	Phase 3: Erkundung	Phase 4: Interpretation für Geotechnik	
Akteur: geologisches Fachpersonal					
Geometrische Information	Detaillierung	schematisch	detailliert	detailliert/realistisch vereinfacht auf Gebirgsarten (GA) reduziert	
	Dimensionalität	3D	3D	2D oder 3D 3D	
	Lage	absolut, Koordinaten	absolut, Koordinaten Geländeoberkante und Endteufe	absolut, Koordinaten Eindringtiefe absolut: Koordinaten relativ: Tunnelachse	
	Darstellung	Kugel mit Streich – und Fallzeichen	Zylinder, realistisch	Linien, Flächen Zylinder	
	parametrisches Verhalten	ja	ja	ja ja	
Alphanumerische Information	Identifikation	AufschlussTyp, Aufschluss_Identifikation	AufschlussTyp Bohrungs_ID	AufschlussTyp Seismikprofil_ID Bauwerk Station (km oder Tunnelmeter)	
	Informations- gehalt	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinaten • geologische Beschreibung • Orientierung der geologischen Strukturen (Einfallen und Streichen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinaten Geländeoberkante und Endteufe • Durchmesser • Ausbau • Nutzung • Schichtaufbau • geologische Beschreibung • Wasserstand absolut • Teufe bzw. Koordinaten von Kernproben und Versuchen in situ und Labor 	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinaten • Profillänge • Schichtaufbau • Orientierung zum Bauwerk • Referenzaufschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinaten • Durchmesser • Ausbruchsfäche • Gebirgsart • geologische Beschreibung • Vortriebsart • Überlagerung • Wasserzutritt • Prognosesicherheit
		weitere Eigenschaften gem. Phase 1b bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 3 bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 4 bzw. projektspezifischer Definition	
Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> • Geländekartierung • geologische Karte Bestand und evaluiert • Aufschluss- dokumentation • Fotodokumentation • Gesteinsproben 	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrprofil • Fotodokumentation • Bohrlochmessungen • Wasserstandsdaten • bestehende geologisch- geotechnische Berichte 	<ul style="list-style-type: none"> • Seismikprofile • Referenzaufschluss • Auswertung • Fotodokumentation 	<ul style="list-style-type: none"> • Gebirgsarten- beschreibung • geologische Berichte • Versuchsberichte • Laborergebnisse • Fotodokumentation • Bohrkernfotos 	

Bild 4 Beschreibung LOIN verschiedener Elemente
Description LOIN of various elements

kundung (Phase 3) werden auf Basis der vorgegebenen Eigenschaften weitere Daten erhoben und mit einem hohen Detaillierungsgrad laufend im Modell implementiert. In der vierten Phase (Bild 3) erfolgt auf Basis der vorhandenen und fortgeschriebenen Informationen deren Interpretation, Zusammenfassung und Generalisierung gemäß

der Anforderung der geotechnischen Planung entsprechend der ÖGG-Richtlinie.

I. M. Massimo-Kaiser, G. Fröch, H. Salzgeber, M. Flora: LOIN for elements of the geological-geotechnical ground model

Anwendungsziel:	Objekt:	Objekt:	Objekt:	Objekt:	
Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für geotechnische Planung	Tiefenaufschluss, Bohrung	Tiefenaufschluss, Bohrung	Tiefenaufschluss, Bohrung	Tiefenaufschluss, Bohrung	
Meilenstein Phase	Phase 1a+b:	Phase 2:	Phase 3:	Phase 4:	
Akteur: geologisches Fachpersonal	Grundlagenerhebung, Geländeaufnahme, Evaluierung	Erkundungsplanung auf Basis erster Prognose der Geologie	Erkundung	Interpretation für Geotechnik	
Geometrische Information	Detaillierung	vereinfacht	vereinfacht	detailliert	vereinfacht auf Gebirgsarten (GA) reduziert
	Dimensionalität	3D	3D	3D	3D
	Lage	absolut, Koordinaten	absolut, Koordinaten, Neigung/Richtung geplant	absolut, Koordinaten Geländeoberkante und Endteufe	absolut, Koordinaten Geländeoberkante und Endteufe
	Darstellung	Zylinder, schematisch	Zylinder, schematisch	Zylinder, realistisch	Zylinder
	parametrisches Verhalten	ja	ja	ja	ja
Alphanumerische Information	Identifikation	Aufschlusstyp Bohrungs_Identifikation	Aufschlusstyp Bohrungs_Identifikation	Aufschlusstyp Bohrungs_Identifikation	Aufschlusstyp Bohrungs_Identifikation
	Informationsgehalt	<ul style="list-style-type: none"> Koordinaten Geländeoberkante und Rohrüberkante Durchmesser Endteufe gem. Bohrprofil und Evaluierung Ausbau Nutzung Schichtaufbau geologische Beschreibung Wasserstand 	<ul style="list-style-type: none"> Koordinaten Geländeoberkante Neigung/Richtung und Endteufe geplant Durchmesser Bohrung und Ausbau geplant Nutzung Prognose Schichtaufbau Prognose geologische Beschreibung Prognose Wasserstand Versuche geplant in situ Versuche geplant Labor 	<ul style="list-style-type: none"> Koordinaten Geländeoberkante und Endteufe Durchmesser Ausbau Nutzung Schichtaufbau geologische Beschreibung Wasserstand absolut Teufe bzw. Koordinaten von Kernproben und Versuchen in situ und Labor 	<ul style="list-style-type: none"> Koordinaten Durchmesser Endteufe Ausbau Nutzung Schichtaufbau geologische Beschreibung geotechnische Beschreibung Wasserstand absolut Teufe bzw. Koordinaten Kernproben und Versuche in situ, Laborversuche
	weitere Eigenschaften gem. Phasen 1a+b bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 2 bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 3 bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 4 bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 4 bzw. projektspezifischer Definition
	Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> Bohrprofil bestehende geologisch-geotechnische Berichte Feldprotokoll Evaluierung Mängel Wasserstandsdaten 	<ul style="list-style-type: none"> Grundstück Eigentümer bestehende geologisch-geotechnische Berichte Einbauten 	<ul style="list-style-type: none"> Bohrprofil Fotodokumentation Bohrlochmessungen Wasserstandsdaten bestehende geologisch-geotechnische Berichte 	<ul style="list-style-type: none"> Bohrprofile Bohrberichte Wasserstandsdaten Versuchsberichte Laborergebnisse Fotodokumentation Bohrkernfotos projektspezifisch erstellte geologisch-geotechnische Berichte

Bild 5 Informationsbedarfstiefe für das Element Bohrung Phasen 1–4
Level of information need for element borehole phases 1–4

4.2 Ergebnisbetrachtung

Ein klar definierter LOIN, wie für das Baugrundelement Bohrung gezeigt, ermöglicht eine effiziente und fortgeschreibbare Modellerstellung als Datenbasis. Die Vorga-

be von Eigenschaften, die in einem Baugrundmodell ab der ersten geologischen Planungsphase implementiert und um projektspezifische Eigenschaften ergänzt werden können, ermöglicht eine stete Defizitanalyse und laufende Anpassungen zur effektiven Planung und Projektbear-

I. M. Massimo-Kaiser, G. Fröch, H. Salzgeber, M. Flora: LOIN für Elemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells

beitung. Mit dem angeführten Anwendungsziel *Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für geotechnische Planung* können die Anwendungsfälle AwF_GT: *Bereitstellen geologisch-geotechnischer Informationen für Tunnelplanung* und AwF_GD: *Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für Ausführungs dokumentation* bedient werden. Um die genannten Anwendungsfälle effektiv und projektspezifisch umzusetzen, sind eine Abstimmung mit den jeweiligen Projektbeteiligten und die frühzeitige Abfrage des notwendigen Lieferumfangs für eine zielführende Erstellung eines geologisch-geotechnischen Baugrundmodells unerlässlich.

5 Resümee und Ausblick

Durch die frühzeitige Einbindung der geotechnischen Planung in den geologischen Planungssablauf und deren konkretisierte Anforderungen ergibt sich eine zielführende Projektbearbeitung einschließlich der vollständigen

Informationsweitergabe. Die Erstellung eines Baugrundmodells folgt in der Anwendung den Prinzipien der BIM-Normen [4, 6]. Eine klare Vorgabe des LOIN ermöglicht eine effektive Ressourcenplanung, ein Baugrundmodell kann nachvollziehbar und vergleichbar erstellt und bearbeitet werden.

In der weiteren Forschung erfolgen die Betrachtung zusätzlicher geologisch-geotechnischer Themenbereiche, welche über das Anwendungsziel bedient werden können (Nacherkundung, komplexe hydrogeologische Eigenschaften, Bereitstellung für Anschluss- oder Neubauwerke), sowie die verlustfreie Implementierung von Daten aus digitalen Geologiemodellen. Ein weiteres Ziel ist die Anwendung des LOIN einzelner Baugrundelemente in einem Modellversuch und darauf basierend die Erstellung von Modellbausteinen zu den Themenbereichen geologisch-geotechnische Planung. Zusätzlich werden Handlungsempfehlungen für Auftraggeber und Anwender entwickelt.

Literatur

- [1] Massimo-Kaiser, I.; Salzgeber, H.; Flora, M. (2023) *Modellbasierte Darstellung der Prognose(un)sicherheit bei seicht liegenden Tunneln*. Geomechanik und Tunnelbau 16, H. 6, S. 661–667. <https://doi.org/10.1002/geot.202300033>
- [2] Erharder, G. et al. (2023) *Building information modelling based ground modelling for tunnel projects – Tunnel Angath/Austria*. Tunnelling and Underground Space Technology 135. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105039>
- [3] ÖIAV, Arbeitsgruppe öffentliche Auftraggeber Digitalisierung und BIM (2023) *BIM-Anwendungsfälle öffentlicher Auftraggeber*. Schrift 02/Version 1.0.
- [4] ÖNORM EN 17412-1:2021-06-01 (2021) *Building Information Modelling – Informationsbedarfstiefe – Konzepte und Definitionen*. Wien: Austrian Standards. Ausgabe Juni 2021.
- [5] ÖGG (2023) *Richtlinie Geotechnische Planung von Untertagebauten Zyklicher und Kontinuierlicher Vortrieb*. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Salzburg.
- [6] ÖNORM EN ISO 19650-1:2019-04-15 (2019) *Organisation von Daten zu Bauwerken – Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Konzepte und Grundsätze (ISO 19650-1:2018)*. Wien: Austrian Standards. Ausgabe April 2019.
- [7] DIN EN 1997-2:2007+AC 2010 (2007) *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-2 und nationale Ergänzungen*. Berlin: Beuth.
- [8] Flora, M.; Fröch, G.; Salzgeber, H.; Schneiderbauer, L. (2024) *Tunnel Information Modeling auf dem Weg zum digitalen Zwilling* in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (2024) *Beton-Kalender 2025*. 1. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, S. 215–240.

Autor:innen

Mag. Ines M. Massimo-Kaiser (Korrespondenzautorin)
ines.massimo@uibk.ac.at
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iTBT)
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck, Österreich

Dipl.-Ing. Dr. Georg Fröch
georg.froech@uibk.ac.at
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iTBT)
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck, Österreich

Dipl.-Ing. Hannah Salzgeber
hannah.salzgeber@uibk.ac.at
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iTBT)
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck, Österreich

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

matthias.flora@uibk.ac.at
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau (iTBT)
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck, Österreich

Zitieren Sie diesen Beitrag

Massimo-Kaiser, I. M.; Fröch, G.; Salzgeber, H.; Flora, M. (2024) *LOIN für Elemente des geologisch-geotechnischen Baugrundmodells*. Bautechnik.
<https://doi.org/10.1002/bate.202400052>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 12. Juli 2024; angenommen: 15. November 2024.

3.4 Weitere Forschungsartikel

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden weitere Zwischenergebnisse publiziert. Nachfolgend werden, die Zusammenfassungen zu diesen Publikationen angeführt. Die vollständigen Artikel finden sich im Anhang 9.2.

3.4.1 Beitrag open access journal (peer-reviewed)

Streamlining Tunnelling Projects through BIM.

[Optimierung von Tunnelbauprojekten durch BIM]

Massimo-Kaiser, I.; Exenberger, H.; Hruschka, S.; Heil, F.; Flora, M. (2022)

Sustainability 2022, 14, 11433. <https://doi.org/10.3390/su141811433>

Web of Science – Journal Impact Factor (2022): 3,9; Scopus CiteScore (2022): 5,8

Verantwortlichkeiten in der Bearbeitung (individueller Beitrag):

Konzeptualisierung, Methodik, Datenerhebung, Verfassen des ursprünglichen Entwurfs:

- Ines Massimo-Kaiser und Hans Exenberger

Verfassen, Überprüfung und Redaktion:

- Ines Massimo-Kaiser, Hans Exenberger, Matthias Flora, Sabine Hruschka, Frédéric Heil

Alle Autoren haben sich an der Durchsicht und Bearbeitung dieses Beitrags beteiligt.

Inhalt:

Gegenwärtig ist der akademische Diskurs über die Vorteile von Building Information Modeling (BIM) sehr allgemein gehalten. In diesem Artikel werden die konkreten Vorteile von BIM im Tunnelbau unter dem Aspekt der sozialen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit näher beleuchtet. Auf der Grundlage der bestehenden Definitionen der Corporate Social Responsibility (CSR) wird deren Umfang im Kontext von Infrastrukturprojekten und BIM definiert.

Dazu werden eine Reihe von Forschungsprojekten mit dem Schwerpunkt Tunnel Information Modeling, die von den Autoren der Universität Innsbruck wissenschaftlich begleitet werden, hinsichtlich ihrer Projektkultur und des Projektfortschritts, untersucht, analysiert und bewertet. Dabei wird insbesondere der Einfluss von BIM auf Teamarbeit, gegenseitige Wertschätzung und Lerneffekte untersucht. Zudem wird die wirtschaftliche Nachhaltigkeit durch einen verbesserten Ressourceneinsatz betrachtet.

Eine Erkenntnis aus dieser Evaluierung ist, dass die Projektbeteiligten bereit sein sollten, eine Projektkultur zu entwickeln, in der eine Kommunikation auf Augenhöhe stattfindet. Um dies zu unterstützen, bedarf es klarer Strukturen, einer frühen Teambildung und gegenseitiger Wertschätzung. Weiters zeigt sich, dass die Einführung gemeinsamer Datenumgebungen bekannt als Common Data Environment (CDE) und automatisierte Arbeitsabläufe zur Effizienzsteigerung und besseren Koordination führen. Diese Technologien fördern sowohl die soziale Nachhaltigkeit durch Zusammenarbeit und Kommunikation als auch die wirtschaftliche

Nachhaltigkeit durch optimierte Prozesse, denn kurze Wege innerhalb des Projektteams in Bezug auf Kommunikation, fachlichen Austausch, Koordination und Review führen zu einer schnelleren Problemlösung und effizienteren Projektabwicklung.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass eine frühzeitige und erfolgreiche Implementierung von BIM die soziale und wirtschaftliche Nachhaltigkeit verbessert und eine nachhaltige Projektabwicklung im Tunnelbau ermöglicht.

Weitere Forschungen, insbesondere mit sozialwissenschaftlicher Unterstützung sind erforderlich, um die Auswirkungen von BIM auf die soziale und wirtschaftliche Nachhaltigkeit vollständig zu erfassen.

3.4.2 Konferenzbeitrag 1 (peer-reviewed)

From prognosis Ground Model to Tender Model and Tunnel Construction Framework Plan with Tunnel Information Modelling

[Vom Prognose-Baugrundmodell zum AusschreibungsmodeLL und Tunnelbautechnischen Rahmenplan mit Tunnel Information Modeling]

Massimo-Kaiser, I.; Exenberger, H.; Salzgeber, H.; Werkgarner H.; Loidl, Richard; Flora, M. (2023)

- In: Proceedings of the ISRM 15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering, Schubert, W. & Kluckner, A. (eds), Salzburg, Austria, October 9-14, 2023. Austrian Society for Geomechanics: Salzburg. pp. 668-673.
<https://eposter.at/ISRM2023/data/PDF/1740.pdf>

Verantwortlichkeiten in der Bearbeitung (individueller Beitrag):

Konzeptualisierung, Methodik, Datenerhebung, Verfassen des ursprünglichen Entwurfs:

- Ines Massimo-Kaiser

Verfassen, Überprüfung und Redaktion:

- Ines Massimo-Kaiser, Hans Exenberger, Matthias Flora, Hannah Salzgeber, Hannah Werkgarner, Richard Loidl

Alle Autoren haben sich an der Durchsicht und Bearbeitung dieses Beitrags beteiligt

Inhalt:

Um einen sicheren Tunnelvortrieb zu gewährleisten, sind verschiedene Methoden, Bauweisen und Stützmittel erforderlich, abhängig von den geologischen und geotechnischen Bedingungen. Ein modellbasierter tunnelbautechnischer Rahmenplan, der auf einem validen Baugrundmodell basiert, ist für die (digitale) Planung unerlässlich.

Vorgestellt wird das Konzept eines digitales Baugrundmodells, das in allen Projektphasen verwendet werden kann und die Zusammenhänge zwischen den geologischen und geotechnischen Bedingungen und dem Tunnelbauwerk visualisiert. Die Zielsetzung besteht darin, einen TIM-Prozess zu entwickeln, der die geologischen und tunnelbautechnischen Gegebenheiten umfassend abbildet.

Es wird daher ein dynamischer Modellierungsansatz eingeführt, um die geologischen Bedingungen von der Planung bis zum Bau darzustellen. Es werden drei Prozessphasen behandelt: (i) eine Vorphase, in der das Modellgebiet definiert wird, (ii) die geologischen Prognosen, einschließlich der Parametrisierung und Schematisierung entlang der Trasse als Grundlage für weitere Planungsschritte, und (iii) die Erstellung eines kumulativen Tunnelbaumodells. Ein schematisches, parametrisiertes, kleinräumiges Ausbruchsmodell ist die Grundlage für eine dynamische Anpassung der Geologie. Zusätzlich werden detaillierte

Prognosemodelle entlang der Trasse eingeführt, um die prognostizierte Geologie detaillierter abzubilden, bei Änderungen anzupassen und so die aktuellen geologischen Informationen im Baugebiet abzubilden. Diese Modelle bilden die Grundlage für ein Ausschreibungsmodell und einen digitalen Tunnelbaurahmenplan.

Als Anwendungsbeispiel dient eine Modellierung auf Basis vorhandener Daten zu Bauwerk und Baugrund zum Perjentunnel 2. Röhre (ASFINAG).

Das erstellte Modell ermöglicht eine umfassende Grundlagenübersicht, eine schnelle Visualisierung von Variantenplanungen und eine verbesserte interdisziplinäre Zusammenarbeit.

Die Schlussfolgerung betont die Notwendigkeit einer guten Erkundung, Dokumentation und Interpretation für das Konzept. Die hybride Darstellung des trassennahen Baugrundmodells wird als vorteilhaft für Prognosen, Anpassungen und die Dokumentation in der Ausführungsphase hervorgehoben. Die Transparenz im Projektverlauf wird erhöht und ein steter Soll-Ist-Vergleich ist möglich.

Das vorgestellte Konzept ist die mögliche Grundlage, um trassenbezogene Baugrundmodelle über alle Projektphasen hinweg aktuell zu halten. Es zeigt auch das Potential auf, laufende Entwicklungen geologischer Modelliersoftware in Planung und Ausführung zu integrieren.

3.4.3 Konferenzbeitrag 2 (peer-reviewed)

Concept for Tunnel Information Modelling based work-preview and documentation during construction at Tunnel Angath.

[Konzept zur baubegleitenden Arbeitsvorbereitung und Dokumentation im Tunnel Angath auf Basis des Tunnel Information Modeling]

Exenberger, H.; Massimo-Kaiser, I.; Salzgeber, H.; Kompolschek P.; Heil F.; Flora, M. (2023) In: Proceedings of the ISRM 15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering, Schubert, W. & Kluckner, A. (eds), Salzburg, Austria, October 9-14, 2023. Austrian Society for Geomechanics: Salzburg. pp. 697-702
<https://eposter.at/ISRM2023/data/PDF/1779.pdf>

Verantwortlichkeiten in der Bearbeitung (individueller Beitrag):

Konzeptualisierung, Methodik, Datenerhebung, Verfassen des ursprünglichen Entwurfs:

- Ines Massimo-Kaiser und Hans Exenberger

Verfassen, Überprüfung und Redaktion:

- Hans Exenberger, Ines Massimo-Kaiser, Matthias Flora, Frédéric Heil, Peter Kompolschek

Alle Autoren haben sich an der Durchsicht und Bearbeitung dieses Beitrags beteiligt.

Inhalt:

Dieser Tagungsbeitrag beschreibt ein neues Konzept für eine BIM-gestützte Prognose und Dokumentation des Bauprozesses am Beispiel eines konventionellen Tunnelbauprojekts. Tunnel Information Modeling hat sich von einem Trend zu einer von der Bauindustrie geforderten Methode entwickelt. Eine der Herausforderungen ist die Handhabung von Arbeitsvorschauen und Baudokumentationen für den Tunnelbau kombiniert mit digitalen Modellen.

Das Konzept basiert auf einem parametrisch aufgebauten Ausschreibungsmodell mit schematischen, auf den Tunnelmeter referenzierten Ausbruchelementen, das alle ausschreibungsrelevanten Informationen enthält. Es verbindet die Phasen der Arbeitsvorschau für die Ressourcenplanung und die Bestandsdokumentation.

Die erste Phase wird durch die parametrisierte Anpassung der schematischen Ausbruchelemente abgebildet, die während der Arbeitsvorschau entsprechend den aktuellen Anforderungen aus den laufenden Arbeiten erfolgt. Überarbeitete geologisch-geotechnische Eingabeparameter führen z.B. über dynamische Wenn-Dann-Abhängigkeiten zu (halb-) automatischen Anpassungen der Kosten- und Zeitpläne und ermöglichen eine optimierte Ressourcenplanung.

Die zweite Phase beschreibt die parametrisierte Anpassung der schematischen Ausbruchelemente an die tatsächlichen Vortriebsprozesse. Im Beitrag wird eine Lösung mit den derzeit verfügbaren Werkzeugen demonstriert und damit der angestrebte BIM-basierte Soll-Ist-Vergleich während der Bauausführung erreicht. Das Ergebnis ist ein As-Built-Modell, das als umfassendes Datenmodell die Grundlage für die weitere digitale Planungsschritte darstellt. Dieses Konzept zeigt, dass TIM bereits heute nutzbringend in den Bauprozess integriert werden kann. Die digitale Umsetzung wird im Rahmen des ÖBB-Pilotprojekts für den Bau des Rohbaustollen Angath in Abstimmung mit dem Bauherrn und dem BIM-Manager getestet.

4 Experteninterviews

In diesem Kapitel werden die Durchführung und Analyse der semistrukturierten Experteninterviews beschrieben, die einen weiteren Bestandteil der empirischen Untersuchung dieser Arbeit darstellen. Diese Methode wurde gewählt, um vertiefte Einblicke in spezifische Fragestellungen zu gewinnen und praxisnahe Perspektiven von Fachpersonen einzubeziehen. Semistrukturierte Interviews bieten die Möglichkeit, durch einen Leitfaden gesteuerte Gespräche zu führen, die dennoch Raum für flexible und spontane Antworten lassen. Dies erlaubt es, sowohl vergleichbare Daten zu generieren als auch individuelle Sichtweisen und Erfahrungen der Experten umfassend zu berücksichtigen.

Der folgende Abschnitt beschreibt zunächst die Auswahl der Interviewpartner sowie die Ausarbeitung des Interviewleitfadens. Ziel dieses Kapitels ist es, die methodische Vorgehensweise transparent darzustellen und die Bedeutung der gewonnenen Erkenntnisse für die vorliegende Forschung einzuordnen.

4.1 Einleitung

Im Zuge der geologischen Planung und Erkundung werden umfassende geologische und geotechnische Daten erhoben und ausgewertet. In Österreich werden gem. ÖGG-Richtlinie [3] diese Daten für die geotechnischen Planung benötigt und verwendet, um in weiterer Folge das Tunnelbauwerk zu planen. Häufig kommt es im Zuge dieser Datenübergabe zu der Erkenntnis, dass viele der Daten für die effektive Planung nicht notwendig oder verwendbar sind, bzw. notwendige Daten nicht erhoben oder bestimmt wurden. Auch kommt es vor, dass die geologischen Grundlagendaten in der Art der vorhandenen Datenaufbereitung nicht für die Weiterverwendung in der geotechnischen Planung geeignet sind. Daraus folgt oftmals eine neue Auswertung bzw. Nacherkundung, was zu Verzögerungen im Projektablauf führen kann.

Zur Erhebung der Anforderungen der Geotechnik an die Geologie hinsichtlich Datengrundlagen und deren Bereitstellung im Tunnelinformationsmodell erfolgten im Mai und Juni 2023 vier semi-strukturierte Experteninterviews mit Spezialisten aus dem Fachbereich der Geotechnik. Die Interviewpartner aus Planungsbüros, Bauausführung und Universität repräsentieren die Sparten wissenschaftsnahe Planung und Ausführung.

4.2 Fragestellung

Es wurden Interviews zu dem Thema „Welche Daten benötigt die Geotechnik von der Geologie (in einem 3D-Baugrundmodell)?“ durchgeführt.

Folgende Fragen wurden im Rahmen der Interviewgespräche gestellt:

1. Welche Baugrunddaten benötigt die Geotechnik von der Geologie?
2. Welche Werte generell, welche projektspezifisch?
3. Wie sollen diese Daten aufbereitet sein?
4. Wie wird das Modell evaluiert, bzw. wie evaluierbar soll das Modell sein?
5. Welche Kennwerte zu Gebirge und Gestein sollen wie enthalten sein?
6. Welche Daten sind wirklich notwendig (Mittelwerte, Median, Extremwerte) und wie soll die Darstellung im Modell erfolgen?
7. Ab wann sollte die Geotechnik in die Erkundung / Gebirgsarten-Festlegung / Versuchsplanung involviert werden?
8. Wie gelingt eine Verbesserung der Kommunikation?
9. Wie werden sinnvolle gemeinsame Strukturen geschaffen?
10. Der Wunsch des Geotechnikers an das Baugrundmodell?

4.3 Auswertung der Interviews

Die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring [14] ist eine systematische, regelgeleitete Methode zur Auswertung von qualitativem, meist sprachlichem Material. Ihr Ziel ist es, Inhalte aus Texten, Interviews oder anderen Datenquellen inhaltlich zu strukturieren und interpretativ auszuwerten, um systematisch und nachvollziehbar Erkenntnisse zu gewinnen.

Die durchgeführten Interviews haben einen semi-strukturierten Charakters. Es werden die angeführten Fragen im Zuge des Gesprächsverlaufens unsortiert angesprochen, diskutiert und beantwortet. Es kommt zu teils fließenden Übergängen der Fragestellungen und erhaltenden Antworten. Daher erfolgt eine textliche Zusammenschau der Interviewantworten, im Sinne einer qualitativen Inhaltsanalyse, bzw. eines induktiven Forschungsansatzes.

Aus den Interviews ergeben sich teils übereinstimmende, teils aber auch sehr unterschiedliche Standpunkte zu den angesprochenen Themen.

Zur sehr allgemein gehaltenen Eingangsfrage [*Frage 1*]: *Welche Baugrunddaten benötigt die Geotechnik von der Geologie?* bezogen auf die geotechnische Planung eines Tunnelbauwerkes, wird durchwegs kommentiert, dass mit einem frühzeitigen Einbeziehen der Geotechnik [*Frage 7*] in die geologische Planung, Erkundungsplanung, Ausführung und Auswertung diese Frage wohl obsolet wäre.

Weiters wird von allen Gesprächspartnern eingangs statuiert, dass jegliche Parameterauswahl projektbezogen erfolgen muss.

Zur allgemeinen Beantwortung der Frage wird im Rahmen der Gespräche auf die geltenden nationalen und internationalen Normen und Richtlinien verwiesen. Hierbei wird zum einen wiederholt auf die in den ÖGG-Richtlinien [3], [5] aufgelisteten Schlüsselparameter zur geotechnischen Planung, zum anderen auch auf die SIA 260 (Nutzungsvereinbarung, Definition der Lebensdauer der Bauteile, Nutzlasten, Anforderung Betrieb und Unterhalt, Brand etc.) [24] und SIA 199 (Erfassen des Gebirges im Untertagebau) [25] referenziert. Zudem sind internationale Standards für geotechnische Berichte (Geotechnical Baseline Reports – GBR) [26] etabliert. Aus diesen Dokumenten können gemäß Anforderungen an das Bauwerk die notwendigen bzw. zu verwendenden Schlüsselparameter definiert werden.

Auf die *Frage 2* bzw. auf die Frage, ob es Daten gibt, die für eine geotechnische Planung eines Tunnelbauwerkes generell als Basisdaten zu klassifizieren sind, werden die unterschiedlichsten Anforderungen genannt, wobei sich in der Zusammenschau eine hohe Schnittmenge der genannten Schlüsselparameter ergibt.

So werden die lithologische Beschreibung [20], [22] die Komplexität der Geologie, im Festgestein die Bankung, die Beschreibung des Trennflächengefüges in Habitat und Orientierung [20] und auch in Relation zum Bauwerk, die Festigkeiten von Gestein und Gebirge, im Lockermaterial die Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte sowie Kenntnisse zu den Bemessungswasserständen als notwendige Basisinformation genannt.

Einer der Gesprächspartner hebt klar hervor, dass für erste und weiterer Planungsschritte immer ein Reibungswinkel, sowohl im Festgestein, als auch im Lockermaterial erhoben werden muss, um einen Überblick über das Spannungsniveau, in dem sich das Bauwerk befindet, zu erhalten. Ebenso gelten die Informationen zu den Verformungseigenschaften des Gebirges (E-Moduli) [5] als eine der wichtigsten Grundinformationen zum Thema Spannungsabhängigkeit. Von weiteren Gesprächspartnern wird dies bestätigt, zur Bestimmung des Gebirgsverhaltens werden dazu wiederholt die klaren Trennflächenbeschreibungen als maßgebliche Information genannt. Alle Befragten sehen die Notwendigkeit, dass im Festgestein der Geological Strength Index (GSI) [27], die Rauigkeit [20], [22], die Persistenz (Durchtrennungsgrad; flächige Ausdehnung der Trennfläche), das Blockvolumen, die Trennflächenbeschreibungen gem. Norm [20], [22] sowie die einaxiale Druckfestigkeit (Uniaxial compressive strength – UCS) [20], [22] zu berücksichtigen sind.

Im Lockermaterial ist ein zu definierender Basissatz an Laboruntersuchungen hinsichtlich Korngrößen, Plastizität, Konsistenz und Wassergehalt [20] unerlässlich.

Zur weiteren Beschreibung des Festgesteines und seines Zustandes sind gemäß geltenden Normen [20]-[22] im Detail die Bestimmung und Beschreibung von Trennflächen(scharen), der Trennflächenabstand, deren Bestege oder Füllungen gem. geltenden Normen festzuhalten. Reibungswinkel und Kohäsion gelten als „Standardparameter“, werden jedoch nicht von allen Gesprächspartnern für unbedingt notwendig erachtet, wenn es sich um Planungsbereiche zu den

Gebirgsverhaltenstypen GVT 1 (standfestes Gebirge) und GVT 2 (gefügebedingte Ausbrüche) [3] handelt. Hinsichtlich Festigkeiten (Gestein und Gebirge [18]) zeigen sich unterschiedliche Anforderungen. Zum einen werden hier ausschließlich Daten aus projektbezogenen Versuchsergebnissen zu weiteren Berechnungen herangezogen, zum anderen wird auch auf Erfahrungswerte aus vergleichbaren Lithologien und Projekten bzw. aus der Literatur zurückgegriffen (z.B. Liste der Bergfesten [5]). Die Angaben von Größenordnungen zu den Festigkeiten werden durchwegs als ausreichend für eine weitere Planung betrachtet.

Im Zuge aller Gespräche wird wiederholt die projektspezifische Notwendigkeit [*Frage 2*] und Auswahl von Schlüsselparametern andiskutiert. So nimmt die Besprechung zu Anforderungen an die notwendigen Basisinformationen für die unterschiedlichen Vortriebsmethoden ein Interviewgespräch annähernd vollständig ein. Auch in den weiteren Gesprächen liegt der Fokus wiederholt auf den projektspezifischen Schlüsselparametern. Es werden hierbei die notwendigen Parameter, bzw. Versuche zur Bestimmung des Ortsbrustverhalten gemäß Vortriebsmethode detaillierter hervorgehoben.

So sind zur Planung eines Baggervortriebes das bestimmte Gebirgsverhalten (GVT), Atterbergsche Zustandsgrenzen [31], der Wassergehalt [28], Ergebnisse des Ödometerversuchs [29] sowie im Lockermaterial die Sieblinien notwendig. Zur Planung eines Sprengvortriebs werden die Basisparameter UCS [22], GSI [27], Cerchar Abrasivitätsindex (CAI) [3], sowie Informationen zum Gefüge, Trennflächenzustand und Persistenz hervorgehoben. Für den maschinellen Vortrieb werden je nach Baugrund dieselben Schlüsselparameter wie für Bagger- und Sprengvortrieb, zusätzlich der Schlüsselparameter „rolliges oder bindiges“ Lockermaterial [20], [21] genannt.

Für alle Vortriebsmethoden wird der allgemeine Parameter „Wasser“ erwähnt.

Kontrovers wird durchaus das Thema *Daten im Modell* besprochen.

Bei *Frage 3* wird zum einen die Anforderung an das Baugrundmodell so definiert, dass alle erhobenen Daten im Modell enthalten sein sollen, so dass die fachliche Evaluierbarkeit mittels des Modells gegeben ist. Diese Datengrundlage umfasst u.a. sämtliche Versuchsdaten in-situ und aus dem Labor, Messdatenreihen etc. Somit sollte das Modell der vollständigen Datenbereitstellung dienen. Zum anderen wird festgehalten, dass das Modell auf bereits ausgewerteten Messergebnissen und/oder interpretierten Werten, oder auch auf Erfahrungswerten basieren sollte.

Zur *Frage 4*, wie wird das Modell evaluiert bzw. wie evaluierbar soll das Modell sein, lautet die Antwort, dass die Ausgangsdaten wie Versuchsdatenreihen und Sieblinien mit dem Modell verlinkt sein sollten, um prüfbar zu sein (Ingenieurleistung). Im Modell sind die „endgültigen, geprüften Daten“ darzustellen. Das Modell wird auch als Darstellung der Ergebnisse des geologischen Berichts gesehen, somit sollen diese Grundlagen übereinstimmen.

Auch *Frage 5* wird umfassend beantwortet. So werden Informationen zu geologischen und lithologischen Strukturen wie Schichtung, Schieferung sowie zu Trennflächen wie Störungen, Störungszonen, Störungsscharen von den Gesprächspartnern durchwegs als notwendig für die Planung erachtet [*Frage 3, 5 und 6*]. Ob Störungen als „mechanisch wirksam“ ausgewiesen werden sollen, wird von den Interviewpartner unterschiedlich gesehen. Neben Orientierung (im Raum und zum Bauwerk), Trennflächeneigenschaften und Persistenz wird vor allem der Zustand und das Ausmaß von Störungsbereichen als weiterer Schlüsselpunkt betrachtet. Auch werden eine Klassifizierung von Störungen, sowie Verweise auf spröde oder duktile Eigenschaften angeregt. Weiters sollten Störungszonen je nach Ausmaß als eigene 3D-Körper dargestellt werden.

Im Idealfall können Kennwerttabellen aus (anderen) Projekten gesichtet und verwendet werden, diese wären im Vorlauf schon eine gute Grundlage für die Projekt-kommunikation. Dafür sollen diese Daten jedoch entsprechend freigegeben und zugänglich sein. Viele Kennwerte könnten somit aus anderen Projekten bzw. aus der Literatur und Erfahrung übernommen werden.

Ebenso sollten neben probabilistischen auch untergeordnet deterministische Werte in ein Baugrundmodell einfließen.

Es gilt auch festzuhalten, dass für die Planung gewisser Bauwerke, bzw. Bauwerksabschnitte nicht immer ein umfassender Schlüsselparametersatz notwendig sind. So sind zur Planung seichter Tunnel zum Teil die Angaben zur Überlagerung, Orientierung der Bankung und Erfahrungswerte maßgeblich.

Bei *Frage 6* zum Thema *Daten im Modell* wird neuerlich festgehalten, dass das Modell auf bereits ausgewerteten Messergebnissen und/oder interpretierten Werten, oder auch auf Erfahrungswerten basieren sollte. Die zugehörigen Basisdaten (z.B. Versuchsdaten, Sieblinien, Druckversuche in-situ oder im Labor etc.) beaufschlagen das digitale Modell evtl. unnötig mit Datenvolumen. Grundsätzlich sollten diese Daten jedoch zur Evaluierbarkeit verfügbar sein [*Frage 4*]. Diesem Anspruch kann über Verlinkungen der Basisdokumente (Versuchsprotokolle etc.) genüge getan werden.

Als weitere Anforderung wurde eine Reduktion der Schlüsselparameter (auch deren Auswahl) im Modell auf die „Wesentlichen“ (gem. gemeinsamer Definition) genannt.

Mehrfach wurde darauf verwiesen, dass für die geotechnische Planung auch ermittelte Extremwerte im Modell zu erfassen sind.

Auf *Frage 7 nach dem geeigneten Zeitpunkt des Einbindens des Geotechnikers* gibt es die einstimmige Antwort „so früh wie möglich, eine gemeinsame Festlegung welche Versuche benötigt werden wird gewünscht. Das Standard-Versuchsprogramm zu absolvieren sei kontraproduktiv, da selten die sinnvoll benötigten Daten und Werte bei der geotechnischen Planung als Inputparameter eingebracht werden Kennwerte bzw. Schlüsselparameter sind gemeinsam projektspezifisch festzulegen.“

Die Diskussion zu Verbesserung der *fachübergreifenden Kommunikation* [Frage 8], geht bei allen Interviews einher mit jener zu den *gemeinsamen sinnvollen Strukturen* [Frage 9].

Bereits zu Projektbeginn ist festzulegen, welche Ergebnisse benötigt werden., auch beschrieben mit der „Definition des Spielfeldes“. Es bedarf frühzeitig bei entsprechendem Planungsstand auch für einzelne Bauteile oder Bauwerksbereiche einer projektbezogenen Versuchsplanung.

Bereits die Versuchsplanung in Art und Anzahl der Versuche in der geologischen Erkundung, sowohl in situ als auch im Labor, sollte gemeinsam und interdisziplinär erfolgen. Dies um zu gewährleisten, dass jene für die geotechnische Planung notwendigen Parameter erhoben werden. Zur Verbesserung der Kommunikation und Kollaboration über den Projektverlauf hinweg dient auch das gemeinsame Festlegen projektspezifischer Kennwerte zu Projektbeginn. Es wird mehrfach auf die Wichtigkeit hingewiesen, die Erkenntnisse aus der geologischen Basisarbeit wie z.B. der Erkundungen, zu schematisieren und zu kategorisieren (Gebirgsarten, Homogenbereiche) um die Planbarkeit des Bauwerkes zu ermöglichen. Um dies friktionsfrei zu erreichen, benötigt es zu Projektbeginn die Beschreibung eines grundsätzlichen Workflows. Im Zuge der Festlegung der Verantwortungen und der zu erbringenden Leistungen sind auch die technischen Verantwortlichkeiten zur Modellerstellung – und Pflege festzulegen.

Es erfolgt die generelle Anmerkung, dass innerhalb Österreichs die Geologen an den Universitäten vom Basiswissen her gleich gut ausgebildete sein sollten. Dies vor allem mit dem Augenmerk darauf, wie Gestein und Gebirge beschrieben werden. Bereits im Studium sollte auf gültige Normen verwiesen werden und so geologische Beschreibungen dahin „vereinheitlicht“ werden, dass in Österreich ein einheitliches Verständnis zwischen Fachgeologen herrscht. Auch regionalgeologische Ausdrücke sollten gem. allgemein gültigen Beschreibungen definiert werden (z.B. Opok).

Zur Frage 10, der Wunsch an das (geologische) Modell zeigt sich in den Antworten eine hohe Übereinstimmung.

- Die die Evaluierbarkeit des Modelles, sowie die Möglichkeit damit einen Soll-Ist-Vergleich durchzuführen, wird hervorgehoben. Das Modell soll über Berichte und Geländebegehung prüfbar gestalten werden.
- Aus dem Modell sollen Extremwerte der Schlüsselparameter genauso wie maßstäbliche Darstellungen der strukturellen Elemente in Relation zum Tunnelbauwerk abrufbar sein.
- Mögliche Datenvarianzen sollen darstellbar und ausweisbar sein.
- Das Fachmodell Geologie soll sauber strukturierte Informationen zu den geologischen Verhältnissen enthalten. Lithologische und strukturgeologische Daten sollen enthalten sein, nicht „nur“ die daraus abgeleiteten Gebirgsarten.
- Geologische Beschreibungen sollen auch deren Heterogenität ausweisen. Diese Infos sollen in das geologische Modell einfließen. Auch der Fokus auf die Verteilung von kompetenten oder inkompetenten Gebirgsbereichen darf im Modell nicht verlorengehen.

- Im geologischen Modell sollte auch immer der Verschnitt mit dem Bauwerk möglich sein.
- Ein eigenes Modell zur Prognosesicherheit wäre gewünscht.
- Ein einfaches Volumenmodell mit geologischen Einheiten und Strukturen ist aussagekräftiger als Modelle mit hohem Detaillierungsgrad und für die Kommunikation unerlässlich.
- In Anlehnung an die DAUB-Empfehlung sollte es ein klares unterscheiden zwischen „Faktenmodell“ und „interpretiertem Modell“ [9] geben.

Im Rahmen der Gespräche gibt es weitere Anmerkungen, welche keiner der Fragen im eigentlichen Sinne zugeordnet werden können, jedoch zum Gesamtverständnis im Spannungsfeld Geologie – Geotechnik zum Thema Baugrundmodell und TIM beitragen.

Von einem der Gesprächspartner wird festgehalten, dass der „*Digitale Zwilling*“ im Baugrundmodell (Prognose und Ausführung) aufgrund der nicht vorhersagbaren und auch nicht im Detail dokumentierbaren geologischen Verhältnisse nicht möglich ist (wobei hier der Ausdruck „*Digitaler Zwilling*“ als allgemeine Formulierung verwendete wurde, ohne detaillierte Definition). Im Rahmen der Prognose können jedoch die Kennwerte zu den Gebirgsarten erfasst und bearbeitete werden – ebenso kann somit die Prognosesicherheit berücksichtigt werden.

Darüber hinaus wird angesprochen, dass die DAUB-Empfehlung [9] als Grundlage zur geologisch – geotechnischen Modellierung als zu detailliert bewertet wird, da der Fokus auf der Datenstruktur des Modelles und weniger im fachlichen Kontext liegt. Die ÖGG-Richtlinie [3] enthält ebenso keine Vorgaben welche Schlüsselparameter wann erhoben und angewendet werden sollen. In ihrem abgebildeten Planungs-Prozess wird jedoch klar zwischen Geologie und Geotechnik getrennt (Geologie erarbeitet die Basis für die Geotechnik).

Das Thema Hydrogeologie im TIM Modell wird als noch deutlich komplexer als Geologie – Geotechnik betrachtet, da auch dynamischere Daten vorliegen. Die Modelllösungen hierzu sind noch zu erarbeiten.

4.4 Zusammenfassung der Interviews

Aus der Zusammenschau der Interviews ergeben sich folgende Antworten:

Frage 1: Welche Baugrunddaten benötigt die Geotechnik von der Geologie?

Antwort: Projektspezifisch gem. den geltenden Normen und Richtlinien.

Frage 2: Welche Werte generell, welche projektspezifisch?

Antwort: Lithologische Beschreibung, Komplexität des Gebirges, räumliche Orientierung der geologischen Strukturen in Relation zum Bauwerk. Kennwerte, bzw. Schlüsselparameter sind projektspezifisch und daher fachbereichsübergreifend gemeinsam festzulegen.

Frage 3: Wie sollen diese Daten aufbereitet sein?

Antwort: Das Modell sollte der vollständigen Datenbereitstellung dienen, so dass die fachliche Evaluierbarkeit im Modell erhalten sein muss.

Frage 4: Wie wird das Modell evaluiert bzw. wie evaluierbar soll das Modell sein?

Antwort: Dazu sollen die Ausgangsdaten wie Versuchsdatenreihen und Sieblinien mit dem Modell verlinkt sein, um prüfbar zu sein. Im Modell sind die „endgültigen, geprüften Daten“ darzustellen.

Frage 5: Welche Kennwerte zu Gebirge und Gestein sollen wie enthalten sein?

Antwort: Informationen zu geologischen und lithologischen Strukturen wie Schichtung, Schieferung sowie zu Trennflächen wie Störungen, Störungszonen, Störungsscharen, Orientierung absolut und relativ zum Bauwerk. Ideal wäre es Kennwerttabellen zu etablieren, welche über verschiedene Projekte hinweg zur Festlegung von Schlüsselparametern verfügbar und verwendbar sind und somit den Planungsaufwand, sowie den Versuchsaufwand reduzieren.

Frage 6: Welche Daten sind wirklich notwendig (Mittelwerte, Median, Extremwerte) und wie soll die Darstellung im Modell erfolgen?

Antwort: Interpretierte Daten um kein „überladenes“ Modell zu generieren, projektspezifisch festgelegte Daten. Extremwerte (aus Versuchsergebnissen) sind dabei zu berücksichtigen und NICHT auszuscheiden. Der Mittelwert ist nicht immer die richtige Basis, um weitere Berechnungen durchzuführen.

Frage 7: Ab wann sollte die Geotechnik in die Erkundung / Gebirgsarten-Festlegung / Versuchsplanung involviert werden?

Antwort: Die Sparten Geologie und Geotechnik sollten bereits frühzeitig die gemeinsame Bearbeitung. Eine gemeinsame Festlegung welche Versuche benötigt werden ist gewünscht.

Frage 8: Wie gelingt die Verbesserung der Kommunikation?

Antwort: Eine entsprechend abgestimmte Aufbereitung und Bereitstellung der geologischen Grundlagendaten (Gelände, Labor) in einem Modell erleichtert die fachübergreifende Kommunikation und verringert Translationsprobleme.

Frage 9: Wie werden sinnvolle gemeinsame Strukturen geschaffen?

Antwort: Eine frühzeitige Abstimmung der Planungsbeteiligten in Geologie und Geotechnik zu den notwendigen Parametern und Grundlagen und Daten ermöglicht eine effektivere Planung und Ausführung, die Verantwortlichkeiten für die Modelle sind konkret zu definieren.

Frage 10: Der Wunsch des Geotechnikers an das Baugrundmodell?

Antwort: Der Informationsgehalt des geologischen Models sollte die konsolidierte Information des geologischen Berichts sein. Aufgrund der Komplexität der Fragestellungen wird der geologischen Bericht weiterhin benötigt, welcher die Grundlagen zusammenfassend und interpretiert darstellt. Unsicherheiten und Varianzen sollten im Modell ausgewiesen, bzw. dargestellt werden.

4.5 Vergleich der Anforderungen von Experten und Normen

Die Interviews und die normativen Vorgaben zeigen teils Übereinstimmungen und teils Unterschiede in Bezug auf die notwendigen geotechnischen und geologischen Daten für die Planung und den Bau von Tunnelbauwerken.

Übereinstimmungen:

- Projektbezogenheit der Daten: alle Gesprächspartner betonen, dass die Auswahl der notwendigen geotechnischen Parameter stets projektbezogen erfolgen muss. Sowohl die Normen als auch die Experten sehen die Notwendigkeit, frühzeitig die geotechnische Planung in die geologische Planung zu integrieren, um eine fundierte Basis für die Erhebung und Auswertung der benötigten Daten zu gewährleisten.
- Maßgebliche geotechnische Parameter: sowohl die Experten als auch die angeführten Normen nennen grundlegende geotechnische Daten wie zum Beispiel die lithologische Beschreibung, die Festigkeiten von Gestein und Gebirge, die Korngrößenverteilung im Lockermaterial und Bemessungswasserstände als wesentliche Basisinformationen. Ebenso wird der Reibungswinkel im Festgestein und Lockermaterial sowie die Verformungseigenschaften des Gebirges als wichtige Parameter hervorgehoben.
- Notwendigkeit von Labor- und in-situ-Untersuchungen: die Experten heben, wie auch die normativen Vorgaben, die Bedeutung von Laboruntersuchungen (z.B. Scherfestigkeit, Korngrößenverteilung) und in-situ Tests (z.B. Standard Penetration Test) zur Erhebung der geotechnischen Eigenschaften hervor. Auch die hydrogeologischen Untersuchungen, insbesondere zu Grundwasserverhältnissen, sind sowohl in den Normen und auch für die Experten von zentraler Bedeutung.
- Datenmodellierung und -evaluierung: sowohl Experten als auch Normen legen großen Wert darauf, dass alle erhobenen Daten im geologischen Modell enthalten sind und die Evaluierbarkeit des Modells gewährleistet ist. Es wird betont, dass das Modell auf ausgewerteten und interpretierten Daten basieren muss, um die geotechnische Planung zu unterstützen und die Bauwerksplanung auf einer fundierten Grundlage durchzuführen.

Unterschiede:

- Daten im Modell: es gibt unterschiedliche Auffassungen bezüglich der Integration von Daten in das Modell. Während einige Experten fordern, dass sämtliche Basisdaten (wie Versuchsprotokolle und Messdaten) in das Modell aufgenommen werden, um eine vollständige Evaluierbarkeit zu gewährleisten, bevorzugen andere eine Reduktion auf die „wesentlichen“ Schlüsselparameter. Dies entspricht auch der Forderung der DAUB-Empfehlung, dass klar zwischen „Faktenmodell“ und „interpretiertem Modell“ unterschieden werden sollte. Einige Experten bezeichnen ein weniger detailliertes Modell mit geologischen Einheiten und Strukturen als ausreichend, da dies eine verständlichere und weniger komplexe Kommunikation ermöglicht.
- Erforderlichkeit bestimmter Daten: die Experten stellen fest, dass nicht für jedes Projekt sämtliche Schlüsselparameter (gem. ÖGG-Richtlinie) benötigt werden. Insbesondere bei seichtliegenden Tunnelprojekten oder einfacheren Bauwerken können gewisse Daten, wie die detaillierte Beschreibung von Trennflächen oder die genaue Erhebung von Festigkeiten, entfallen, solange Erfahrungswerte und fundierte Annahmen genutzt werden können. Die Normen hingegen fordern, dass für die geotechnische Planung alle relevanten geotechnischen Daten vollständig und genau erfasst werden.
- Projektspezifische Auswahl von Parametern: die Experten betonen die projektspezifische Auswahl und Festlegung der notwendigen Parameter zu Beginn des Projekts. Während die Normen sowie die ÖGG-Richtlinien und SIA 260 konkrete Anforderungen und Parameterlisten bieten, stellt sich heraus, dass die Experten eine flexiblere Handhabung bevorzugen, um sicherzustellen, dass die spezifischen Anforderungen jedes Bauvorhabens berücksichtigt werden. Dies wurde besonders bei der Diskussion zu den verschiedenen Vortriebsmethoden (Bagger-, Spreng- und maschineller Vortrieb) deutlich.

Fazit:

Die Experten stimmen größtenteils mit den normativen Vorgaben in den grundlegenden Aspekten der geotechnischen Planung überein. Vor allem hinsichtlich der Notwendigkeit von geotechnischen und hydrogeologischen Daten und der Evaluierbarkeit des Baugrundmodells. Unterschiede bestehen jedoch in Umfang und Detail der erforderlichen Daten, der Flexibilität bei der Auswahl der Parameter und der Handhabung des Modells, insbesondere hinsichtlich der Integration von Daten und der Komplexität der Modelle. Während die Normen präzise Vorgaben an die geotechnische Planung und Modellierung stellen, bevorzugen die Experten eine pragmatischere, projektspezifische Herangehensweise, um den unterschiedlichen Anforderungen und Gegebenheiten gerecht zu werden.

5 Resultate

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst vorgestellt. Sie dienen als Grundlage, um die Forschungsfragen zu beantworten. Dieses Kapitel bildet die Grundlage für die anschließende Interpretation der Ergebnisse und zeigt Perspektiven für weiterführende Untersuchungen oder praktische Anwendungen auf.

5.1 Forschungsprozess im BIM-normativen Kontext

In der erfolgten Forschungsarbeit wird eine umfassende Bedarfserhebung hinsichtlich fachlicher und technischer Anforderungen an das 3D-Baugrundmodell durchgeführt.

Abbildung 5-1 stellt dar, welche Voraussetzungen zur Informationsbereitstellung gem. der ÖNORM EN 17412-1 [10], [11] durch die angeführten Publikationen und Interviews behandelt wurden.

	Warum ?	Wann ?	Wer ?	Was ?	
Artikel 1 Erhebung Status Quo	X			X	
Forschungsartikel 1 Ergebnis und Ausblick zum Nutzen von BIM			X	X	
Konferenzbeitrag 1 Tunnelbautechnischer Rahmenplan in BIM – Praxisorientierter Lösungsansatz	X	X	X	X	
Konferenzbeitrag 2 Fortschreibung Tunnelbautechnischer Rahmenplan in BIM in der Ausführung – modelbasiert	X	X		X	
Experteninterviews	X			X	
Artikel 2 Beispiel zur Umsetzung Anwendungsfall geologische Prognosesicherheit	X	X	X	X	
Artikel 3 Basis für die geotechnische Planung	X	X	X	X	X

Abbildung 5-1: Zuordnung der Publikationen zu den Voraussetzungen der Informationsbereitstellung

Über die Erhebung des Status-Quo und die Bewertung der Anwendung und des Nutzens von TIM in laufenden Tunnelprojekten, erfolgt auf Basis der festgestellten Notwendigkeiten die Konzeptionierung von Modelllösungen zur schematischen Darstellung eines tunnelbautechnischen Rahmenplanes sowie der baubegleitenden Arbeitsvorbereitung und Dokumentation. Die Ergebnisse werden in die Prozessentwicklung zur Erstellung des Prognosemodells [Anhang 9.2.2] integriert.

Experteninterviews bringen einen praxisbezogenen Erkenntnisgewinn, wodurch gezielt auf maßgebliche Parameter für die geotechnische Planung (gem. ÖGG-Richtlinie) geschlossen werden kann, welche in dem entwickelten Modellierprozess zur Darstellung der Prognosesicherheit (Kapitel 3.2) als weiterer Schlüsselparameter (Eigenschaften) eingepflegt werden sollten, um eine dynamische, spartenübergreifende Modelllösung im Sinne eines fortschreibbaren Modelles zu erhalten.

Die Definition des LOIN gem. ÖNORM EN 17412-1 und die Festlegung von Eigenschaften wird auf Basis der vorhandenen Ergebnisse, sowie weiterer Forschungsarbeit durchgeführt.

5.2 Die modellgestützte geologische Prognose – Festlegung des LOIN für Elemente des Baugrundmodells

Die geologische Planung und Prognose erfolgt auf Basis vorhandener Normen und Richtlinien sowie mit Bezug auf Eurocode 7 in vier Planungsphasen. In nachfolgender Tabelle 5-1 werden den Planungsabschnitten mögliche digital bearbeitbaren Prozesse zugeordnet.

Planungsphase	digital bearbeitbare Prozesse
1. Grundlagenerhebung	
(1a) Erhebung von Bestandsdaten aus Bohrungen und geologischen Karten	Erhebung oder Erstellung von digitalem Kartenmaterial der Geländeoberfläche, digitale Bohrprofile, etc.
(1b) Evaluierung und Erhebungen durch geologische Neuaufnahme der Geländedaten	Digitalisierung und Anpassung des digitalen geologischen Kartenmaterials, digitale Korrekturen von Aufschlusspunkten (Koordinatenlage), etc.
2. Erkundungsplanung auf Basis der ersten Prognose der Geologie;	auf Basis der vorhandenen digitalen geologischen Karten und Aufschlussdaten, sowie der digitalen Einbautenpläne etc.
3. Erkundung mit weiterer Erhebung geologischer Daten	Digitalisierung der Erkundungsergebnisse, Anpassung der digitalen Karten und Prognosemodelle
4. Interpretation der geologischen Daten und Prognose für die geotechnische Planung auf Basis der Phasen 1-3.	Zusammenschau der vorhandenen, neu erhobenen und aktualisierten geologischen Daten

Tabelle 5-1: Geologische Planungsphasen und Beispiele für mögliche digital bearbeitbare Prozesse

Die modellbasierte Umsetzung dieses Prozesses in einem Tunnelinformationsmodell wird in Abbildung 5-2 dargestellt.

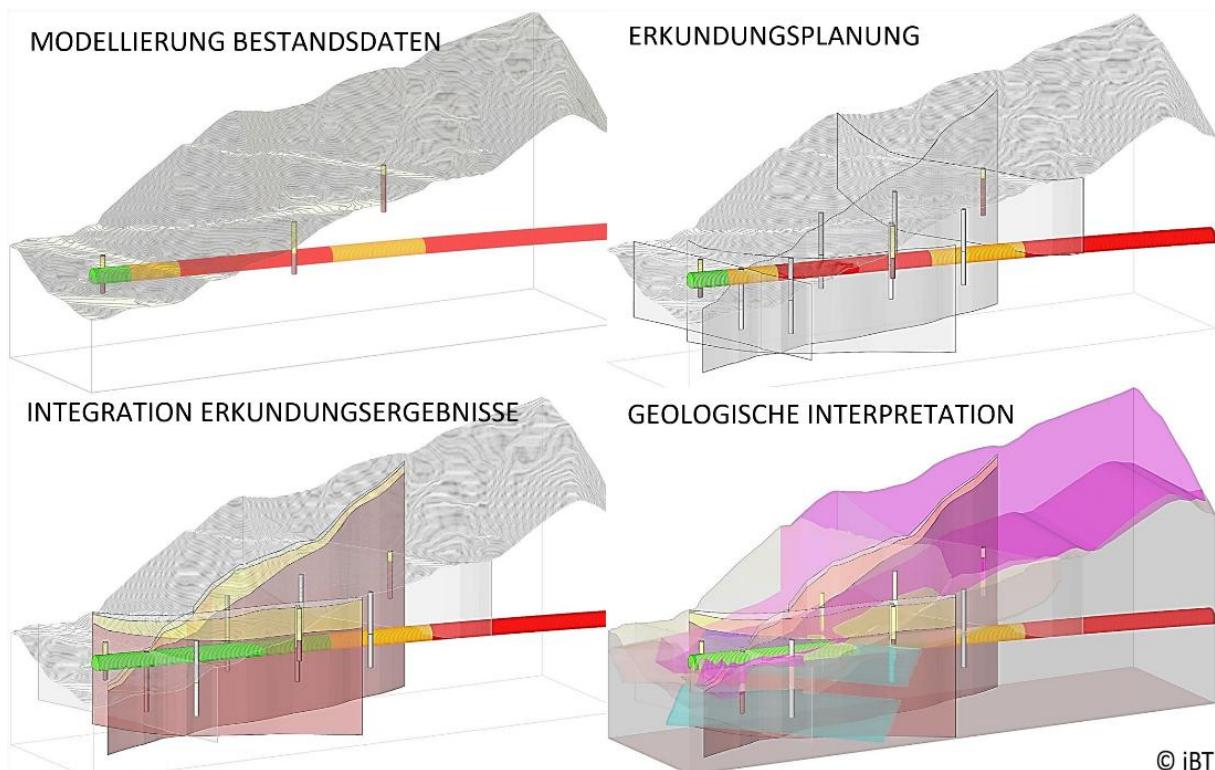


Abbildung 5-2: Geologische Planungsphasen im schematischen digitalen 3D-Modell (Kapitel 3.2)

Damit ein digitales Baugrundmodell fachübergreifend verwendbar ist, sollen klar definierte Grundlagen im Modell enthalten sein. Um die geologischen Planungsphasen zum einen und deren Ergebnisse als geologische Prognose zum anderen in einem digitalen 3D-Modell darstellen zu können, ist es unerlässlich über die Projektphasen hinweg vorgegebenen Eigenschaften zu erheben. Die Evaluierung der Prozesse im Zuge der durchgeföhrten Modellierungen zeigt, dass die schematische Unterteilung des Modelles eine dynamische Bearbeitung und kontinuierliche Aktualisierung ausgewählter Schlüsselparameter ermöglicht. Um die geologische Planung übersichtlich und für den Zweck der trassennahen geologischen Prognose zu erarbeiten, wird diese schematische Darstellung der geologisch-geotechnischen Gegebenheiten in Trassenlage als Möglichkeit gesehen, aktuelle Erkundungs- und Planungsergebnisse rasch und ressourcensparend in das Modell einzuarbeiten. Die notwendigen – projektspezifisch festgelegten – Informationen werden den jeweiligen schematischen Ausbruchskörpern zugewiesen. Neben den zusammengefassten oder bereits interpretierten geologischen Informationen, können Planungsabschnitte welche besondere Aufmerksamkeit in der weiteren Planung benötigen als POIN, definiert als Point's of Information Need markiert (9.2.2) werden.

5.2.1 LOIN – Bedingungen

Um die Frage hinsichtlich des LOIN mit Bezug auf die geologischen Eigenschaften zu beantworten, benötigt es gemäß ÖNORM EN 17412-1 [10], [11] u.a. die Definition eines Anwendungsziels für welches ein 3D-Baugrundmodell erforderlich ist.

Dies kann gem. Kapitel 3.3 wie folgt formuliert werden:

Anwendungsziel: Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für geotechnische Planung

Beschreibung: Erstellung und Fortschreibung eines digitalen schematischen Baugrundmodells.

Bereitstellung von geologisch-geotechnischen Daten für die weiterführende Planung in einem fortschreibbaren digitalen Baugrundmodell. Dabei erfolgt in einem digitalen geologischen Basismodell die Auswertung und Interpretation erforderlicher geologischer-geotechnischer Parameter und deren Einarbeitung in ein digitales, schematisches, trassennahes Ausbruchskörpermodell. Die Erstellung des digitalen Modells beginnt mit den ersten Erhebungen zu den geologischen Gegebenheiten im Projektbereich und wird setig über die weiteren geologischen Bearbeitungsphasen (u.a. Grundlagenerhebung, Erkundungsplanung, Erkundungsphase, Interpretation) fortgeführt. Somit erfolgt die digitale Erstellung eines Baugrundmodells, in welchem schematische Ausbruchskörper mit sämtlichen vorhandenen Grundlagendaten (Fakten) als Eigenschaften belegt sind. Es erfolgt projektspezifisch die Definition des Projektbereiches, sowie der zu bearbeitenden Trasse, bzw. der Trassenvarianten.

Gemäß ÖNORM EN 17412-1 werden die definierten Voraussetzungen, um den Grad des Informationsbedarfs und die Art und Weise der Informationsbereitstellung zu bestimmen, wie nachfolgend in Abbildung 5-3 dargelegt erfüllt:

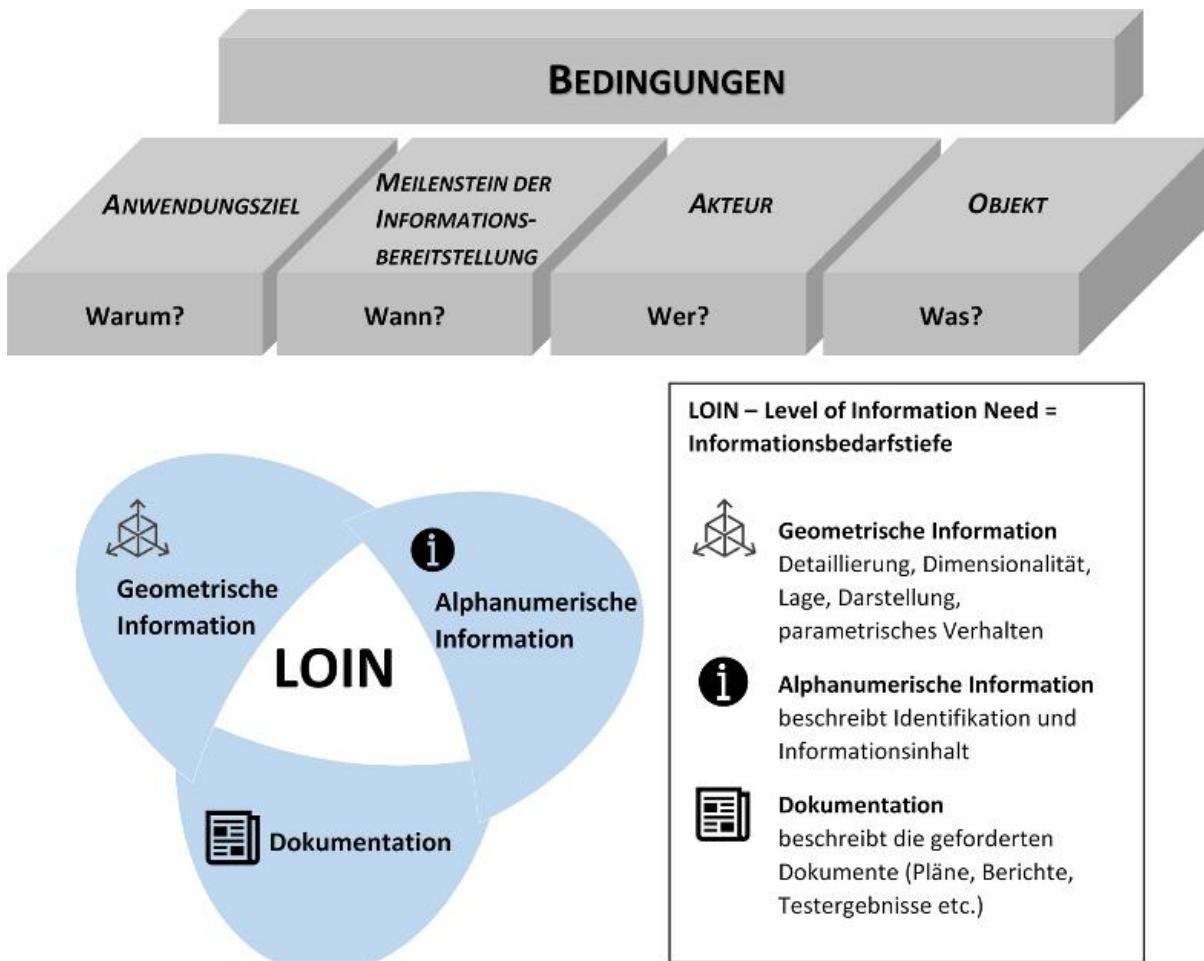


Abbildung 5-3: Darstellung der Relationen der Informationsbedarfstiefe (Kapitel 3.3)

Um das definierte Ziel zu erreichen, benötigt es somit die Definition des LOIN. Dies entspricht der Festlegung der in der Modellierung grundsätzlich erforderlichen und projektspezifisch zu verwendenden geologisch-geotechnischen Eigenschaften.

5.2.2 LOIN – Geometrie

Die Erstellung eines schematischen, parametrisierten Baugrundmodells (siehe Abbildung 5-4) entlang des geplanten Trassenverlaufes ermöglicht, komplexe geologische Gegebenheit mit Bezug zur Bauwerkstrasse komprimiert abzubilden. Die hierfür notwendigen Daten (Fakten) werden aus der laufenden geologischen Planung und Erkundung erhoben (siehe Abbildung 5-2). Die laufende Auswertung und Interpretation dieser Daten und deren Aktualisierung sowie Zuweisung zu den Ausbruchskörpern im Tunnelinformationsmodell, ermöglicht eine stete Neubewertung und zielgerichtete, effektive geologische Planung und Erkundungsdurchführung. Hierzu sind die Erstellung und Wartung eines weitläufigen Baugrundmodells nicht unmittelbar notwendig.

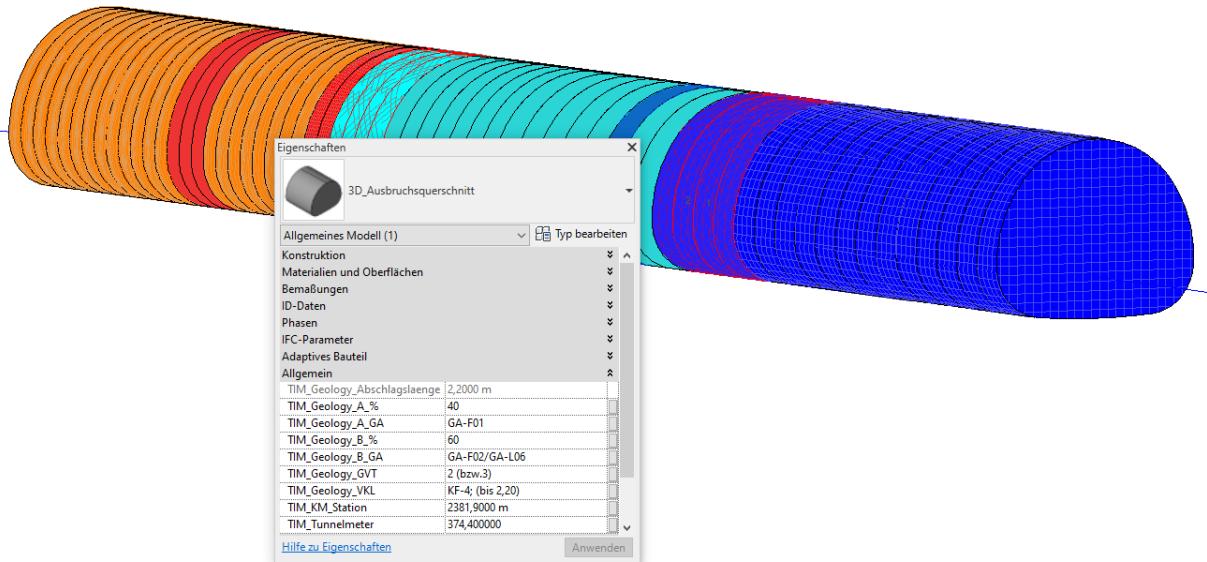


Abbildung 5-4: Darstellung eines trassennahen schematischen Baugrundmodells, schematische Ausbruchskörper

Um das schematische Baugrundmodell auch für weitere Planungsschritte verwenden zu können, ist es somit notwendig das Modell von Beginn an auf diese Anforderungen hin zu strukturieren, bzw. entsprechende Eigenschaften zu definieren und einzupflegen.

Dies gilt nicht nur für das schematische Baugrundmodell, sondern auch für die verschiedenen Baugrundelemente, welche in einem digitalen Baugrundmodell verwendet werden können.

5.2.3 LOIN – Information

Die aktuellen Grundanforderungen an den geologischen Informationsgehalt (LOIN) eines Baugrundmodells und dessen Elemente ergeben sich aus den (nationalen) Normen [20]-[23] und Richtlinien wie den ÖGG-Richtlinie für Untertagebau [3], der ÖGG- Richtlinie für Tiefliegende Tunnel [5], sowie der ÖGG-Empfehlung für Baugeologische Dokumentation bei der Ausführung von Untertagebauwerken [4]. Innerhalb des weiteren DACH-Raumes finden sich sowohl in der DAUB-Empfehlung zur Planung und Bau von Tunnelbauwerken (2004) [5] und der SIA 260 (Nutzungsvereinbarung) [24] mögliche Kriterien.

Die digitale Aufbereitung dieser Vorgaben wird auch in der DAUB-Empfehlung „Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten (2022)“ [9] dargelegt.

Aus den angeführten normativen Grundlagen, Richtlinien und Empfehlungen ergibt sich eine äußerst große Anzahl an möglichen Schlüsselparametern, Daten und Attributen, welche in der Erstellung eines geologisch-geotechnisches Tunnelinformationsmodells Verwendung finden sollen. Tatsächlich ist jedoch nur eine reduzierte Auswahl von Kennwerten, bzw. Eigenschaften für die Planung der meisten Tunnelbauprojekte notwendig.

5.2.4 LOIN – Dokumente

Die Dokumentation beinhaltet erforderliche und projektspezifische ergänzende (digitale) Schriftstücke und Nachweise. Dazu zählen unter anderem Pläne, Berichte, Bohrprofile, Prüfprotokolle und Versuchsergebnisse.

Der LOIN legt den Umfang und die Spezifikationen (einschließlich Datenformat) der Dokumentation für jede Projektphase fest (siehe Abbildung 5-5). Dies fördert Transparenz und Nachvollziehbarkeit im Projektverlauf und gewährleistet eine umfassende Erfassung des gesamten Prozesses – von der Planung über die Ausführung bis hin zu Betrieb und Wartung des Bauwerks.

5.2.5 Definition des LOIN – Auswahl der Eigenschaften

Aus den vorliegenden Forschungsergebnissen ergibt sich eine Mindestanforderung an geologisch-geotechnische Schlüsselparameter, welche für eine dynamische Modellerstellung und Weiterentwicklung (Modellevolution) von Projektbeginn an über die geologische Prognose bis zur geotechnischen Planung, grundlegend vorhanden sein und gepflegt werden sollten.

Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die für eine effektive weiterführende Planung notwendigen geologischen Eigenschaften projektspezifisch von Auftraggeber und geologisch-geotechnischen Planungsverantwortlichen bestimmt werden sollen.

Dieser Basissatz an erforderlichen Eigenschaften ist über die geologischen Planungsphasen hinaus als Grundlageninformation im Modell vorzuhalten, da diese für die geotechnische Planung, Ausführungsplanung und Bauausführung relevante Informationen für unterschiedliche Fragestellungen und eine Evaluierung zugänglich sein sollten. Auch in den weiteren Phasen des Lebenszyklus der Bestandspflege und für den Sanierungsbedarf sind die ausgewählten Schlüsselparameter gleichermaßen von Bedeutung.

Für die Umsetzung der fortschreibbaren modellgestützten geologischen Prognose im Tunnelinformationsmodell als Grundlage für die geotechnische Planung sowie die interdisziplinäre Ausführungsdocumentation erfolgt die Auswahl von Modelleigenschaften gemäß den geologischen Planungsphasen (gem. Abbildung 5-2). Diese geologisch-geotechnischen Schlüsselparameter, auch unter Berücksichtigung der Schlüsselparameter der ÖGG-Richtlinie [3], werden als erforderliche und projektspezifische Eigenschaften ausgewiesen.

Abbildung 5-5 bildet beispielhaft die Beschreibung des LOIN für verschiedene Baugrundelemente in verschiedenen geologischen Planungsphasen ab.

Anwendungsziel:	Objekt:	Objekt:	Objekt:	Objekt:
Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für geotechnische Planung	Geländeaufschluss	Tiefenaufschluss, Bohrung	Bodengeophysik, Seismik	Schematischer Ausbruchskörper
Meilenstein Phase	Phase 1b:	Phase 3:	Phase 3:	Phase 4:
Akteur: geologisches Fachpersonal	Grundlagenerhebung, Geländeaufnahme, Evaluierung	Erkundung	Erkundung	Interpretation für Geotechnik
Geometrische Information	Detaillierung	schematisch	detailliert	detailliert/realistisch vereinfacht auf Gebirgsarten (GA) reduziert
	Dimensionalität	3D	3D	2D oder 3D 3D
	Lage	absolut, Koordinaten	absolut, Koordinaten Geländeoberkante und Endteufe	absolut, Koordinaten Eindringtiefe absolut: Koordinaten relativ: Tunnelachse
	Darstellung	Kugel mit Streich – und Fallzeichen	Zylinder, realistisch	Linien, Flächen Zylinder
	parametrisches Verhalten	ja	ja	ja
Alphanumerische Information	Identifikation	Aufschlusstyp, Aufschluss_Identifikation	Aufschlusstyp Bohrungs_ID	Aufschlusstyp Seismikprofil_ID Bauwerk Station (km oder Tunnelmeter)
	Informations-gehalt	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinaten • geologische Beschreibung • Orientierung der geologischen Strukturen (Einfalten und Streichen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinaten Geländeoberkante und Endteufe • Durchmesser • Ausbau • Nutzung • Schichtaufbau • geologische Beschreibung • Wasserstand absolut • Teufe bzw. Koordinaten von Kernproben und Versuchen in situ und Labor 	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinaten • Profillänge • Schichtaufbau • Orientierung zum Bauwerk • Referenzaufschluss <ul style="list-style-type: none"> • Koordinaten • Durchmesser • Ausbruchsfäche • Gebirgsart • geologische Beschreibung • Vortriebsart • Überlagerung • Wasserzutritt • Prognosesicherheit
		weitere Eigenschaften gem. Phase 1b bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 3 bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 4 bzw. projektspezifischer Definition
Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> • Geländekartierung • geologische Karte Bestand und evaluiert • Aufschluss-dokumentation • Fotodokumentation • Gesteinsproben 	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrprofil • Fotodokumentation • Bohrlochmessungen • Wasserstandsdaten • bestehende geologisch-geotechnische Berichte 	<ul style="list-style-type: none"> • Seismikprofile • Referenzaufschluss • Auswertung • Fotodokumentation 	<ul style="list-style-type: none"> • Gebirgsartenbeschreibung • geologische Berichte • Versuchsberichte • Laborergebnisse • Fotodokumentation • Bohrkernfotos

Abbildung 5-5: Beschreibung des LOIN verschiedener Baugrundelemente (Kapitel 3.3)

Die endgültige Auswahl optional zu verwendender Eigenschaften hat projektspezifisch zu erfolgen. Eine frühzeitige Abstimmung zwischen den Fachbereichen Geologie und Geotechnik führt hierbei zu einer effektiven Modellierung. Eine Zuweisung des Informationslieferanten ist somit ebenfalls projektspezifisch durchzuführen.

Abbildung 5-6 zeigt, wie der LOIN für das Element Bohrung – als weiteres Beispiel – festgelegt und beschrieben werden kann.

Anwendungsziel:	Objekt:	Objekt:	Objekt:	Objekt:	
Bereitstellung geologisch-geotechnischer Informationen für geotechnische Planung	Tiefenaufschluss, Bohrung	Tiefenaufschluss, Bohrung	Tiefenaufschluss, Bohrung	Tiefenaufschluss, Bohrung	
Meilenstein Phase	Phase 1a+b:	Phase 2:	Phase 3:	Phase 4:	
Akteur: geologisches Fachpersonal	Grundlagenerhebung, Geländeaufnahme, Evaluierung	Erkundungsplanung auf Basis erster Prognose der Geologie	Erkundung	Interpretation für Geotechnik	
Geometrische Information	Detaillierung	vereinfacht	vereinfacht	detailliert	vereinfacht auf Gebirgsarten (GA) reduziert
	Dimensionalität	3D	3D	3D	3D
	Lage	absolut, Koordinaten	absolut, Koordinaten, Neigung/Richtung geplant	absolut, Koordinaten Geländeoberkante und Endteufe	absolut, Koordinaten Geländeoberkante und Endteufe
	Darstellung	Zylinder, schematisch	Zylinder, schematisch	Zylinder, realistisch	Zylinder
	parametrisches Verhalten	ja	ja	ja	ja
Alphanumerische Information	Identifikation	Aufschlusstyp Bohrungs_Identifikation	Aufschlusstyp Bohrungs_Identifikation	Aufschlusstyp Bohrungs_Identifikation	Aufschlusstyp Bohrungs_Identifikation
	Informationsgehalt	<ul style="list-style-type: none"> Koordinaten Geländeoberkante und Rohroberkante Durchmesser Endteufe gem. Bohrprofil und Evaluierung Ausbau Nutzung Schichtaufbau geologische Beschreibung Wasserstand 	<ul style="list-style-type: none"> Koordinaten Geländeoberkante Neigung/Richtung und Endteufe geplant Durchmesser Bohrung und Ausbau geplant Nutzung Prognose Schichtaufbau Prognose geologische Beschreibung Prognose Wasserstand Versuche geplant in situ Versuche geplant Labor 	<ul style="list-style-type: none"> Koordinaten Geländeoberkante und Endteufe Durchmesser Ausbau Nutzung Schichtaufbau geologische Beschreibung Wasserstand absolut Teufe bzw. Koordinaten von Kernproben und Versuchen n situ und Labor 	<ul style="list-style-type: none"> Koordinaten Durchmesser Endteufe Ausbau Nutzung Schichtaufbau geologische Beschreibung geotechnische Beschreibung Wasserstand absolut Teufe bzw. Koordinaten Kernproben und Versuche in situ, Laborversuche
	weitere Eigenschaften gem. Phasen 1a+b bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 2 bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 3 bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 4 bzw. projektspezifischer Definition	weitere Eigenschaften gem. Phase 4 bzw. projektspezifischer Definition
	Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> Bohrprofil bestehende geologisch-geotechnische Berichte Feldprotokoll Evaluierung Mängel Wasserstandsdaten 	<ul style="list-style-type: none"> Grundstück Eigentümer bestehende geologisch-geotechnische Berichte Einbauten 	<ul style="list-style-type: none"> Bohrprofil Fotodokumentation Bohrlochmessungen Wasserstandsdaten bestehende geologisch-geotechnische Berichte 	<ul style="list-style-type: none"> Bohrprofile Bohrberichte Wasserstandsdaten Versuchsberichte Laborergebnisse Fotodokumentation Bohrkernfotos projektspezifisch erstellte geologisch-geotechnische Berichte

Abbildung 5-6: Informationsbedarfstiefe für das Element Bohrung Phasen 1-4 (Kapitel 3.3)

Es zeigt sich gemäß Kapitel 3.3, dass für die unterschiedlichen geologischen Planungsphasen unterschiedliche Informationen bzw. Eigenschaften benötigt werden. In den Phasen 1a und 1b der geologischen Planung werden erste Daten mit Bezug auf ein geplantes Bauwerk erhoben.

Maßgeblich hierbei sind die geometrischen Informationen, auf deren Basis sich eine erste Prognose zur Baugrundsituation ergibt. Da Bestandsdaten zu Tiefenaufschlüssen meist unterschiedlichste Informationstiefen und Strukturierungen aufweisen, ist eine schematische Darstellung der vorhandenen geologischen Informationen in einem ersten Modellstadium ausreichend. Nach erfolgter Evaluierung kann eine Anpassung der geometrischen und alphanumerischen Informationen erfolgen. Auf Basis dieser Informationen erfolgt die Erkundungsplanung (Phase 2), um modellbasiert festgestellte Informationsdefizite aufzufüllen und eine Kostenschätzung der Erkundungsmaßnahmen zu erleichtern. In der Erkundung (Phase 3) werden auf Basis der vorgegebenen Eigenschaften weitere Daten erhoben und mit einem hohen Detaillierungsgrad laufend im Model implementiert. In der 4. Phase erfolgt auf Basis der vorhandenen und fortgeschriebenen Informationen deren Interpretation, Zusammenfassung und Generalisierung gemäß der Anforderung der geotechnischen Planung.

Es wird mit diesem Beispiel aufgezeigt, dass ein klar definierter LOIN eine effiziente und fortschreibbare Modellerstellung ermöglicht. Die Vorgabe von Eigenschaften, die in einem Baugrundmodell ab der ersten geologischen Planungsphase implementiert und um projektspezifische Eigenschaften ergänzt werden können, ermöglicht eine stete Defizitanalyse und laufende Anpassungen zur effektiven Planung und Projektbearbeitung.

5.2.5.1 Erforderliche Eigenschaften – „Schlüsselparame^r“

In den verschiedenen Phasen der geologischen Planung und Erkundung (Kapitel 2.3) werden unterschiedlichste Informationen zu den festgelegten Eigenschaften erhoben.

Die Definition von Eigenschaften für ein geologisches digitales Modell nach der BIM-Methode ist ein zentraler Aspekt für eine erfolgreiche digitale Bauwerksplanung. Ohne klar definierte Eigenschaften verliert das Modell seine Funktionalität und Integrität, da es an den notwendigen Informationen mangelt, um fundierte Entscheidungen zu treffen oder Änderungen nachzuvollziehen.

Geologische Eigenschaften im Tunnelinformationsmodell sind mehr als nur technische Details; sie repräsentieren die Schlüsselparame^r, die für die Modellierung von geologischen Bauelementen erforderlich sind. Falls diese Eigenschaften klar definiert sind, können alle Projektbeteiligten auf dieselben, Informationen zugreifen. Nur wenn die Eigenschaften korrekt und standardisiert sind, kann der Datenaustausch zwischen verschiedenen Systemen reibungslos erfolgen.

Die Definition von Eigenschaften für ein Tunnelinformationsmodell ist kein optionaler Schritt, sondern eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung von Bauprojekten. Als Ergebnis der durchgeföhrten Forschung und unter Bezugnahme des Eurocode 7 [18] und der ÖGG-Richtlinie [4] zeigt sich, dass in allen Phasen der geologischen Planung sichergestellt

werden muss, dass die erforderlichen Eigenschaften folgender Themenbereiche verpflichtend erhoben, eingepflegt und evaluiert werden.

- Geologisch-lithologische Beschreibung
- Struktureogeologische Merkmale
- Räumliche Orientierung von lithologischen Strukturen und Trennflächen.
- Verortungen von Referenzaufschlüssen (Gelände, Bohrungen, Schurf, etc.)
- Verbandsfestigkeit und Zerlegung
- Korn- und Blockgrößen
- Geogene Gefahren (Gas)
- Prognosesicherheit
- Hydrogeologie

Diese Themenbereiche umfassen unter anderem erforderliche Eigenschaften welche in nachfolgender Tabelle angeführt sind.

5.2 Die modellgestützte geologische Prognose – Festlegung des LOIN für Elemente des Baugrundmodells

75

Liste der Eigenschaften:						
Name	Beschreibung	Kurzname Symbol	SI-Einheit wenn anwendbar	Wertebereich wenn anwendbar Min Max		
Nr.	Eigenschaft Geologie allgemein					
1	Tektonische Einheit				Text	
2	Stratigraphische Einheit				Text	
3	Lithologische Einheit				Text	
4	Gesteinsart				Text	
5	Raumstellung/Orientierung				Text	
5-1	Orientierung Gefüge - Hauptorientierung Azimuth	gemessene Fallrichtung / Einfalten in Grad (°/')	DipDir	*	0 360	reelle Zahl Geogenkompass oder Fotogrammetrie
5-2	Orientierung Gefüge - Hauptorientierung Einfallwert (°)	gemessene Fallrichtung / Einfalten in Grad (°)	Dip	*	0 90	reelle Zahl Geogenkompass oder Fotogrammetrie
5-3	Orientierung Schichtflächen (ss) Azimuth	gemessene Fallrichtung / Einfalten in Grad (°/')	DipDir	*	0 360	reelle Zahl Geogenkompass oder Fotogrammetrie
5-4	Orientierung Schichtflächen (ss) Einfallwert	gemessene Fallrichtung / Einfalten in Grad (°)	Dip	*	0 90	reelle Zahl Geogenkompass oder Fotogrammetrie
5-5	Orientierung Schieferungsflächen (sf) Azimuth	gemessene Fallrichtung / Einfalten in Grad (°/')	DipDir	*	0 360	reelle Zahl Geogenkompass oder Fotogrammetrie
5-6	Orientierung Schieferungsflächen (sf) Einfallwert	gemessene Fallrichtung / Einfalten in Grad (°)	Dip	*	0 90	reelle Zahl Geogenkompass oder Fotogrammetrie
5-7	Orientierung Trennflächen (St, H, K) Azimuth	gemessene Fallrichtung / Einfalten in Grad (°/')	DipDir	*	0 360	reelle Zahl Geogenkompass oder Fotogrammetrie
5-8	Orientierung Trennflächen (St, H, K) Einfallwert	gemessene Fallrichtung / Einfalten in Grad (°)	Dip	*	0 90	reelle Zahl Geogenkompass oder Fotogrammetrie
6	Geobasisart (Fels)	Festlegung gemäß Grundlagen	GA+Nr.	—	1	x Text / reelle Zahl
7	Geobasisart Lockermaterial	Festlegung gemäß Grundlagen	GA-L-Nr.	—	1	x Text / reelle Zahl
8	Geogene Gefahren (Radioaktivität, Bergleider etc.)	Beschreibung: angetroffen / vermutet	—	mSv/a, Bq/m ³	0 1	Text
9	Geogene Gefahren Gas (Methan, Schwefel, etc.)	Beschreibung: angetroffen / vermutet	—	% UEG	0 1	Text
10	Erdbebenze	Bestimmung (z. Bsp. hoch-mittel-spring)	—	—	1 3	Text / reelle Zahl öffentlichen Stellen
11	Geothermie	Bestimmung (z. Bsp. hoch-mittel-spring)	—	—	—	Text öffentlichen Stellen
12	Prognosicherheit	auf Basis vorhandener Grundlagen	—	—	1 3	Text / reelle Zahl Abstimmung Koordinatenystem notwendig
13	Koordinaten Referenzauflösungen	Angabe der Lage von Aufschlüssen	X, y, z	—	—	reelle Zahl Geogenkompass oder Fotogrammetrie

Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften							
Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaufnahme	Phase: Erkundung	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung
Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]
Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]
Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]
Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]
reelle Zahl	Geogenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]
reelle Zahl	Geogenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]

Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften							
Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaufnahme	Phase: Erkundung	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung
Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]
Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]
Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]
Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]
reelle Zahl	Geogenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]
reelle Zahl	Geogenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]

Tabelle 5-2: Auszug aus der Eigenschaftenliste der erforderlichen Eigenschaften (siehe Anhang 9.1)

Eine ausführliche Liste zu den maßgeblichen Eigenschaften mit den normativen Verweisen und Phasenzuordnungen findet sich in Anhang 9.1. Die Liste wird in Anlehnung an die Vorgaben für „Merkmalserver als Kommunikationsmittel für die Bauwirtschaft“ [32] erstellt. Diese ausgewählten, erforderlichen Eigenschaften definieren somit klar das geologische digitale Modell als solches.

5.2.5.2 Projektspezifische Eigenschaften

Projektspezifisch sind über die verschiedenen Phasen der geologischen Planung hinweg weiterer Eigenschaften in einem Baugrundmodell zu erheben und zu berücksichtigen (siehe Anhang 9.1). Auch die projektspezifisch festzulegenden Eigenschaften aus den Themenbereichen Geologie, Geotechnik, Georisiko und Hydrogeologie werden den verschiedenen geologischen Planungsphasen zugewiesen.

Liste der Eigenschaften:							Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften							
	Name	Beschreibung	Kurzname Symbol	SI-Einheit wenn anwendbar	Wertebereich wenn anwendbar		Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaufnahme	Phase: Erkundung In-Situ/Labor	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung
Nr.	Eigenschaft Festgestein													
1	Mineralogische Zusammensetzung (je Mineral)	Petrographische Bestimmung	—	%	0 — 100		reelle Zahl	Im Gelände und Labor	ÖNORM EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]
2	Verwitterungsgrad	Bestimmung des Verwitterungsstatus	v	—	0 — 5		Text / reelle Zahl	—	—	x	x	x	x	[PrSp]
3	Veränderlichkeit (nicht - stark)	Beschreibung der Veränderlichkeit	—	—	—		Text	am frischen Aufschluss	EN-ISO 14689	x	x	x	x	[PrSp]
4	Einaxiale Druckfestigkeit (UCS)	Bestimmung der Festigkeit des Gesteins	σ_u	MPa	0,6 — > 250		Text / reelle Zahl	Im Labor mittels Versuch oder mit Rückprallhammer	EN-ISO 14689	x	x	x	x	[PrSp]
5	Zugfestigkeit	Bestimmung der Festigkeit des Gesteins	σ_t	MPa	—		reelle Zahl	Im Labor mittels Versuch	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[PrSp]
6	Wichte	Bestimmung der Wichte	γ	kN/m³	—		reelle Zahl	—	ÖNORM EN 1997-1	x	x	x	x	[PrSp]
7	Höck-Brown-Konstante	Bestimmung zum Bruchkriterium eines Gesteins	—	m_b	—		reelle Zahl	—	ÖGG Rili	x	x	x	x	[PrSp]
8	Schwell-/Quellpotential (Druck und Hebung)	Bestimmung Auswirkung der Volumenzunahme bei Wasseraufnahme	α_h	MPa, %	0 — 100		reelle Zahl	schwieliges Anthydrit-Gips quellen = Tone	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[E]
9	Quelldehnung (Quellpotential) nach Kaiser/Henke (1975)	Bestimmung Auswirkung der Volumenzunahme bei Wasseraufnahme	$\epsilon_{q,u}$	%	0 — 100		reelle Zahl	—	DGGT-Empfehlung Nr. 11	x	x	x	x	[PrSp]
10	Quelldruckäquivalenzwert (Quelldruck) nach Kaiser/Henke (1975)	Bestimmung Auswirkung der Volumenzunahme bei Wasseraufnahme	$\sigma_{q,A}$	kN/m²	—		reelle Zahl	—	DGGT-Empfehlung Nr. 11	x	x	x	x	[PrSp]
11	max. Quelldehnung von Quellsversuch nach Huder/Amberg (1970)	Bestimmung Auswirkung der Volumenzunahme bei Wasseraufnahme	$\epsilon_{q,max}$	%	0 — 100		reelle Zahl	—	DGGT-Empfehlung Nr. 11	x	x	x	x	[PrSp]
12	max. Quelldruckspannung nach Huder/Amberg (1970)	Bestimmung Auswirkung der Volumenzunahme bei Wasseraufnahme	$\sigma_{q,max}$	kN/m²	—		reelle Zahl	—	DGGT-Empfehlung Nr. 11	x	x	x	x	[PrSp]
13	Äquivalenter Quarzgehalt	Bestimmung des Quarzgehaltes	n_{Qu}	%	0 — 100		reelle Zahl	aus Dünnschliff, Labor	ÖGG Rili	x	x	x	x	[PrSp]
14	Cerchar Abrasivity Index	Bestimmung der Abrasivität	CAI	—	—		reelle Zahl	Verschleißprognose	ÖGG Rili	x	x	x	x	[PrSp]
15	Rock Abrasivity Index	Bestimmung der Abrasivität	RAI	—	—		reelle Zahl	Verschleißprognose	—	x	x	x	x	[PrSp]
16	Almen-Vane Steel	Bestimmung der Abrasivität	AVS	[mg]	—		reelle Zahl	Verschleißprognose	—	x	x	x	x	[PrSp]
17	Cutter Life Index	Bestimmung der Abrasivität	CLI	—	—		reelle Zahl	Verschleißprognose	—	x	x	x	x	[PrSp]
18	DrillingRate Index	Bestimmung der Abrasivität	DRi	—	—		reelle Zahl	Verschleißprognose	—	x	x	x	x	[PrSp]
19	Spatzufestigkeit	Bestimmung der Festigkeit des Gesteins	—	MPa	—		reelle Zahl	Im Labor mittels Versuch	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[PrSp]
20	Zähigkeit (rechnerisch ermittelt)	Berechnung der Zähigkeit: UCS-BTS	TC	—	—		reelle Zahl	mechanische Eigenschaft	ÖGG Rili	x	x	x	x	[PrSp]
21	Poissonzahl	Bestimmung der Querdehnzahl	ν_i	—	—		reelle Zahl	mechanische Eigenschaft	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[PrSp]
22	Dichte	Bestimmung der Dichte	ρ	g/cm³	—		reelle Zahl	—	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[PrSp]
23	Elastizitätsmodul (E-Modul)	Bestimmung der Steifigkeit	E _{40:40}	MPa	—		reelle Zahl	Verhältnis von Spannung zu Dehnung	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 17892-7/8/9	x	x	x	x	[PrSp]

Liste der Eigenschaften:						
	Name	Beschreibung	Kurzname Symbol	SI-Einheit wenn anwendbar	Wertebereich wenn anwendbar	
					Min	Max
Nr.	Eigenschaft Festgestein					
1	Mineralogische Zusammensetzung (je Mineral)	Petrographische Bestimmung	—	%	0 — 100	
2	Verwitterungsgrad	Bestimmung des Verwitterungsstatus	v	—	0 — 5	
3	Veränderlichkeit (nicht - stark)	Beschreibung der Veränderlichkeit	—	—	—	
4	Einaxiale Druckfestigkeit (UCS)	Bestimmung der Festigkeit des Gesteins	σ_u	MPa	0,6 — > 250	
5	Zugfestigkeit	Bestimmung der Festigkeit des Gesteins	σ_t	MPa	—	
6	Wichte	Bestimmung der Wichte	γ	kN/m³	—	

Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften							
Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaufnahme	Phase: Erkundung	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung
					In-Situ/Labor		
reelle Zahl	Im Gelände und Labor	ÖNORM EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]
Text / reelle Zahl	Im Gelände und Labor	EN-ISO 14689		x	x	x	[PrSp]
Text	am frischen Aufschluss	EN-ISO 14689		x	x	x	[PrSp]
Text / reelle Zahl	Im Labor mittels Versuch oder mit Rückprallhammer	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 14689		x	x	x	[PrSp]
reelle Zahl	Im Labor mittels Versuch	ÖNORM EN 1997-2			x	x	[PrSp]
reelle Zahl	—	ÖNORM EN 1997-1			x	x	[PrSp]

Tabelle 5-3: Auszug aus der Eigenschaftenliste der projektspezifischen Eigenschaften (siehe Anhang 9.1)

Diese Liste wird ebenfalls in Anlehnung an die Vorgaben für „Merkmalsserver als Kommunikationsmittel für die Bauwirtschaft“ [32] erstellt.

Mit diesen weiteren, projektspezifisch verwendbaren Eigenschaften, wird das Baugrundmodell im Detail geschärft und gemäß dem LOIN für die notwendigen Projektabschnitte ergänzt.

5.3 Ergebniszusammenfassung

Im Zuge der vorliegenden Forschungsarbeit werden zum einen die Anforderungen an die modellgestützte geologische Prognose auf Basis der geltenden Normen und Richtlinien zur geologischen Planung (u.a. Eurocode 7, ÖGG-Richtlinien) ausgearbeitet, in BIM-Modellierprozesse umgesetzt und mit den normativen Vorgaben zu BIM (ÖNORMEN EN 17412-1 und EN ISO 19650-1) harmonisiert.

Zum anderen erfolgt eine Definition des LOIN zu ausgewählten Baugrundelementen (Artikel 3) sowie die Auswahl und Festlegung von erforderlichen und projektspezifischen geologischen

Eigenschaften, welche in einem digitalen Baugrundmodell enthalten sein müssen (Kapitel 5.2.5).

In Bezug auf die Modellierung von Baugrund ist es unumgänglich, standardisierte und vorgegebenen Basisinformationen mit Bezug auf den Eurocode 7 [18] und die ÖGG-Richtlinie [3] vorzugeben, damit ein Baugrundmodell auch als solches definierbar und eindeutig erkennbar ist.

Über die verschiedenen Phasen der geologischen Planung hinweg sind diese ausgewählten Eigenschaften gemäß den normativen Vorgaben zu erheben, einzuarbeiten, aktuell zu halten und zu evaluieren (siehe Kapitel 2.3).

Speziell bei einem komplexen Modelliergegenstand wie der Geologie bzw. des Baugrundes ist eine fortlaufende Neuinterpretation der Gegebenheiten aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen wie zum Beispiel die Interaktion mit der geotechnischen Planung unumgänglich. Eine schematisierte Modellierung der Geologie ist für eine automatisierte Aktualisierung von Vorteil.

Unter Verwendung der erforderlichen und projektspezifischen geologisch-geotechnischen Eigenschaften kann der LOIN für ein Baugrundmodell standardisiert festgelegt werden. Somit kann die modellgestützte geologische Prognose im Tunnelinformationsmodell als Basis für die geotechnische Planung erfolgen.

6 Diskussion und Beantwortung der Forschungsfrage

Die vorliegende Dissertation widmet sich der Integration geologischer Planungsprozesse in Building Information Modeling unter Berücksichtigung der geltenden Normen und Richtlinien. Im Zentrum steht die Definition des Level of Information Need (LOIN) für die geologischen Eigenschaften in einem Tunnelinformationsmodell und die Integration dieser Vorgaben in die geologische Planung gemäß dem Eurocode 7 [18] und den relevanten ÖGG-Richtlinien [3]-[5]. Dabei werden auch die BIM-ÖNORMEN EN 17412-1 [10], [11] und EN ISO 19650-1 [12], [13] berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Forschungsfrage

Wie lässt sich der Level of Information Need (LOIN), sprich die Informationsbedarfstiefe [10], [11], welcher die strukturierte Bereitstellung und Detaillierung von Informationen gemäß den Anforderungen bestehender Standards gewährleistet, in einem schematischen Tunnelinformationsmodell mit Bezug auf die geologischen Eigenschaften über die verschiedenen Projektphasen hinweg definieren und

wie lassen sich die Vorgaben bestehender Standards zur geologischen Planung und Prognose, sowie zu deren Ergebnissen gem. Eurocode 7 [18] und der ÖGG-Richtlinien [3]-[5] mit den BIM-Grundlagen gem. den ÖNORMEN EN 17412-1 und EN ISO 19650-1 [10]-[13] harmonisieren und darstellen?

durchaus als weitestgehend beantwortet betrachtet werden kann. Durch die vorliegenden Ausarbeitungen (Analyse von Datenquellen und Interviews, Erarbeitung von Artikeln, Versuchsprojekten) konnten die dafür notwendigen Erkenntnisse gewonnen werden.

Die modellgestützte geologische Prognose im Tunnelinformationsmodell bzw. die Digitalisierung der geologischen Prognose als Grundlage für die geotechnische Planung sowie die interdisziplinäre Ausführungsdocumentation ist somit gemäß der erfolgten Forschung durchaus umsetzbar.

6.1 Definition des LOIN im Tunnelinformationsmodell

Die Definition des LOIN im geologischen Kontext wurde erfolgreich auf Basis der aktuellen Normen und Richtlinien vorgenommen. Die Forschung zeigt, dass es möglich ist, den Informationsbedarf im Tunnelinformationsmodell so festzulegen, dass er die Anforderungen an die geologische Planung in verschiedenen Projektphasen erfüllt. Dies wird durch eine detaillierte Analyse der geologischen Planungsphasen und die Identifikation der wesentlichen

Schlüsselparameter erreicht, welche über den gesamten Projektverlauf hinweg erfasst und aktualisiert werden.

Der in dieser Arbeit definierte LOIN ermöglicht eine strukturierte Modellierung der geologischen Gegebenheiten entlang der Trasse. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine frühzeitige Festlegung von erforderlichen Basisinformationen und Eigenschaften die projektspezifisch angepasst werden können, insbesondere im Hinblick auf die geologische Erkundung und die Ausführung, eine effiziente Planung und Durchführung unterstützt. Die Implementierung eines trassennahen, schematischen Baugrundmodells ermöglicht zudem eine präzisere Bearbeitung der geologischen Daten und deren Integration in die weiteren Planungsphasen.

6.2 Harmonisierung von Normen und Richtlinien

Der zweite Teil der Fragestellung betraf die Harmonisierung der Vorgaben aus der geologischen Planung gemäß Eurocode 7 [18] und der ÖGG-Richtlinien [3]-[5] mit den BIM-Grundlagen gemäß den ÖNORMEN EN 17412-1 [10], [11] und EN ISO 19650-1 [12]. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass eine erfolgreiche Harmonisierung möglich ist. Die in dieser Arbeit entwickelten Modelllösungen tragen dazu bei neue Ansätze für die modellbasierte geologische Prognose zu entwickeln. Dies stellt einen wichtigen Schritt zur Standardisierung von Baugrundmodellen in BIM-Projekten dar. So wird gewährleistet, dass die geologische Planung und Prognose sowie die geotechnische Analyse auf einer gemeinsamen Informationsbasis (SSOT) beruhen. Die Verwendung von abgestimmten geologischen und geotechnischen Eigenschaften in den Modellen verbessert die Prognosesicherheit und erleichtert die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Geologen, Geotechnikern und Bauingenieuren. Diese Standardisierung ist besonders wertvoll, da sie die Konsistenz und Vergleichbarkeit der Daten über verschiedene Projekte hinweg sicherstellt und somit die Qualität der geotechnischen Planung und Bauausführung erhöht. Durch die Festlegung eines klar definierten LOIN können geologische und geotechnische Planungsanforderungen erfolgreich in das Tunnelinformationsmodell integriert werden. Dies führt zu einer verbesserten Interoperabilität und Koordination zwischen den verschiedenen Fachdisziplinen, die an der Tunnelplanung beteiligt sind.

Die Arbeit zeigt, dass die Festlegung der zu verwendenden Eigenschaften und die Definition der Informationsbedarfstiefe von zentraler Bedeutung sind, um eine konsistente Modellierung sicherzustellen. Durch die Harmonisierung bestehender Standards und die Entwicklung neuer Vorgaben wurde ein Grundgerüst für die geologische Modellierung im BIM-Kontext geschaffen, das künftig als Basis für weitere Entwicklungen in diesem Bereich dienen kann.

6.3 Implikationen für die Praxis und zukünftige Forschung

Die gewonnenen Erkenntnisse haben bedeutende Implikationen für die Praxis. Insbesondere die Möglichkeit, geologische Informationen kontinuierlich in ein fortschreibbares Modell zu integrieren, bietet erhebliche Vorteile für die Erstellung der geologischen Prognosen. Die standardisierte und schematisierte Modellierung geologischer Informationen ermöglicht nicht nur eine effizientere Planung und Ausführung, sondern auch eine verbesserte Dokumentation und Nachvollziehbarkeit über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. Dies ist besonders relevant für komplexe Projekte wie den Tunnelbau, bei dem eine präzise geologische Prognose und die kontinuierliche Anpassung des Modells an neue Erkenntnisse von entscheidender Bedeutung sind.

Für die zukünftige Forschung ergibt sich die Notwendigkeit, die entwickelten Modellierungsansätze in weiteren Projekten zu testen und weiterzuentwickeln. Es wäre zudem sinnvoll, die Anwendung der entwickelten Standards und Modelle in anderen Bereichen des Bauwesens (Hangsicherungen, Hochwasserverbauungen etc.) zu untersuchen, um deren Anwendbarkeit und Nutzen in verschiedenen Kontexten zu evaluieren.

7 Resümee und Ausblick

„Jedes Tunnelbauwerk ist ein Kompromiss“: Im Sinne von Abwägungen zwischen verschiedenen fachspezifischen Anforderungen, Kosten und technischen Aspekten.

Der Faktor Mensch mit den unterschiedlichen Herangehensweisen zu Erhebung, Planung, Erkundung und Interpretationen von geologischen Gegebenheiten, ist je nach Ausbildung, Erfahrung und Fokus von entscheidender Bedeutung für eine erfolgreiche BIM-Modellierung des Baugrundes.

Die Forschung zur Integration der geologischen Planung in Building Information Modeling hat gezeigt, dass eine präzise Definition des Level of Information Need der geologischen Eigenschaften entscheidend für die erfolgreiche Modellierung und Nutzung von Baugrundmodellen ist. Durch die Harmonisierung von Standards wie dem Eurocode 7 und den relevanten ÖNORMEN und Richtlinien wurde ein Rahmen geschaffen, der es ermöglicht, geologische Daten strukturiert und fortlaufend in digitale Modelle zu integrieren. Die entwickelten Modellierungsmethoden ermöglichen eine dynamische und kontinuierliche Aktualisierung der geologischen Informationen über die verschiedenen Projektphasen hinweg. Dies unterstützt eine präzise geotechnische Planung und verbessert die interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Bauausführung. Mit einer abgestimmten, strukturierten Datenbasis können Modelle effektiv, schlank, evaluierbar und fortschreibbar erhalten werden.

Zukünftige Forschung sollte darauf abzielen, die entwickelten Methoden in der Praxis weiter zu testen und zu verfeinern. Insbesondere die Anpassung und Erweiterung der geologischen Basiseigenschaften in spezifischen Projekten bietet Potenzial für eine noch effektivere Planung und Risikoabschätzung. Zudem könnte die Integration neuer Technologien wie maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz die automatisierte Interpretation und Aktualisierung geologischer Modelle weiter vorantreiben. Ein weiterer Schritt wäre die nationale und internationale Harmonisierung der Standards, um die Modellierung geologischer Daten in BIM-Projekten und weiterführende Planungstätigkeiten grenzübergreifend konsistent und interoperabel zu gestalten.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Ehrbar, H.; Franz, S.; Weiner, T.; Fentzloff, W.; Frodl, S. *Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten, DAUB Empfehlung zu BIM im Untertagebau*. Geomechanik und Tunnelbau 13, H. 2, S. 147–162, 2020.
<https://doi.org/10.1002/geot.201900080>
- [2] Flora, M.; Fröch, G.; Gächter, W. *Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle*, Bautechnik 97, H. 11, S. 780–788, 2020. <http://doi.org/10.1002/bate.201900095>
- [3] ÖGG. *Richtlinie Geotechnische Planung von Untertagebauten Zyklicher und Kontinuierlicher Vortrieb*. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Salzburg, 2023. <https://www.oegg.at/de/publikationen>
- [4] ÖGG. *Empfehlung für die baugeologische Dokumentation bei der Ausführung von Untertagebauwerken*. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Salzburg, 2022. <https://www.oegg.at/de/publikationen>
- [5] ÖGG. *Ermittlung geologisch-geotechnischer Grundlagen für die Planung tiefliegender Tunnel, Leitfaden*. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Salzburg, 2017. <https://www.oegg.at/de/publikationen>
- [6] DAUB. *Empfehlungen des Deutschen Ausschusses für Unterirdisches Bauen e.V. (DAUB) zu Planung und Bau Tunnelbauwerke*, Tunnel 4/2004, S. 73-79, 2004.
- [7] DAUB. *Empfehlung Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten. BIM im Untertagebau, Modellanforderungen – Teil 1: Objektdefinition, Codierung und Merkmale, Ergänzung zur DAUB-Empfehlung BIM im Untertagebau (2019)*. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), 2020.
https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec5/2020-11_DAUB_BIM_im_Untertagebau_Modellanforderungen_T1_de_Rec.pdf
- [8] DAUB. *Empfehlung Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten. BIM im Untertagebau, Modellanforderungen – Teil 2: Informationsmanagement, Ergänzung zur DAUB-Empfehlung BIM im Untertagebau (2019)*. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), 2022. https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec5/2024-07_DAUB_BIT_Modellanforderungen_T2_Informationsmanagement_DE.pdf
- [9] DAUB. *Empfehlung Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten. BIM im Untertagebau, Modellanforderungen – Teil 3: Baugrundmodell, Ergänzung zur DAUB-Empfehlung BIM im Untertagebau (2019)*. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), 2022. https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec5/2022-08_DAUB_BIT_Modellanforderungen_T3_Baugrundmodell_Rec_DE.pdf
- [10] ÖNORM EN 17412-1: 2021-06-01, *Building Information Modeling – Informationsbedarfstiefe – Konzepte und Definitionen*.
- [11] ÖNORM EN ISO 7817-1: 2024-11-15, *Bauwerksinformationsmodellierung – Informationsbedarfstiefe – Teil 1: Konzepte und Grundsätze* (ISO 7817-1:2024).

- [12] ÖNORM EN ISO 19650-1: 2019-04-15 (D), *Organisation von Daten zu Bauwerken — Informationsmanagement mit BIM, Teil 1: Konzepte und Grundsätze* (ISO 19650-1:2018).
- [13] ÖNORM EN ISO 19650-2: 2019-04-15 (D), *Organisation und Digitalisierung von Information zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) — Informationsmanagement mit BIM, Teil 2: Planungs-, Bau- und Inbetriebsphase* (ISO 19650-1:2018).
- [14] Mayring, P. *Qualitative Inhaltsanalyse*. In: Mey, G., Mruck, K. (eds) Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie. Springer Reference Psychologie. Springer, Wiesbaden, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-658-18387-5_52-2
- [15] Borrmann A. et.al. *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und Industrielle Praxis*. Springer, Wiesbaden, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05606-3>
- [16] Weil, J. *Digitale Baugrundmodelle im Tunnelbau – Status, Chancen und Risiken*. Geomechanik und Tunnelbau_13, H. 2, S. 221–236, 2020. <https://doi.org/10.1002/geot.201900078>
- [17] Weichenberger, F. P.; Schwaiger, C.; Höfer-Öllinger, G. *Von der geologischen Aufnahme zur BIM-Repräsentation*. Geomechanik und Tunnelbau 13, H. 2, S. 199–211, 2020. <https://doi.org/10.1002/geot.201900076>
- [18] ÖNORM EN 1997-2: 2007+AC 2010 (D), *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-2 und nationale Ergänzungen*.
- [19] Building SMART Austria, <https://www.buildingsmart.co.at/>
- [20] ÖNORM EN ISO 14688-1: 2020-12-01, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 1: Benennung und Beschreibung*.
- [21] ÖNORM EN ISO 14688-2: 2019-10-15, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen*.
- [22] ÖNORM EN ISO 14689: 2019-10-15, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels*.
- [23] ÖNORM EN ISO 22475-1: 2006-12-01, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Probenahmeverfahren und Grundwassermessungen, Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung*. (ISO 22475-1:2006).
- [24] SIA 260:2013 *Bauwesen, Grundlagen der Projektierung von Tragwerken (Nutzungsvereinbarung)*, Schweizer Norm SN 505 2060 261; Schweizerischer Ingenieur – und Architektenverein, Zürich. 24
- [25] SIA 199:2015 *Erfassen des Gebirges im Untertagebau*, Schweizer Norm SN 531 199; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- [26] FIDIC. *Conditions of Contract for Underground Works, First Edition, 2019*, [ISBN 978-2-88432-084-9] (the Emerald Book), 2019.
- [27] Hoek, E., Brown, E.T. *The Hoek-Brown failure criterion and GSI*. 2018 edition, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 11 (2019) pp. 445-463, 2019.

- [28] ÖNORM EN ISO 17892-1: 2005-06-15, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Laborversuche an Bodenproben, Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts.* (ISO 17892-1:2014)
- [29] ÖNORM EN ISO 17892-5: 2017-07-01, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Laborversuche an Bodenproben, Teil 5: Oedometerversuch mit stufenweiser Belastung.* (ISO 17892-5:2017)
- [30] ÖNORM EN ISO 17892-10: 219-06-01, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Laborversuche an Bodenproben, Teil 10: Direkte Scherversuche,* (ISO 17892-10:2018)
- [31] ÖNORM EN ISO 17892-12: 2018-10-15, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Laborversuche an Bodenproben, Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen.* (ISO 17892-12:2018)
- [32] Fröch, G. *Merkmalserver als Kommunikationsmittel für die Bauwirtschaft.* In: Gary, Gisela: BIM. Digitale Revolution und ihre Grenzen. Wien: Linde Verlag, ISBN 978-3-707-33777-8, S. 73 – 89. 2017. <https://shop.lindeverlag.at/buch/bim-17821>

9 Anhang

9.1 Listen der geologisch-geotechnischen Eigenschaften – projektphasenbezogen geologische Planung

Liste der Eigenschaften:											Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften				
	Name	Beschreibung	Kurzname Symbol	SI-Einheit wenn anwendbar	Wertebereich wenn anwendbar		Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaufnahme	Phase: Erkundung	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung	
Nr.	Eigenschaft Geologie allgemein				Min	Max						In-Situ	Labor		
1	Tektonische Einheit						Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]	
2	Stratigraphische Einheit						Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]	
3	Lithologische Einheit						Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]	
4	Gesteinsart						Text		Gem. geolog. Grundlagen	x	x	x	x	[E]	
5	Raumstellung/Orientierung									x	x	x	x	[E]	
5-1	Orientierung Gefüge - Hauptorientierung Azimuth	gemessene Fallrichtung / Einfallen in Grad (°/°)	DipDir	°	0	360	reelle Zahl	Geologenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]	
5-2	Orientierung Gefüge - Hauptorientierung Einfallwert	gemessene Fallrichtung / Einfallen in Grad (°/°)	Dip	°	0	90	reelle Zahl	Geologenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]	
5-3	Orientierung Schichtflächen (ss) Azimuth	gemessene Fallrichtung / Einfallen in Grad (°/°)	DipDir	°	0	360	reelle Zahl	Geologenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]	
5-4	Orientierung Schichtflächen (ss) Einfallwert	gemessene Fallrichtung / Einfallen in Grad (°/°)	Dip	°	0	90	reelle Zahl	Geologenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]	
5-5	Orientierung Schieferungsflächen (sf) Azimuth	gemessene Fallrichtung / Einfallen in Grad (°/°)	DipDir	°	0	360	reelle Zahl	Geologenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]	
5-6	Orientierung Schieferungsflächen (sf) Einfallwert	gemessene Fallrichtung / Einfallen in Grad (°/°)	Dip	°	0	90	reelle Zahl	Geologenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]	
5-7	Orientierung Trennflächen (St, H, K) Azimuth	gemessene Fallrichtung / Einfallen in Grad (°/°)	DipDir	°	0	360	reelle Zahl	Geologenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]	
5-8	Orientierung Trennflächen (St, H, K) Einfallwert	gemessene Fallrichtung / Einfallen in Grad (°/°)	Dip	°	0	90	reelle Zahl	Geologenkompass oder Fotogrammetrie	EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]	
6	Gebirgsart Fels	Festlegung gemäß Grundlagen	GA-F-Nr.	–	1	x	Text / reelle Zahl	–	ÖGG RiLi				x	[E]	
7	Gebirgsart Lockermaterial	Festlegung gemäß Grundlagen	GA-L-Nr.	–	1	x	Text / reelle Zahl	–	ÖGG RiLi				x	[E]	
8	Geogene Gefahren (Radioaktivität, Bergleider etc.)	Beschreibung: angetroffen / vermutet	–	mSv/a, Bq/m³	0	1	Text	–	ÖGG RiLi	x	x	x	x	[E]	
9	Geogene Gefahren Gas (Methan, Schwefel, etc.)	Beschreibung: angetroffen / vermutet	–	% UEG	0	1	Text	–	ÖGG RiLi	x	x	x	x	[E]	
10	Erdbebenzone	gem. Informationen Geosphäre Österreich)	–	–	1	3	Text / reelle Zahl	–	öffentlichen Stellen	x		x	x	[E]	
11	Geothermie	gem. Informationen Geosphäre Österreich; terrestrischer Wärmestrom)	–	–	–	–	Text	–	öffentlichen Stellen	x		x	x	[E]	
12	Prognosesicherheit	Bestimmung (z. Bsp. hoch-mittel-gering) auf Basis vorhandener Grundlagen	–	–	1	3	Text / reelle Zahl	beliebige Skalierung möglich	ÖGG RiLi	x	x	x	x	[E]	
13	Koordinaten Referenzaufschlüsse	Angabe der Lage von Aufschlüssen	x, y, z		–	–	reelle Zahl	Abstimmung Koordinatensystem notwendig		x	x	x	x	[E]	

Liste der Eigenschaften:													Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften				
	Name	Beschreibung	Kurzname Symbol	SI-Einheit wenn anwendbar	Wertebereich wenn anwendbar	Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaufnahme	Phase: Erkundung	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung				
					Min	Max				In-Situ	Labor						
Nr.	Eigenschaft Lockergestein, lockergesteinsähnliches Störungsgestein																
1	Korngrößenverteilung (je Kornart)	Bestimmung der prozentuellen Anteile		%	0	100	reelle Zahl	Siebungen und Waage	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 17892-4, ÖNORM EN ISO 14688-1+2		x	x	x	x	[E]		
2	Korngrößen Lockermaterial	Bestimmung der Korngrößen	T	[mm]	0	0,002	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-1	Ton	Bestimmung der Korngrößen	fU	[mm]	0,002	0,0063	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-2	Schluff fein	Bestimmung der Korngrößen	mU	[mm]	0,0063	0,020	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-3	Schluff mittel	Bestimmung der Korngrößen	gM	[mm]	0,020	0,063	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-4	Schluff grob	Bestimmung der Korngrößen	fs	[mm]	0,063	0,200	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-5	Sand fein	Bestimmung der Korngrößen	mS	[mm]	0,200	0,630	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-6	Sand mittel	Bestimmung der Korngrößen	gS	[mm]	0,63	2,00	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-7	Sand grob	Bestimmung der Korngrößen	fG	[mm]	2,00	6,30	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-8	Kies fein	Bestimmung der Korngrößen	mG	[mm]	6,30	20,0	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-9	Kies mittel	Bestimmung der Korngrößen	gG	[mm]	20,0	63,0	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-10	Kies grob	Bestimmung der Korngrößen	X	[mm]	63,0	200,0	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
2-11	Steine	Bestimmung der Korngrößen	Y	[mm]	200,0	630,0	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
3	Blöcke	Bestimmung der Korngrößen	–	–	–	–	Text	–	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
3	Kornform und Textur	Beschreibung von eckig bis rund, glatt bis rauh	–	–	–	–	Text	–	EN-ISO 14688-1		x	x	x	x	[E]		
4	Komponenten-Matrixverhältnis	Bestimmung der prozentuellen Anteile	m_x, m_y	%	0	100	reelle Zahl	Messungen und/oder Siebungen	ÖNORM EN ISO 14688-1, ÖNORM EN ISO 17892-4		x	x	x	x	[E]		
5	Hindernis	Allgemeiner Einflussfaktor	–	–	–	–	Text	–	ÖGG Rili	x	x	x	x	x	[E]		
6	Kontaminierung	Allgemeiner Einflussfaktor	–	%	0	100	Text / reelle Zahl	–		x	x	x	x	x	[E]		
7	organische Anteile (leicht - stark)	Bestimmung des organischen Anteils von leicht zu stark	–	–	–	–	Text	Beimengungen oder Boden	EN-ISO 146898		x	x	x	x	[E]		
8	Lagerungsdichte	Bestimmung mittels Untersuchungen	D	–	–	–	Text	Rammsondierungen (SPT oder CPT)	ÖNORM EN 1997-2						[PrSp]		
8-1	Schlagzahl N30 gemäß SPT	Ergebnis aus Standard Penetration Test	N	–	0	x	reelle Zahl	–	EN ISO 224176-2		x	x			[PrSp]		
8-2	Spitzenwiderstand gemäß CPT	Ergebnis aus Cone Penetration Test	q _c	MPa	0	x	reelle Zahl	–	EN ISO 224176-2		x	x			[PrSp]		
8-3	Mantelreibung gemäß CPT	Ergebnis aus Cone Penetration Test	f _s	MPa	–	–	reelle Zahl	–	EN ISO 224176-2		x	x			[PrSp]		
8-4	Reibungsverhältnis gemäß CPT	Ergebniss aus Cone Penetration Test	R _f	%	0	100	reelle Zahl	–	EN ISO 224176-2		x	x			[PrSp]		
9	Atterbergsche Zustandsgrenzen	–	–	–	–	–	–	–	–						[PrSp]		
9-1	Fließgrenze	Konsistenzbestimmung nach Atterberg	w _L	%	0	100	reelle Zahl	–	ÖNORM EN ISO 17892-12		x	x			[PrSp]		
9-2	Ausrollgrenze	Konsistenzbestimmung nach Atterberg	w _P	%	0	100	reelle Zahl	–	ÖNORM EN ISO 17892-12		x	x			[PrSp]		
9-3	Schrumpfgrenze	Konsistenzbestimmung nach Atterberg	w _S	%	0	100	reelle Zahl	–	ÖNORM EN ISO 17892-12		x	x			[PrSp]		
9-4	Plastizitätszahl	Konsistenzbestimmung nach Atterberg	I _p	%	0	100	reelle Zahl	–	ÖNORM EN ISO 17892-12		x	x			[PrSp]		
9-5	Konsistenzzahl	Konsistenzbestimmung nach Atterberg	I _c	–	–	–	reelle Zahl	–	ÖNORM EN ISO 17892-12		x	x			[PrSp]		
9-6	Konsistenz (ermittelt aus Zustandsgrenzen + natürl. Wassergehalt)	Konsistenzbestimmung nach Atterberg	–	–	–	–	reelle Zahl	–	ÖNORM EN ISO 17892-12		x	x			[PrSp]		
9-7	Konsistenz (sofern nur textliche Beschreibung)	Konsistenzbestimmung nach Atterberg	–	–	–	–	Text	–	ÖNORM EN ISO 17892-12		x	x			[PrSp]		
10	Veränderlichkeit (nicht - stark)	Beschreibung der Veränderlichkeit	–	–	–	–	Text	am frischen Aufschluss	EN-ISO 14689		x	x	x	x	[PrSp]		
11	Verklebungspotential für Hydroschildvortriebe nach Hollmann & Thewes (2013)	Bestimmung des Verklebungspotentiales	–	–	–	–	Text	Herleitung aus Atterberg			x	x	x	x	[PrSp]		
12	Verklebungspotential für offen gefahrene Schildvortriebe ohne Bergwasser nach Hollmann & Thewes (2013)	Bestimmung des Verklebungspotentiales	–	–	–	–	Text	Herleitung aus Atterberg			x	x	x	x	[PrSp]		
13	Verklebungspotential (allgemeines Verklebungsdiagramm für Lockergesteine) nach Hollmann (2014)	Bestimmung des Verklebungspotentiales	–	–	–	–	Text	Herleitung aus Atterberg			x	x	x	x	[PrSp]		

Liste der Eigenschaften:													Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften			
	Name	Beschreibung	Kurzname Symbol	SI-Einheit wenn anwendbar	Wertebereich wenn anwendbar		Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaufnahme	Phase: Erkundung	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung		
					Min	Max										
14	äquivalenter Quarzgehalt	Bestimmung des Quarzgehaltes	äQu	%	0	100	reelle Zahl	aus Dünnschliff, Labor	ÖGG RiLi			x	x		[PrSp]	
15	Cerchar Abrasivity Index (nur für Steine und Blöcke)	Bestimmung der Abrasivität	CAI	–	–	–	reelle Zahl	–	DGGS-Empfehlung Nr. 23			x	x		[PrSp]	
16	Abrasivitätsindex (LCPC)	Bestimmung der Abrasivität	A _{BR}	g/t	–	–	reelle Zahl	–	ÖGG RiLi, NF P18-579			x	x		[PrSp]	
17	Brechbarkeitsindex (LCPC)	Bestimmung der Abrasivität	B _R	%	0	100	reelle Zahl	–	ÖGG RiLi, NF P18-579			x	x		[PrSp]	
18	Elastizitätsmodul	Bestimmung der Steifigkeit	E _u	MPa	–	–	reelle Zahl	Verhältnis von Spannung zu Dehnung	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 17892-7/a/a			x	x	x	[PrSp]	
19	Verformungsmodul	Bestimmung der Verformbarkeit von Boden	E _v	MPa	–	–	reelle Zahl	Beurteilung der Verdichtung	ÖNORM EN 1997-2			x	x	x	[PrSp]	
20	Feuchtwichte	Bestimmung der Wichte	γ	kN/m ³	0	x	reelle Zahl	–	DIN 1055-2			x	x		[PrSp]	
21	Wichte unter Auftrieb	Bestimmung der Wichte unter Auftrieb	γ'	kN/m ³	0	x	reelle Zahl	–	DIN 1055-2			x	x		[PrSp]	
22	Effektiver Reibungswinkel	Bestimmung des Reibungswinkels	φ'	°	0	x	reelle Zahl	Grenzzustand Schüttgut	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 17892-9			x	x		[E]	
23	Effektive Kohäsion	Bestimmung der zusammenhaltenden Kräfte in bindigen Böden	c'	kPa	0	x	reelle Zahl	auch Haftfestigkeit	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 17892-9, ÖNORM EN ISO 17892-10			x	x		[E]	
24	Undränierte Kohäsion	Bestimmung der undränierten Kohäsion	c _u	kPa	0	x	reelle Zahl	resultiert aus effektiver Spannung und kritischer Reibung, nicht aus chemischen Bindungen zwischen Bodenpartikeln.	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 17892-8			x	x		[PrSp]	
25	Einaxiale Druckfestigkeit	Bestimmung der Druckfestigkeit	q _u	MPa	0,6	> 250	reelle Zahl	Im Labor mittels Versuch	EN-ISO 14689			x	x		[PrSp]	
26	Steifemodul	Bestimmung der Steife eines Bodens	E _s	MPa	0	x	reelle Zahl	Kenngröße zur Beschreibung des Drucksetzungsverhaltens eines Bodens bei verhindeter Seitenausdehnung	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 17892-5			x	x	x	[PrSp]	
27	Ménard-Pressiometer-Modul	–	E _M	MN/m ²	0	x	reelle Zahl	–	DIN EN ISO 22476-4			x	x		[PrSp]	
28	Grenzdruck des Ménard-Pressimeters	–	p _{LM}	MN/m ²	0	x	reelle Zahl	–	DIN EN ISO 22476-4			x	x		[PrSp]	
29	Pressiometer-Kriechdruck	–	p _{fM}	MN/m ²	0	x	reelle Zahl	–	DIN EN ISO 22476-4			x	x		[PrSp]	
30	Durchlässigkeitsbeiwert Labor	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit	k	m/s	–	–	reelle Zahl	auch Bestimmung des Versickerungspotentials von Boden	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 22282-1 bis 6			x	x		[PrSp]	
31	natürlicher Wassergehalt	Bestimmung des Verhältnisses	w _n	%	0	100	reelle Zahl	das Verhältnis des Gewichts des Wassers zum Gewicht der Feststoffe in einer bestimmten Bodenmasse	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 17892-1			x	x		[PrSp]	
32	Schwell- / Quellhebung	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	h	%	0	100	reelle Zahl	schwellen= Anhydrit-Gips quellen = Tone	ÖNORM EN 1997-2, DGGS-Empfehlung Nr. 11	x	x	x	x		[E]	
33	Schwell-/ Quelldruck	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	σ	MPa	–	–	reelle Zahl	schwellen= Anhydrit-Gips quellen = Tone	ÖNORM EN 1997-2, DGGS-Empfehlung Nr. 11	x		x	x		[E]	
34	Queldehnung (Quellpotential) nach Kaiser/Henke (1975)	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	ε _{q,o}	%	0	100	reelle Zahl	–	DGGS-Empfehlung Nr. 11			x	x		[PrSp]	
35	Quelldruckäquivalenzwert (Quelldruck) nach Kaiser/Henke (1975)	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	σ _{q,Ä}	kN/m ²	–	–	reelle Zahl	–	DGGS-Empfehlung Nr. 11			x	x		[PrSp]	
36	max. Queldehnung aus Quellversuch nach Huder/Amberg (1970)	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	ε _{q,max}	%	0	100	reelle Zahl	–	DGGS-Empfehlung Nr. 11			x	x		[PrSp]	
37	max. Quelldruckspannung nach Huder/Amberg (1970)	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	σ _{q,max}	kN/m ²	–	–	reelle Zahl	–	DGGS-Empfehlung Nr. 11			x	x		[PrSp]	

Liste der Eigenschaften:													Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften			
	Name	Beschreibung	Kurzname Symbol	SI-Einheit wenn anwendbar	Wertebereich wenn anwendbar	Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaufnahme	Phase: Erkundung	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung			
					Min	Max				In-Situ	Labor					
Nr.	Eigenschaft Festgestein															
1	Mineralogische Zusammensetzung (je Mineral)	Petrographische Bestimmung	–	%	0	100	reelle Zahl	Im Gelände und Labor	ÖNORM EN ISO 14689	x	x	x	x	[E]		
2	Verwitterungsgrad	Bestimmung des Verwitterungsstatus	v	–	0	5	Text / reelle Zahl	Im Gelände und Labor	EN-ISO 14689		x	x	x	[PrSp]		
3	Veränderlichkeit (nicht - stark)	Beschreibung der Veränderlichkeit	–	–	–	–	Text	am frischen Aufschluss	EN-ISO 14689		x	x	x	[PrSp]		
4	Einaxiale Druckfestigkeit (UCS)	Bestimmung der Festigkeit des Gesteins	σ_u	MPa	0,6	> 250	Text / reelle Zahl	Im Labor mittels Versuch oder mit Rückprallhammer	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 14689		x	x	x	[PrSp]		
5	Zugfestigkeit	Bestimmung der Festigkeit des Gesteins	σ_t	MPa	–	–	reelle Zahl	Im Labor mittels Versuch	ÖNORM EN 1997-2			x	x	[PrSp]		
6	Wichte	Bestimmung der Wichte	γ	kN/m³	–	–	reelle Zahl	–	ÖNORM EN 1997-1			x	x	[PrSp]		
7	Hoek-Brown-Konstante	Bestimmung zum Bruchkriterium eines Gesteins	–	m_i	–	–	reelle Zahl	–	ÖGG RiLi			x	x	[PrSp]		
8	Schwell-/Quellpotential (Druck und Hebung) Festgestein	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	σ, h	MPa, %	0	100	reelle Zahl	schwellen= Anhydrit-Gips quellen = Tone	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[E]		
9	Queldehnung (Quellpotential) nach Kaiser/Henke (1975)	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	$\varepsilon_{q,o}$	%	0	100	reelle Zahl	–	DGGT-Empfehlung Nr. 11			x	x	[PrSp]		
10	Quelldruckäquivalenzwert (Quelldruck) nach Kaiser/Henke (1975)	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	$\sigma_{q,A}$	kN/m²	–	–	reelle Zahl	–	DGGT-Empfehlung Nr. 11			x	x	[PrSp]		
11	max. Queldehnung aus Quellversuch nach Huder/Amberg (1970)	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	$\varepsilon_{q,max}$	%	0	100	reelle Zahl	–	DGGT-Empfehlung Nr. 11			x	x	[PrSp]		
12	max. Quelldruckspannung nach Huder/Amberg (1970)	Bestimmung Auswirkung der Volumszunahme bei Wasserzufuhr	$\sigma_{q,max}$	kN/m²	–	–	reelle Zahl	–	DGGT-Empfehlung Nr. 11			x	x	[PrSp]		
13	äquivalenter Quarzgehalt	Bestimmung des Quarzgehaltes	äQu	%	0	100	reelle Zahl	aus Dünnenschliff, Labor	ÖGG RiLi			x	x	[PrSp]		
14	Cerchar Abrasivity Index	Bestimmung der Abrasivität	CAI	–	–	–	reelle Zahl	Verschleißprognose	ÖGG RiLi			x	x	[PrSp]		
15	Rock Abrasivity Index	Bestimmung der Abrasivität	RAI	–	–	–	reelle Zahl	Verschleißprognose	–			x	x	[PrSp]		
16	Abrasivity Value Steel	Bestimmung der Abrasivität	AVS	[mg]	–	–	reelle Zahl	Verschleißprognose	–			x	x	[PrSp]		
17	Cutter Life Index	Bestimmung der Abrasivität	CLI	–	–	–	reelle Zahl	Verschleißprognose	–			x	x	[PrSp]		
18	DrillingRate Index	Bestimmung der Abrasivität	DRI	–	–	–	reelle Zahl	Verschleißprognose	–			x	x	[PrSp]		
19	Spaltzugfestigkeit	Bestimmung der Festigkeit des Gesteins	–	MPa	–	–	reelle Zahl	Im Labor mittels Versuch	ÖNORM EN 1997-2			x	x	[PrSp]		
20	Zähigkeit (rechnerisch ermittelt)	Berechnung der Zähigkeit: UCS:BTS	TC	–	–	–	reelle Zahl	mechanische Eigenschaft	ÖGG RiLi			x	x	[PrSp]		
21	Poissonzahl	Bestimmung der Querdehnzahl	v_i	–	–	–	reelle Zahl	mechanische Eigenschaft	ÖNORM EN 1997-2			x	x	[PrSp]		
22	Dichte	Bestimmung der Dichte	ρ	g/cm³	–	–	reelle Zahl	–	ÖNORM EN 1997-2			x	x	[PrSp]		
23	Elastizitätsmodul (E-Modul)	Bestimmung der Steifigkeit	E_{40-60}	MPa	–	–	reelle Zahl	Verhältnis von Spannung zu Dehnung	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 17892- 7/8/9			x	x	x	[PrSp]	

Liste der Eigenschaften:												Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften				
	Name	Beschreibung	Kurzname Symbol	SI-Einheit wenn anwendbar	Wertebereich wenn anwendbar		Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaufnahme	Phase: Erkundung	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung		
Nr.	Eigenschaft Gebirge				Min	Max				In-Situ	Labor					
1	Gebirgsbereich / Homogenbereich	Festlegung eines Bereiches mit gleichen Eigenschaften	GB -Nr. HB-Nr.	–	1	x	Text/reelle Zahl	–	ÖGG RiLi						[E]	
2	Schichtdicke														[E]	
2-1	fein laminiert	Bestimmung der Schichtdicke		[mm]	0	<6	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1		x	x	x		[E]	
2-2	grob laminiert	Bestimmung der Schichtdicke		[mm]	6	20	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1		x	x	x		[E]	
2-3	sehr fein geschichtet	Bestimmung der Schichtdicke		[mm]	20	60	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1		x	x	x		[E]	
2-4	fein geschichtet	Bestimmung der Schichtdicke		[mm]	60	200	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1		x	x	x		[E]	
2-5	mittelgroß geschichtet	Bestimmung der Schichtdicke		[mm]	200	600	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1		x	x	x		[E]	
2-6	grob geschichtet	Bestimmung der Schichtdicke		[mm]	600	2000	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1		x	x	x		[E]	
2-7	sehr grob geschichtet	Bestimmung der Schichtdicke		[mm]	>2000		reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1		x	x	x		[E]	
3	Trennflächentyp	Bestimmung der Trennflächen Schichtflächen, Kluftflächen, Schieferungsflächen, Störungsflächen und Scherflächen	(ss, sf, St, Ha, K)		–	–	Text	Vorortaufnahme (analog oder digital)	EN-ISO 14688-1		x	x	x		[E]	
4	Trennflächenabstände									EN-ISO 14688-1 / EN-ISO 14689					[E]	
4-1	äußerst kleiner Abstand / außerordentlich engständig	Bestimmung der Trennflächenabstände	–	[mm]	0	<20	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1 / EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
4-2	sehr kleiner Abstand / sehr engständig	Bestimmung der Trennflächenabstände	–	[mm]	20	60	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1 / EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
4-3	kleiner Abstand / engständig	Bestimmung der Trennflächenabstände	–	[mm]	60	200	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1 / EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
4-4	mittelgroßer Abstand / mittelständig	Bestimmung der Trennflächenabstände	–	[mm]	200	600	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1 / EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
4-5	großer Abstand / weitständig	Bestimmung der Trennflächenabstände	–	[mm]	600	2000	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1 / EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
4-6	sehr großer Abstand / sehr weitständig	Bestimmung der Trennflächenabstände	–	[mm]	>2000		reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14688-1 / EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
5	Kluftfüllungen, Bestege	Beschreibung des Füllmaterials	–	–	–	–	Text	petrographische Beschreibung	EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
6	Öffnungsweite Trennflächen									EN-ISO 14689		x	x	x		[E]
6-1	sehr eng	Bestimmung der Öffnungsweiten	–	[mm]	0	0,1	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
6-2	eng	Bestimmung der Öffnungsweiten	–	[mm]	0,1	0,25	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
6-3	teilweise offen	Bestimmung der Öffnungsweiten	–	[mm]	0,25	0,5	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
6-4	offen	Bestimmung der Öffnungsweiten	–	[mm]	0,5	2,5	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
6-5	gemäßigt weit	Bestimmung der Öffnungsweiten	–	[mm]	2,5	10	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
6-6	weit	Bestimmung der Öffnungsweiten	–	[mm]	10	100	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
6-7	sehr weit	Bestimmung der Öffnungsweiten	–	[mm]	100	1000	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
6-8	extrem weit	Bestimmung der Öffnungsweiten	–	[mm]	>1000		reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
7	Trennflächenbeschreibung	Beschreibung der Trennflächen	–	–	–	–	Text	Beschreibung des Zustandes, allgemein	EN-ISO 14689		x	x	x		[E]	
8	Reibungswinkel, Trennflächen	Beschreibung des Reibungswinkels	Φ_{kl}	°	–	–	reelle Zahl	–	ÖNORM EN 1997-2			x	x		[PrSp]	
9	Restreibungswinkel, Trennflächen	Beschreibung des Restreibungswinkels	$\Phi_{res,kl}$	°	–	–	reelle Zahl	–	ÖNORM EN 1997-2			x	x		[PrSp]	
10	Kohäsion, Trennflächen	Bestimmung der zusammenhaltenden Kraft	C_{kl}	MPa	–	–	Text	auch Haftfestigkeit	ÖNORM EN 1997-2			x	x		[E]	
11	Störungen klassifiziert nach Ausbisslänge	Bestimmung der Ausbisslänge	–	mm-m, m ²	–	–	reelle Zahl	Messung analog oder digital	EN-ISO 14689	x	x	x	x		[PrSp]	
12	Durchtrennungsgrad (Persistenz)	Bestimmung des Durchtrennungsgrades	–	%	0	100	reelle Zahl	Angabe zur Durchschlagung am Aufschluss	EN-ISO 14689	x	x	x	x		[PrSp]	
13	Standfestigkeit	Bestimmung der Standfestigkeit	–	–	–	–	Text	von gering bis sehr standfest	Beschreibend		x		x		[E]	
14	Rock Quality Designation	Bestimmung des RQD	RQD	%	0	100	reelle Zahl	Messung am Bohrkern	nach Deere (1989)		x		x			

Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung
 [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften

Liste der Eigenschaften:

	Name	Beschreibung	Kurzname Symbol	SI-Einheit wenn anwendbar	Wertebereich wenn anwendbar		Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaufnahme	Phase: Erkundung	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung
					Min	Max								
15	Zerlegungsgrad	Bestimmung des Zerlegungsgrades	z	—	0	5	Text/reelle Zahl	Vorort analog oder digital	EN-ISO 14689				In-Situ Labor	[E]
15-1	gering zerlegt	Bestimmung des Zerlegungsgrades	z0	—	—	—	Text/reelle Zahl	Vorort analog oder digital	EN-ISO 14689	x	x	x		[E]
15-2	mäßig zerlegt	Bestimmung des Zerlegungsgrades	z1	—	—	—	Text/reelle Zahl	Vorort analog oder digital	EN-ISO 14689	x	x	x		[E]
15-3	stark zerlegt	Bestimmung des Zerlegungsgrades	z2	—	—	—	Text/reelle Zahl	Vorort analog oder digital	EN-ISO 14689	x	x	x		[E]
15-4	sehr stark zerlegt	Bestimmung des Zerlegungsgrades	z3	—	—	—	Text/reelle Zahl	Vorort analog oder digital	EN-ISO 14689	x	x	x		[E]
15-5	vollständig zerlegt	Bestimmung des Zerlegungsgrades	z4	—	—	—	Text/reelle Zahl	Vorort analog oder digital	EN-ISO 14689	x	x	x		[E]
16	Wasserzufluss	Bestimmung des Wasserzuflusses in einen bestimmten Bereich	Q	l/s	—	—	reelle Zahl	Messung Vorort, händisch oder über Messanlage			x	x		[PrSp]
17	Felstemperatur	Bestimmung der Felstemperatur	Temp _{Fels}	°C	—	—	reelle Zahl	Messung Vorort			x	x		[PrSp]
18	Geological Strength Index (sehr schlecht - sehr gut)	Bestimmung des GSI	—	—	0	100	Text/reelle Zahl	Vorort analog oder digital	nach Hoek (2002)	x	x	x		[PrSp]
19	Rock Mass Rating	Bestimmung des RMR aus UCS, RQD, Kluftabstand, Kluftzustand, Bergwasser, Orientierung der Klüfte	RMR	—	<20	100	reelle Zahl	Ergebnis ist die Gebirgsqualität von sehr schlecht bis sehr gut und gilt für einen Gebirgsbereich	nach Bieniawski (1998)		x	x		[PrSp]
20	Auflockerungsfaktor	Bestimmung des Auflockerungsfaktors	A	%	0	100	reelle Zahl	Verhältnis des Volumens nach dem Lösen bzw. Aufnehmen von Erdmassen zum Volumen vor dem Lösen bzw. Aufnehmen (Deponierung)	DIN ISO 9245		x	x		[PrSp]
21	Porosität	Bestimmung der Porosität	—	—	—	—	Text	Bestimmung des Hohraumvolumens	EN-ISO 14689	x	x	x		[PrSp]
22	Hohlräume (Karst)	Beschreibung der Hohlräume	—	—	—	—	Text	Beschreibung zu Genese und Zustand	EN-ISO 14689	x	x	x		[PrSp]
23	Anisotropie der mechanischen Eigenschaften	Beschreibung der Anisotropie	—	—	—	—	Text	—	ÖGG.RiLi, beschreibend	x	x	x		[PrSp]
24	Primärspannung Beträge der Hauptnormalspannung	Bestimmung der Primärspannungen	MPa	σ ₁ , σ ₂ , σ ₃	—	—	reelle Zahl	Berechnung oder Messung	ÖGG RiLi		x	x		[PrSp]
25	Primärspannungen Orientierung der Hauptnormalspannungen im Raum	Bestimmung der Primärspannungen	—	—	—	—	Text	Berechnung oder Messung	ÖGG RiLi		x	x		[PrSp]
26	Versinterung, Versinterungsneigung	Beschreibung der Versinterung	—	—	—	—	Text	Maßgeblich zur Planung von Drainagen	ÖGG RiLi, beschreibend	x	x	x		[PrSp]
27	Seitendruckbeiwert	Bestimmung der Steifigkeit	k ₀	—	—	—	reelle Zahl		ÖNORM EN ISO 22476-7,		x	x		[PrSp]
28	Durchlässigkeitsteilwert (In-Situ)	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit	k	m/s	—	—	reelle Zahl	Über hydraulische Versuche Vorort im Borhloch, Grundwassermessstelle	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 22282-1 bis 6		x	x		[PrSp]
29	Einaxiale Druckfestigkeit (UCS), Gebirge	Bestimmung der Festigkeit des Gesteins	σ _{Geb}	MPa	0,6	> 250	reelle Zahl	Im Labor mittels Versuch oder mit Rückprallhammer	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 14689	x	x	x		[PrSp]
30	Reibungswinkel, Gebirge	Beschreibung des Reibungswinkels	φ _{Geb}	°	—	—	reelle Zahl		ÖGG RiLi		x	x		[PrSp]
31	Kohäsion, Gebirge	Bestimmung der zusammenhaltenden Kräfte	c _{Geb}	MPa	—	—	reelle Zahl	auch Haftfestigkeit	ÖGG RiLi		x	x		[PrSp]

Liste der Eigenschaften:													Anwendungsziel: Bereitstellung geologische Daten für geotechnische Planung [E] Erforderliche Eigenschaften / [PrSp] Projektspezifische Eigenschaften			
	Name	Beschreibung	Kurzname Symbol	SI-Einheit wenn anwendbar	Wertebereich wenn anwendbar	Datentyp (reelle Zahl / Text)	Kommentar	Quelle	Phase: Bestandsdaten	Phase: Basisarbeit Geländeaunahme	Phase: Erkundung	Phase: Interpretation für Geotechnik	Zuordnung			
Nr.	Eigenschaften Hydrogeologie				Min	Max			In-Situ	Labor						
1	Bemessungswasserspiegel (absolut)	Bestimmung des Bemessungswasserspiegels	WSP	m.ü.A.	–	–	reelle Zahl	auf Basis von Messreihen in Bohrlöchern, Grundwassermessstellen	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[E]		
2	Bemessungswasserspiegel (relativ)	Bestimmung des Bemessungswasserspiegels über Bauwerkssohle	p	bar	–	–	reelle Zahl	auf Basis von Messreihen in Bohrlöchern, Grundwassermessstellen	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[E]		
3	Hydrochemische Gefahren (Sulfat, Kohlensäure)	Bestimmung der Hydrochemie	–	mg/l	–	–	reelle Zahl	Laboruntersuchungen	beschreibend; [mg/l], ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[E]		
4	Fließgeschwindigkeit	Bestimmung der Fließgeschwindigkeit im Aquifer	–	m/s	–	–	reelle Zahl	Mittels Flügelrad oder Tracermessung	ÖNORM EN 1997-2		x	x	x			
5	Durchlässigkeitsbeiwert (In-Situ)	Bestimmung der Durchlässigkeit von Lockermaterial und Festgestein	k	m/s	–	–	reelle Zahl	Mittels Pumpersuch oder hydraulischen Versuchen im offenen Bohrloch	ÖNORM EN 1997-2, ÖNORM EN ISO 17892-11, ÖNORM EN ISO 22282-1 bis 6		x		x	[E]		
6	Kluft – oder Porengrundwasser	Bestimmung der Grundwassergenese	–	–	–	–	Text	–	beschreibend	x	x	x	x	[PrSp]		
7	Grundwassermächtigkeit	Bestimmung der Grundwassermächtigkeit	–	m	–	–	reelle Zahl	–	berechnet oder gemessen	x	x	x	x	[PrSp]		
8	Grundwasserhorizonte	Bestimmung der Grundwasserhorizonte	aqu	m.ü.A.	–	–	reelle Zahl	aus Zusammenschau Hydrochemie und Wasserstandsmessungen	Aquifere gem. Bohrerkundung	x	x	x	x	[PrSp]		
9	gespannte Wässer	Benennung artesische Wässer	art	bar	–	–	Text / reelle Zahl	aus Bohrerkundung, Wasserwirtschaftlicher Beweissicherung	gem. Bohrerkundung	x	x	x	x	[PrSp]		
10	ungespannte Wässer	Benennung ungespannte Wässer	–	m.ü.A.	–	–	reelle Zahl	aus Bohrerkundung, Wasserwirtschaftlicher Beweissicherung	gem. Bohrerkundung	x	x	x	x	[PrSp]		
11	Druckhöhe Berg-/Grundwasser im Bauwerksbereich	Bestimmung der Druckhöhe über Bauwerkssohle	–	bar	–	–	reelle Zahl	auf Basis von Messreihen in Bohrlöchern, Grundwassermessstellen	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[E]		
12	Grund / Bergwasserschwankungsbereich	Bestimmung des Bergwasserschwankungsbereiches	–	m	–	–	reelle Zahl	auf Basis von Messreihen in Bohrlöchern, Grundwassermessstellen	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[E]		
13	Bergwasserprognose	Prognose zum Bergwasserandrang	Q	l/s	–	–	reelle Zahl	Zur Dimensionierung von Entwässerungsmaßnahmen	ÖNORM EN 1997-2	x		x	x	[E]		
14	Wasserandrang im Bauwerk - ist	Bestimmung des angetroffenen Wasserandranges	Q	l/s	–	–	reelle Zahl	Messung Vorort, händisch oder über Messanlage	ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[PrSp]		
15	Wasserzutritt - Art (tropfend-rinnend; punktuell-flächig)	Beschreibung des Wasserzutrittes	Q	l/s	–	–	Text / reelle Zahl	Tropfend bis rinnend, punktuell oder flächig	gem. ÖGG-Empfehlung	x	x	x	x	[PrSp]		
16	Wasserqualität	Bestimmung der Hydrochemie	–	mg/l	–	–	reelle Zahl	Laboruntersuchungen	gem. TVO, ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[PrSp]		
17	Wassertemperatur	Bestimmung der Wassertemperatur	–	°C	0	100	reelle Zahl	Messung Vorort, händisch oder über Messanlage	gem. TVO, ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[PrSp]		
18	elektrische Leitfähigkeit	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit	–	µS/cm	–	–	reelle Zahl	Messung Vorort, händisch oder über Messanlage	gem. TVO, ÖNORM EN 1997-2	x	x	x	x	[PrSp]		
19	Betonaggressivität	Bestimmung der Hydrochemie	–	mg/l	–	–	reelle Zahl	Laboruntersuchungen	gem. ÖNORM B4710-1	x	x	x	x	[PrSp]		

9.2 Weitere Fachbeiträge

9.2.1 MDPI

**Streamlining Tunnelling Projects through BIM.
[Optimierung von Tunnelbauprojekten durch BIM]**



Article

Streamlining Tunnelling Projects through BIM

Ines Massimo-Kaiser ^{1,*}, Hans Exenberger ¹, Sabine Hruschka ², Frédéric Heil ³ and Matthias Flora ¹

¹ Unit of Construction Management and Tunnelling (iBT), University of Innsbruck, 6020 Innsbruck, Austria

² ASFINAG Bau Management GmbH, 1030 Vienna, Austria

³ ÖBB-Infrastruktur AG, 6134 Vomp, Austria

* Correspondence: ines.massimo@uibk.ac.at; Tel.: +43-512-507-63105

Abstract: Currently, most academic discourse looking at the advantages of Building Information Modelling (BIM) is kept very general. This article evaluates how the use of BIM affects social and economic aspects of seven different tunneling projects. The analysis is based on internal project documentation and on-site visits, resulting in the authors subjective perception. Due to a confidentiality policy given by ongoing projects, the official documentation is anonymised. On one hand, the social analysis considers teamwork aspects. On the other hand, the economic assessment considers the optimised use of resources. The conclusion shows that the correct and complete implementation of all methods and tools from BIM increase social and economic sustainability, optimising project delivery in tunneling. As a result, among other things, on par communication, teambuilding, and mutual appreciation contribute to an increased social sustainability. Economic sustainability is directly associated with resulting short distances within the team and easy communication and coordination. Consequently, this leads to faster problem solving and a streamlined project execution.

Keywords: tunnel information modelling; TIM; building information modelling; BIM; tunnelling; sustainability



Citation: Massimo-Kaiser, I.; Exenberger, H.; Hruschka, S.; Heil, F.; Flora, M. Streamlining Tunnelling Projects through BIM. *Sustainability* **2022**, *14*, 11433. <https://doi.org/10.3390/su141811433>

Academic Editor: Marinella Silvana Giunta

Received: 9 August 2022

Accepted: 11 September 2022

Published: 12 September 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In most academic discourse, the added value of Building Information Modelling (BIM) in tunnelling projects is mentioned in general terms and concrete examples from the perspective of the various sustainability goals are only discussed in a subordinate manner. A recent study on sustainability in tunneling came to the conclusion that there is only one notable publication covering this specific topic [1]. Therefore, this article takes a look at BIM in tunnelling—Tunnel Information Modelling (TIM)—in the context of social and economic sustainability and the resulting added value.

The concept of corporate social responsibility (CSR) is based on the model of three pillars [2,3]: environmental, economic, and social sustainability which are found to be equal. Moreover, the model has found its way into various political principles regarding sustainability [4,5]. Since current research regarding sustainability in tunneling or BIM focuses mostly on ecological and economic sustainability, this work concentrates on the social dimension of sustainability, the resulting increase in economic sustainability, and thereby the streamlining of tunneling projects through BIM [1,6]. In order to narrow down the general definitions of sustainability in tunneling, we have to describe sub-areas of social and economic sustainability in the context of TIM. Regarding social sustainability in the field of TIM, our approach primarily focuses on the structures and work within a team or small group. We therefore utilise our findings from a qualitative study on the topic of current developments within BIM in tunnelling [7]. With respect to economic sustainability, our focus is mostly based on evaluating the improved use of resources, which might as well result from an increased social sustainability.

In order to determine whether BIM leads to a streamlining of tunnelling projects under the aspect of social and economic sustainability, several TIM projects in various

project phases are examined and evaluated. These projects are scientifically supported by ibT—the Unit of Construction Management and Tunnelling from the University of Innsbruck regarding the topic of BIM. To conduct this study, an interim evaluation on seven different projects was performed. The focus hereon lay on the project culture as well as the project progress. Another important point of consideration was the impact of the different approaches and points in time of the implementation of BIM as well as the comparison of different projects with completely different requirements. The synopsis of these considerations provides a clear current picture of the increased and streamlined performance in TIM projects through improved social and economic sustainability.

2. Methodology

As stated, the basis for this research is a variety of research projects, which all focus on implementing BIM in tunnelling projects. Therefore, the individual TIM projects are briefly described as of May 2022 and existing interim objectives are stated. Furthermore, applied BIM structures [8,9], as well as the implementation of BIM in the course of the project in terms of time and scope, are briefly explained. The basis for this is provided by project tender documents, ongoing project documentation, meetings and their outcome, ongoing project work, and especially the results of individual conversations with those involved in the project. This is the basis for the formulation of the initial research results on the topic at hand.

Due to the necessary confidentiality over the fact of the different project stages, no project documents or statements can be quoted as sources. Moreover, all project information is anonymised to keep it confidential. Nevertheless, we want to supply an overview of the sources which were accessible to us. For the evaluation, not only official project documentation, e.g., tender documents, were used, but also meeting minutes and notes from several discussions and conversations. Consequently, the result is our interpretation from observing and supporting the projects, but they can hardly be quantified.

The discussion will include a comparison, an evaluation, and an outlook regarding the social and economic sustainability of the projects. In the conclusion, the potential benefits of BIM in tunnelling for improved social and economic sustainability and subsequently streamlined project delivery are described and summarised with regard to the interpreted results.

3. Results

All projects considered are pilot projects of Austrian public bodies on the topic of BIM in tunnelling. This status was deliberately set by those responsible, so that there is sufficient opportunity for further development and possibly even failure in the sense of a pilot project, which enables ongoing optimisation and streamlining. The following project descriptions reflect the authors' perception from our work within these projects. We structured the project descriptions on the basis of their project phase within the life cycle. Figure 1 gives an overview of the allocation of the considered projects to the different project phases.

Accordingly, an overview of the key data for each project is shown in Table 1 to simplify comparisons between the different projects. Together, these allow for an easier understanding of the structure of the conclusions and comparisons of the different requirements for the model and for BIM. Therefore, Figure 1 and Table 1 have to be kept in mind when studying the following project descriptions.

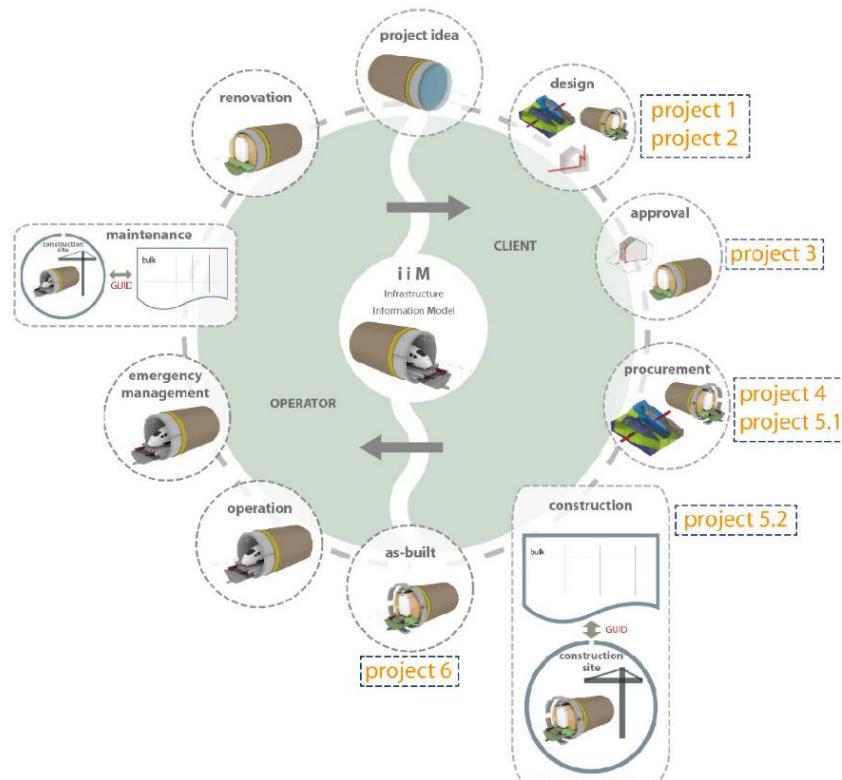


Figure 1. Tunnelling project life cycle, showing the allocation of projects to the project phases. Adapted graphic [10].

3.1. Project 1

The first project is an urban branch line which is to be extended from its current underground end station. Due to a very tight schedule, the employer has decided to carry out the project with BIM. The employer wants to develop new structures for the model elements and the associated properties. Two requirements arise for this task. It has to be compatible with the existing parts of the branch line and be ready for further expansions after the completion of this extension.

Compared to similar projects, this project has set itself a tight schedule and is making good progress towards achieving its intended targeted goals. In line with the BIM method, the employer worked very closely and openly with the design consortium to define the necessary requirements for this project and also work on innovative solutions for the emerging issues. Due to the demand of a conflict-free model, not only design phase specific problems were dealt with, but critical, already identified issues from future project phases were solved as well.

3.2. Project 2

Project 2 comprises roughly 4 km of twin tunnels. Construction of the tunnel carcass in this project has already been completed. The next step is the design of the tunnel equipment, which is going to be completed BIM-based. In order to do so, the employer has decided to create an as-built model of the built tunnel structure and use this as a basis for the tunnel equipment designing. The employer works together with iBT in order to develop automation-supported processes, workflows, and data structures for the described requirements.

Table 1. Key data of projects in regard to the tunnel and the BIM-implementation.

Project	Area	Length	Duration	Project Phase	Participants
Project 1	urban	950 m	since 2021 5 years	design	4: employer; design consortium; BIM consultant; iBT
Project 2	rural	4 km	since 2021 2 years	design	2: employer and iBT
Project 3	rural	21 km	2016–2021 5 years	approval	7: employer, four design offices, authorities, iBT
Project 4	rural	1.08 km	since 2021 approx. 6 years	procurement	9: employer, four design offices, construction supervision, geodesy, overall BIM coordinator, iBT
Project 5.1	rural	1.2 km	since 2020 approx. 5 years	design and procurement	8: employer, 5 design offices, BIM manager, iBT
Project 5.2	rural	2.6 km	since 2020 approx. 5 years	design, procurement, construction	6: employer, two design offices, BIM-manager, overall BIM coordinator, iBT
Project 6	rural	2.8 km	since 2021 approx. 2 years	operating phase	2: employer and iBT

The employer's requirements demand a modelling approach which on one hand can easily be extended; on the other hand, it has to allow for future additions and adjustments to the developed data structures. The solution for both requirements is reached with a computational design approach within BIM. By creating (semi-)automated workflows, which can be re-run when anticipated changes become effective, a powerful tool is created.

Another positive effect from this work, is the corporate social responsibility in practice. Due to ever rising operational periods for infrastructure, the employer as a public body has chosen a forward-looking approach to operate the tunnel as sustainable as possible. One of the advantages in this context is the extended service lifetime with a minimum of operational interruptions.

3.3. Project 3

The scope of this project is to increase the capacity of an existing railway line with two additional tracks which run mostly within a twin-tube single-track tunnel system. It was realised as a BIM pilot project during the phase of an environmental impact assessment. The focus of BIM implementation lay on covering all relevant topics for the environmental impact assessment, including tunnel structures, bridges, track, roads, geology, and hydrogeology. At the beginning of the project, missing specifications from the employer, software issues, and unfinished data structures decelerated the projects progress. Following joint efforts of all project stakeholders, reputable results were finally achieved.

One of the main results from this project is the introduction of a mandatory and capable common data environment (CDE). Prior to this step, all stakeholders communicated mostly via email and collaborative work was thereby time-delayed and not in line with a BIM approach. With the mandatory CDE, several birds were killed with one stone. Now all stakeholders had access to up-to-date models and data in general, which allowed for an integral and collaborative approach. It also made it possible to easily view coordinated models, without the authoring software.

Linked to the introduction of the CDE is the possibility to give the approval authorities a simple tool to view the models. With a browser-based model viewer and the appropriate permissions for the authorities within the CDE, a preliminary coordination can be achieved, without the need for special software on the part of the authorities. Furthermore, a powerful and very visual tool for public outreach is created for the authorities as well as the employer.

3.4. Project 4

The project comprises the services for the implementation of the construction of a new second tunnel tube, as well as the partial demolition and new construction of the existing

structure (first tube). It involves two 2-lane road tunnels with a length of 1.08 km and is carried out as a BIM pilot project regarding the topics of design, tendering as well as construction and billing.

As part of the contract, the employer provides a “Guideline for the modelling of infrastructure models” as well as a default data structure. These serve as the basis for processing the project and the overall BIM coordinator checks the compliance with the specifications. Furthermore, it is the employer’s goal to further develop both with each project, but on a company-wide scale rather than on a project-specific scale.

It is evident that the project benefits from the fact that the employer has a clearly defined data structure in this early design phase. In addition to the employer, the overall BIM coordinator of the ongoing project was also involved in the development of this BIM data structure. This results in synergies and optimised workflows right from the start of the project. Furthermore, there are concrete projects and time schedules for data drops, such as monthly data drops and clear agendas for meetings. The overall BIM coordinator consequently provides classic project management. Having these structures in place and in operation makes it easier to enter the project at a later stage.

In the current course of the project, collaborative work and a positive working atmosphere are evident in the core design team. The areas of responsibility are clearly separated, but emphasis is placed on an interdisciplinary exchange of information. The existing 2D preliminary plans were coordinated and transferred to the BIM design. In the ongoing design process, there is constant constructive collaboration, in which a wide variety of issues are also openly discussed and dealt with. To simplify communication, an issue management software was introduced to enable efficient processing and solving of collisions and to optimise the project flow at an early stage. This is the result of a well-coordinated project team that generates a noticeably faster project process through the joint BIM processing of the project.

3.5. Project 5

Project no. 5 is divided into the site clearance (Project 5.1) and the associated construction of a carcass tunnel (Project 5.2). Both subsections are carried out as BIM pilot projects and are part of a larger infrastructure project.

BIM design started in the first quarter of 2021 with the detailed design. iBT began the scientific support of the projects in the last quarter of 2021. The separation into two single projects of the carcass tunnel and the associated site clearance took place in 2022 due to the different design and tendering levels and the differing parties involved. BIM management (structural engineering specialist) and the overall BIM coordinator (infrastructure designer) remained unchanged from this separation.

3.5.1. Project 5.1

The construction activities for the site clearance include forest clearance, establishing a construction site setup area, creating construction site access and exit, building a temporary road, drainage, various utility line relocations, and the construction of protective walls and noise barriers.

BIM is used in the designing of the tendering process and the preparation of tender documents, construction designing, plausibility checks for billing, as well as as-built modelling and maintenance planning.

The implementation of BIM in the design process of the project took place in 2021 with the detailed design and tender design. The BIM manager position is held by a BIM specialist with a background in structural engineering. The overall BIM coordinator is also the designer for the site clearance. This dual function results in significantly shorter work processes due to the in-house handling of a wide range of tasks. Due to the compact project team, the BIM processes are handled in an unagitated manner. Unresolved issues, also due to missing or unclear Employer’s Information Requirements (EIRs), were dealt with promptly and unpretentiously. First added values became apparent as soon as BIM aided

design began. For example, in the course of the initial design activities for the foundations of the noise barriers, it was recognised that there was a collision with the existing gas pipeline. As a result, the design could be adjusted at an early stage. In the course of the project, it became apparent that the model deliveries and model checks worked consistently.

The models were created up to the specified tender readiness level and, in the course of construction, the billing is already carried out model-based. The as-built adaptions of the models have to be implemented by the designers. Thus, the model sovereignty remains with the designer.

3.5.2. Project 5.2

The measures of this subsection include the construction of the pre-cut for a construction site setup area and the tunnel groundbreaking of the carcass tunnel, the excavation and securing of the south tunnel (total length 2.6 km), the three orthogonally running blind tunnels for turning niches (lengths 7–27 m), six cross passages (lengths 6–22 m), as well as the north tunnel (length 110 m). This project processes the construction of an exploratory and later rescue tunnel for a railway tunnel.

BIM is used in the design of the tender and the preparation of the tender documents, construction designing, plausibility checks for billing, as well as as-built modelling and maintenance planning.

The implementation of BIM in the design process of the pilot project took place in 2021 with the detailed design and tender design. iBT started with the scientific monitoring of the project in the 4th quarter of 2021.

The position of BIM management is filled by a BIM specialist with a background in structural engineering. The overall BIM coordination is carried out by an infrastructure design office. Further project participants are exclusively infrastructure and tunnelling specialists, including tunnel designers and geologists.

The BIM implementation for this project and during this specific project phase meant that existing 2D designs from various trades had to be reworked for the BIM approach. From an outside view, it seemed as if the BIM process was off to a slow start. In fact, however, reaching an important employer decision regarding the tunnel sealing concept led to a considerable delay in the start of the BIM design. The resulting reduced time to carry out the necessary modelling work showed that a BIM approach can lead to time-saving and efficient results. Nevertheless, once again from an outside view, further potentials for improvement with regard to cooperation, collaboration, and team structure were identified. One of the reasons for time loss might have resulted from the different technical backgrounds and the resulting translation problems between the BIM management and the design offices. It repeatedly became apparent that issues led to unnecessary model adaptions and therefore showed that not only specifically defined employer requirements, but also a harmonious team are required.

In the end, models were created up to the specified tendering stage and in the course of construction, the billing will also be carried out model-based.

3.6. Project 6

Project 6 is a research project and comprises the post-modelling by the staff of iBT of the new construction of a second tube for a road tunnel which was completed in 2020. The aim is to create an as-built model of the ground according to the geological documentation of the 2016–2017 tunneling activities, as well as the tunnel structure in its final state and thereby in its operational state. The modelling is carried out “off the shelf”, without detailed requirements from the employer. The employer’s requirements for a BIM data structure and the modelling process (“Guideline for the modelling of infrastructure models”), which were developed in 2021–2022, will be evaluated in the course of the post-modelling work.

It should be noted in advance that the construction of this project has been completed and it is in operational phase now. Project and data management and data storage were consistent, comprehensible, and well-structured over the period of design and construction.

New project members were able to quickly get an overview of the correct data storage and retrieval.

During the initial data collection for the post-modelling of the ground and the structure, a few results were already worked out. Data structures, no matter how good they were for project processing, cannot simply be used for BIM post-modelling. Existing data structures, such as formats and storage, cannot be adopted without friction. For example, certain data formats were not contractually required because they were not considered necessary. Thus, all design documents for the project were requested as unchangeable PDF files, whereas changeable data formats, such as Word, Excel or dwg.'s are not comprehensively available.

The necessary retrieval, sorting, filtering, and processing of existing data takes an incredible amount of time and expertise. Furthermore, it becomes apparent that historical knowledge of the construction site is also an advantage. By establishing a good working relationship with the involved design offices, it has become possible to obtain basic data in a reusable form in coordination with the employer. However, this is also associated with additional effort on both sides and includes data requests, searching and finding, transmitting, and processing.

It can therefore be concluded from the initial post-modelling work that harmonised structures prevent this increased time expenditure. This means that basic data can be collected and processed by a BIM modeler, for example, even without the corresponding expertise or knowledge of the construction site.

With appropriate data preparation and definition of the modelling objective, the BIM-compliant process can be started effectively, and initial results can be generated quickly.

4. Discussion

The discussion provides a comparison and evaluation of the results. As stated, the considered projects were specifically evaluated for this article with regard to social and economic sustainability. In view of the different project phases, among other things, the comparison of the projects shows that an increase in sustainability is possible with the use of BIM. In the following, these sustainability improvements are discussed for the individual projects.

Project 1: From the beginning of the project, a joint design approach is used. Especially in this early project phase, this resulted in a constructive and solution-oriented work philosophy. The joint development of the project requirements and the execution plan is socially sustainable due to the necessary teamwork. Due to the resulting early coordination on key design issues, efficiency and economic sustainability are increased.

Project 2: With the developed (semi-)automated modelling workflows themselves, a very economically sustainable approach was chosen. Due to the fact that anticipated future changes were integrated into the considerations from the very beginning, the additional effort for the development of more challenging (semi-)automatic workflows is more than compensated. These workflows are also the basis for the social responsibility of the employer, by exceeding the current legal requirements regarding model-based tunnel operation. In this case, social sustainability in a wider sense results in economic sustainability, when looking into the future.

Project 3: The introduction of a CDE led to a more collaborative and integral workflow and thus increased the social sustainability. A resulting effect is increased economic sustainability through a more efficient design process and more generally speaking, a quicker path towards the project's approval. Linked to the approval is the possible integration of the approval authorities within the CDE which could lead to a closer coordination between employer, design offices, and authorities. In general, similar to the introduction of the CDE, this new possibility leads to an increase in social and consequently economic sustainability.

Project 4: The combination of a small initial BIM design team and a coordinated data structure results in a harmonised project workflow. This facilitates the frictionless growth of the project team. Social sustainability is based on considerate project management. Short

distances, undisputed technical competence, and qualified interdisciplinary coordination lead to efficient work processes, which in turn is economically sustainable.

Project 5.1: The dual function of the BIM coordinator and designer automatically results in greater efficiency in processing, among other things through time savings. Leaving the model sovereignty with the designer during construction saves time and resources, since, for example, the professional and technical familiarisation with the model is no longer necessary. Being a harmonious and smaller design team enables a socially sustainable exchange within the project team, as for instance, the contact persons are known and questions and feedback can be given directly.

Project 5.2: It has been shown that even project teams that are not free of friction can become more sustainable through BIM. Individual conflicts and their solutions result in increased resilience of the participants in terms of stress management due to the inharmonious project team and the translation issues that occurred between BIM management and specialist design offices. This falls into the category of social sustainability and the learning effect. The project goal of future-proof BIM processing was achieved despite different approaches.

Project 6: From the initial post-modelling work, it is evident that harmonised structures can minimise time expenditure and thus be more economically sustainable. With the appropriate preparation of the data and the definition of the modelling objective, initial results can be generated quickly and thereby economically.

In the comparison of the projects, it is clearly evident that the degree to which sustainability can be increased depends to a large extent on the timing of the implementation of BIM in the course of the project and on the people involved.

The keys to social sustainability, which includes learning effects and improved project communication, are good project culture, collaborative working and development, and conflict resolution. Economic sustainability, and thus the saving of resources, is largely based on good teamwork, short distances, and well-considered workflows.

5. Conclusions

Considering the social and economic sustainability aspects of the projects under consideration, the key finding is that, on a small scale, social sustainability primarily comprises teamwork, appreciation, and knowledge gain. The ideal combination of these three topics strengthens the professional and social competences of all stakeholders. Furthermore, it leads to a knowledge transfer to the next projects (learning effects) and to a necessary paradigm shift in project management. On a larger scale, this leads to improved and more descriptive project and science communication—which also goes beyond the project teams.

Economic sustainability with BIM is also based on the improved use of resources. Harmonised, structured workflows enable more efficient, collaborative approaches. This results in shorter coordination times and better resource planning and utilisation. As a result, projects are completed more quickly from cradle to cradle, i.e., optimised projects.

In order to achieve the goal of streamlining tunnel projects through BIM, the following requirements are necessary in terms of social and economic sustainability.

The early establishment of a “comfort zone” for project participants through coordinated and harmonised structures in data and project management leads to shorter communication and work paths. Mutual appreciation and awareness of the boundaries of one’s own competencies are indispensable in this context. This makes it possible to develop targeted solutions, while ensuring a view beyond the end of one’s nose. Obstructive translation problems between disciplines must be avoided, as this generates project delays. Short distances within the project team in terms of communication, technical exchange, coordination, and review lead to quick solutions to problems and efficient project execution. Any conflicts that arise can be solved more harmlessly within these balanced structures. Other important aspects are the need to ensure that digitalisation does not permanently increase costs without simultaneously becoming more efficient, and that sufficient resources—both human and technical—are available to be able to provide the necessary services.

The early implementation of BIM in tunnel construction and the correct use of all tools (CDE, etc.) increases the social and economic sustainability of tunnelling projects. Ultimately, this also requires a change in the course of official procedures.

As these results represent the authors' perception and interpretation, a further step has to be a comprehensive series of interviews within BIM project teams to elicit the perceptions of social and economic sustainability through BIM in a business environment. For this in-depth work, an interdisciplinary cooperation with social scientists should also be considered in order to do justice to the topic of social sustainability.

Author Contributions: All authors have contributed to the current paper. Conceptualization, methodology, data collection, writing—original draft preparation, I.M.-K. and H.E.; writing—review and editing, I.M.-K., H.E., S.H., F.H. and M.F.; supervision, funding acquisition, M.F. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors appreciate the support provided from all the participants of the research projects and have to thank them anonymously at this point.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Huymajer, M.; Woegerbauer, M.; Winkler, L.; Mazak-Huemer, A.; Biedermann, H. An Interdisciplinary Systematic Review on Sustainability in Tunneling—Bibliometrics, Challenges, and Solutions. *Sustainability* **2022**, *14*, 2275. [[CrossRef](#)]
2. Lexikon der Nachhaltigkeit. Lexikon der Nachhaltigkeit | Wirtschaft | Drei Säulen Modell. Available online: https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/1_3_a_drei_saeulen_modell_1531.htm (accessed on 19 July 2022).
3. Mensah, J. Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Soc. Sci.* **2019**, *5*, 1653531. [[CrossRef](#)]
4. European Commission. Sustainability-Buildings & Construction. Available online: https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/buildings-and-construction_en (accessed on 19 July 2022).
5. United Nations Sustainable Development. The Sustainable Development Agenda—United Nations Sustainable Development. Available online: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/> (accessed on 19 July 2022).
6. Chong, H.-Y.; Lee, C.-Y.; Wang, X. A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability. *J. Clean. Prod.* **2017**, *142*, 4114–4126. [[CrossRef](#)]
7. Exenberger, H.; Massimo-Kaiser, I.M.; Flora, M. Current developments of digital ground modelling in tunnelling. *Geomech. Und Tunn.* **2022**, *15*, 284–289. [[CrossRef](#)]
8. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. *Digital Design, Building and Operation of Underground Structures BIM in Tunnelling*; Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V: Cologne, Germany, 2019.
9. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. *Digital Design, Building and Operation of Underground Structures. BIM in Tunnelling Model Requirements—Part 1: Object Definition, Coding and Properties: Supplement to DAUB Recommendation BIM in Tunnelling* (2019); Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V: Cologne, Germany, 2020.
10. Flora, M.; Fröch, G.; Gächter, W. Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle. *Bautechnik* **2020**, *97*, 780–788. [[CrossRef](#)]

9.2.2 ISRM-Kongress 2023

From prognosis Ground Model to Tender Model and Tunnel Construction Framework Plan with Tunnel Information Modeling

[Vom Prognose-Baugrundmodell zum Ausschreibungsmode und Tunnelbautechnischen Rahmenplan mit Tunnel Information Modeling]

From prognosis Ground Model to Tender Model and Tunnel Construction Framework Plan with Tunnel Information Modelling

Ines Massimo-Kaiser

Unit of Construction Management and Tunnelling (iTBT), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

Hans Exenberger

Unit of Construction Management and Tunnelling (iTBT), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

Hannah Salzgeber

Unit of Construction Management and Tunnelling (iTBT), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

Hannah Werkgarner

Unit of Construction Management and Tunnelling (iTBT), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

Richard Loidl

ASFINAG Bau Management GmbH, Innsbruck, Austria

Matthias Flora

Unit of Construction Management and Tunnelling (iTBT), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

ABSTRACT: This article presents a concept for a digital ground model usable throughout all project phases and visualizes causalities between geological conditions and the tunnel structure. Specifically, a dynamic modeling approach is introduced to represent the geological conditions from design to construction. Three process phases are dealt with: (i) a preliminary phase defining the model area, (ii) the geological prognoses, including parameterization and schematization along the alignment as a base for further planning steps, and (iii) the creation of a cumulative tunnel construction model. A schematic, parameterized, small-scale tunnel excavation element model is the basis for a dynamic adaptation of geology. In addition, detailed predictions modeled along the alignment are introduced to represent the predicted geology in higher detail, adjustable in the event of changes, and thus represent the current geological information in the construction area. These models form the basis for a tender model and a digital tunnel construction framework plan.

Keywords: *TIM, framework plan, ground model, design process.*

1 INTRODUCTION

In conventional and mechanized tunneling, face stability is one of the constantly prevailing questions relevant to tunneling. Different tunneling methods, unique construction methods, support elements, and varying work steps are required depending on the geological conditions to achieve and maintain tunnel safety standards. The framework conditions from geology, geotechnics and tunneling and their tunneling relevant parameters contribute to developing and preparing a combined tunneling framework plan (Austrian Society for Geomechanics 2010).

Model-based design, based on – and in interaction with – a valid ground model, as part of an infrastructure information model (iiM) as a holistic, interdisciplinary and up-to-date representation of the tunnel structure in the form of a digital twin, facilitates the answer to the initial question (Flora et al. 2020). Furthermore, the progressing application of BIM in tunnel and infrastructure design (Tunnel Information Modelling - TIM), shows that there are still limits to implementing the BIM

method. Implementing the digital twins and its defined goals, which further depend on its definition, is not always satisfactory.

This article describes a solution that can currently be implemented to meet the requirements in planning concerning the creation of a model-based tunnel construction framework plan and to create the basis for updating the geotechnical implementation planning.

2 OBJECTIVES

2.1 *Research question*

A literature review was conducted on tunnel construction framework plans in TIM international (Mahsa Ghaznavi 2013) (Muhammad Shoaib Khan, In Sup Kim, Jongwon Seo 2023) and within the DACH region. So far, almost no solutions for model-based tunnel construction framework plans have been sufficiently described (Wenighofer et al. 2022). Furthermore, it showed that there are approaches to solutions in individual planning disciplines (Jonas Weil 2020). However, a model-based, all subsections linking, readable representation of the geological-geotechnical and tunnel construction conditions does not yet exist in the DACH region. A 3D-model-based representation of the classic 2D tunnel construction framework plan has not yet been produced. Implementing this possible requirement was evaluated concerning the Austrian Society for Geomechanics (OeGG) guidelines for the geotechnical design of underground structures with conventional and mechanized excavation (Austrian Society for Geomechanics 2010 & 2014).

This resulted in the research questions:

- How can a model-based representation of the geological baseline information be carried out with the current means and methods?
- How can these methods be used to update geotechnical design during construction?

2.2 *Scope*

To answer the questions mentioned above, the framework is given within the OeGG – guidelines (Austrian Society for Geomechanics 2010) (Österreichische Gesellschaft für Geomechanik 2014), but implementation as a TIM process is still outstanding. Therefore, a new dynamic approach was developed. This maps the geological-geotechnical conditions and the tunneling-relevant information from design to construction according to the OeGG – guidelines in a TIM model and is based on the classical 2D planning processes.

Three process phases are dealt with: (i) a preliminary phase for the definition of the geological model area, (ii) the geological prognosis, parameterization, and schematization close to the alignment as a basis for the further geotechnical and tunneling design steps and (iii) the final phase of the generation a cumulative model-based tunnel construction tender model.

This is achieved with two fundamental new approaches. First a schematic, parameterized, small-scale excavation element model forms the basis for the dynamic adjustment of the geology, among other things as the basis for geotechnical design. Additionally, detailed 2D profiles depicting the geology near the tunnel axis are generated for visualizing the projected terrain. These profiles can be modified as per the requirements in case of any changes in the geological structure. This ensures that the geological information in the construction zone is always up-to-date and aligned with the target objectives. A hybrid digital near-axis ground model (3D and 2D) is created, which can be used and updated for geotechnical and tunnel construction changes during design (e.g. for considering of different cross-section scenarios).

3 RESULT

After identifying the pertinent questions and objectives, we developed a geological design process that outlines a model-based plan for tunnel construction (refer to Figure 1). To ensure a

comprehensive approach, we outlined three distinct process phases based on the available data, including the geological basis model, laboratory and field exploration data, and alignment and clearance profile. This approach allows for a thorough analysis and construction plan.

3.1 Process description

Phase 1: During Phase 1 of the process, the model area is defined. In traditional 2D planning, this occurs after geological basics have been surveyed in the field (such as mapping and explorations) and the alignment is available. The creation of a longitudinal section related to the axis and a geological horizontal section in the area of the planned structure are part of this phase. These sections help determine the geological conditions in and around the excavation area, which are required for geotechnical design. For example, in tunnel design, geotechnically effective surroundings are two to three times the excavation diameter. The model area must be reduced accordingly when implemented in TIM. In contrast to the basic geological model, the near-axis ground model only includes the area of the planned structure and its geotechnically effective surroundings. Existing structures in the immediate vicinity and, in the case of shallow tunnels, the ground surface must also be considered. The geology basis model is not adapted in the forecast to avoid constant unnecessary over-processing.

Phase 2: This phase involves the detailed preparation of geological baseline data for tunnel design. After preparing axis-related geological prognoses sections along the alignment and detailed forecasts at intersections, cross-section changes, geological transitions, or weak zones, ground types and homogeneous areas are defined. These specifications help determine behavior types, face behavior, tunneling method, system behavior, and tunneling classes. A digital geological prognostic longitudinal section is created based on the near-axis ground model (phase 1). This section assesses and predicts the geology close to the structure, considering exploration results and a professional model and plausibility check.

Point of Information Need (POIN) areas can result from this detailed examination. These areas need to be evaluated in detail for further planning, such as construction areas with low geological prognosis reliability, areas with low coverage, fault zones, or existing structures in the vicinity. A structure-related cross-section is then created from the near-axis ground model for a detailed analysis of these POINs. The results are presented in great detail, showing possible variances by using one to several cross-section scenarios. The near-axis ground model is not adapted to this level of detail, but is supplemented with detailed cross-section scenarios. These detailed analyses may also result in a need for further exploration at the POIN for the project, should the information situation not be sufficient for further planning.

From the synopsis of the geological basics and the detailed cross-section scenarios, a structure-related geological prognosis results, as well as the definition of ground types. A small-scale excavation element model is then created based on this geological prognosis data. This model-based approach includes a sub-model separate from existing basic models but linked to them. Geological-geotechnical relevant properties are assigned to model excavation elements, and due to the small-scale processing, a station-specific assessment, evaluation, and necessary adjustment/supplementation of the properties are possible at any time. The distribution of information can be graphically displayed via color coding of individual model properties, which allows for easy evaluation. The excavation element model is the basis for the geotechnical design, which takes place between phases 2 and 3.

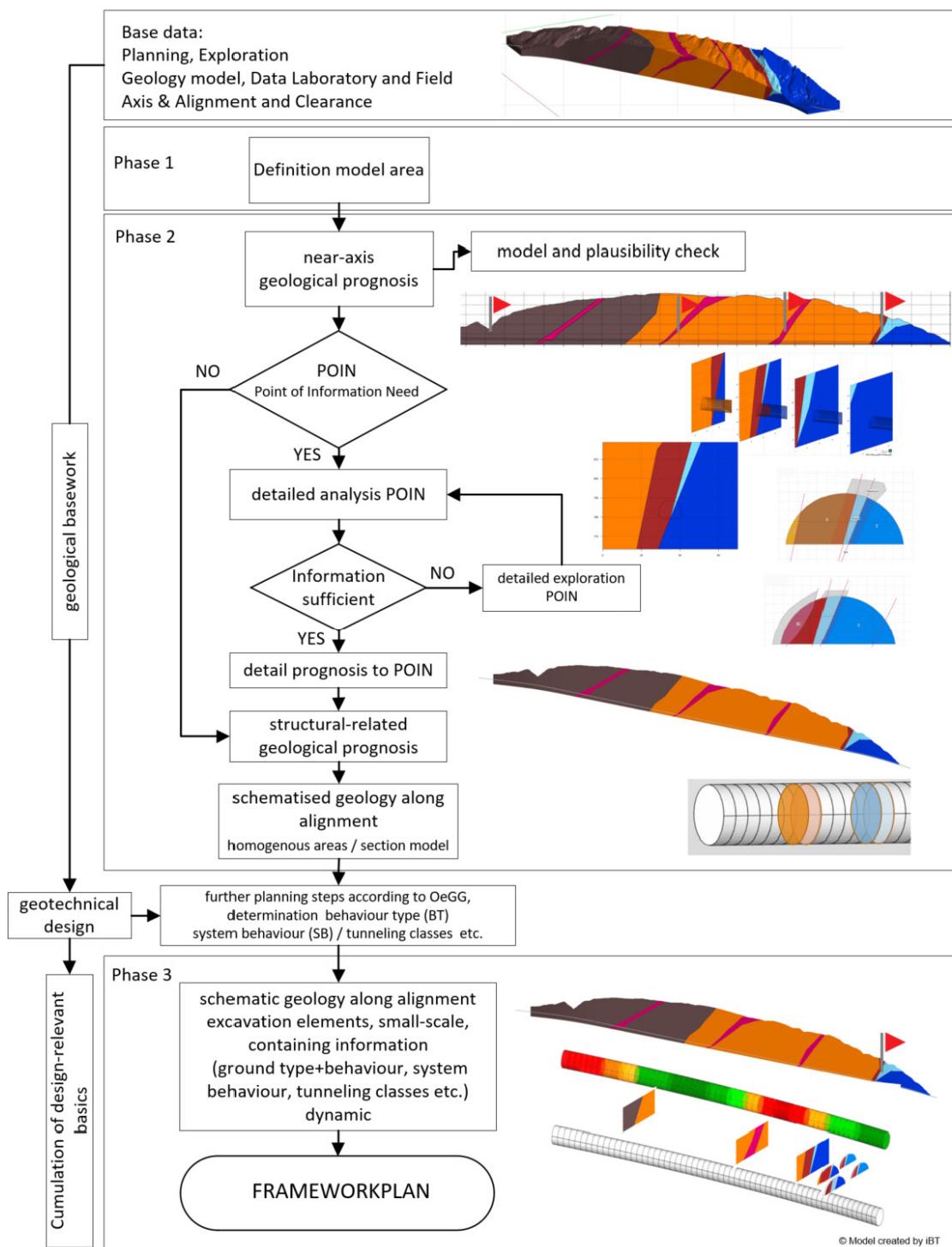


Figure 1. Process for the creation of a model-based tunnel engineering framework plan.

Phase 3: Finally, the geological prognosis and the geotechnical and tunnel construction design based on it are combined. The individual design results are integrated as properties into the existing small-scale excavation element model. The additional information can also be displayed via heat maps and visually supplement the near-axis ground model and data-related in the sense of evaluation bands. The linked cross-section scenarios supplement the digital tunnel construction prognosis section with detailed information at the designated POIN.

3.2 Example application Perjentunnel fault-zone Innvalley-fault

To demonstrate the model-based framework plan for tunnel construction, the Innvalley-fault in the second tube of the Perjentunnel is cited as an example. The southern second tube was designed based on geological base maps and explorations, and was excavated in 2016-2017. Using LEAPFROG® Works software, the geological basis model and near-axis ground model for phase 1 were created, allowing for the derivation of longitudinal and cross sections at any station (POIN). The sheets for phase 2 were exported as a PDF plan and .dwg file for further processing. Detailed prognoses for the excavation area were prepared using TUGIS.NET® Suite V7.0 software and exported as a .dwg-file. The excavation element model for phase 2 was parameterized using Autodesk Revit® software, and geotechnical and tunnel construction attributes were added for phase 3. Figure 2 displays the model-based tunnel construction framework plan for the Perjentunnel fault zone - Innvalley-fault, based on the described process phases.

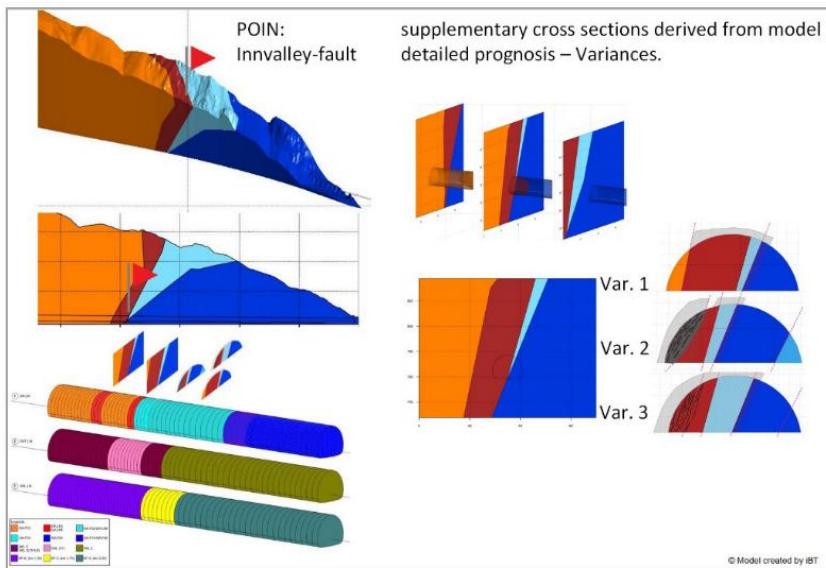


Figure 2. Representation of model-based tunnel construction framework plan.

The color-coded representation of any property results in a station-accurate visual representation of causalities between the ground and the structure. The cross sections created as plan derivation from the near-axis ground model, or the detailed supplementary profiles with a higher degree of information than the existing geological 3D models, enable a better assessment of the excavation situation.

4 DISCUSSION

To successfully implement the proposed concept, it is essential to have reliable geological data based on the guiding principles of good exploration, documentation, and interpretation (gE-gD-gI). A thorough data structure, collaboration, and constant exchange of information are necessary to establish causal relationships between the ground and the structure throughout the project. However, the current methods fall short of representing the detailed geological prognosis, which is often required for specific construction phases, in the ground model. Therefore, the proposed concept involves a hybrid representation of the near-axis ground model using 3D and 2D detail models at POINs. This allows for the visualization of relevant properties by storing information on the excavation element model's objects, enabling easy access to all geological, geotechnical, and engineering information at any station and time. This approach offers a comprehensive overview of

the fundamentals, making it possible to visualize variant designs more quickly and promote interdisciplinary cooperation while increasing transparency throughout the project.

5 SUMMARY & OUTLOOK

The small-scale schematic preparation of the geological-geotechnical-tunneling basics in combination with the near-axis ground model enables the station-accurate prognosis, prognosis adjustment and recent documentation as well as the updating of the geotechnical design during the construction phase. There is no need to continually adjust the geological base model, as good, adaptable detailed prognoses are available. The existing near-axis ground model is – depending on the client's requirements – only adapted based on the documentation data of the excavation. Necessary updates of the geological prognosis, and document and changes in the tunnel drive are carried out via the excavation element model. The integration of the information obtained during the excavation work provides the basis for a constant target/actual comparison and for updating the work estimate.

To further develop the project, it is crucial to place a transparent frame of the schematic near-axis ground model around the structure model, with its effective geotechnical range. Any BIM/TIM software can generate geometrically simple elements, including 3D geometry and attribution, and can be used as a general information carrier. This will allow non-geometrical information from any project participant to be included, even those without BIM/TIM practices, such as information about a chainage based on simple lists. However, referencing several schematic models with their data in modeling software can result in a bad performance, and identical schematic overlays can make it difficult to find the needed data. Thus, bundling information of several project participants in one element can provide an efficient solution in terms of managing the model and its size. As the amount of information increases, it is vital to structure the information to ensure organized and efficient data management.

REFERENCES

- Austrian Society for Geomechanics (2010): Guideline for the Geotechnical Design of Underground Structures with Conventional Excavation. Ground characterization and coherent procedure for the determination of excavation and support during design and construction, 2010.
- Flora, Matthias; Fröch, Georg; Gächter, Werner (2020): Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle. In: *Bautechnik* 97 (11), S. 780–788. DOI: 10.1002/bate.201900095.
- Jonas Weil (2020): Digital ground models in tunnelling – Status, chances and risks. *Digitale Baugrundmodelle im Tunnelbau – Status, Chancen und Risiken* H.2., 2020, S. 221–236. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1002/geot.201900078>.
- Mahsa Ghaznavi (2013): Developing an Information Modeling Framework for Tunnel Construction Projects. A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Construction Engineering & Management. Masterthesis.
- Muhammad Shoaib Khan, In Sup Kim, Jongwon Seo (2023): A boundary and voxel-based 3D geological data management system leveraging BIM and GIS. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 118 (2023) 103277. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103277>.
- Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (2014): Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb. Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung, 2014.
- Wenighofer, Robert; Eder, Nina; Speckmoser, Valentin; Villeneuve, Marlene; Winkler, Leopold; Galler, Robert (2022): Adaptive and parameterised 3D BIM model for the tunnel tender and excavation phase. In: *Geomechanics and Tunnelling* 15 (3), S. 272–278. DOI: 10.1002/geot.202100075.

Posterpräsentation zum Fachbeitrag:

From prognosis Ground Model to Tender Model and Tunnel Construction Framework Plan with Tunnel Information Modelling

Ines Massimo-Kaiser¹⁾, Hans Exenberger¹⁾, Hannah Salzgeber¹⁾, Hannah Werkgarner¹⁾, Richard Loidl²⁾, Matthias Flora¹⁾

¹⁾ Unit of Construction Management and Tunnelling (BT), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria
²⁾ ASFINAG Bau Management GmbH; Rennweg 10a, Innsbruck, Austria



INTRODUCTION

In conventional and mechanized tunneling, face stability is one of the constantly prevailing questions relevant to tunneling. Various tunneling methods and support elements are needed based on geological conditions for safety. Geological, geotechnical, and tunneling factors contribute to a combined tunneling framework plan (Austrian Society for

Geomechanics 2010). Model-based design using a ground model in an infrastructure information model (iIM), aids in addressing these challenges (Flora et al. 2020). A literature search showed, almost no solutions for model-based tunnel construction framework plans have been sufficiently described, but there are approaches to solutions in individual planning disciplines

(Jonas Weil 2020). This contribution describes a solution that can currently be implemented to meet the requirements in planning concerning the creation of a model-based tunnel construction framework plan and to create the basis for updating the geotechnical implementation planning.

RESULTING RESEARCH QUESTIONS

- How can a model-based representation of the geological baseline information be carried out with the current means and methods?
- How can these methods be used to update geotechnical design during construction?

RESULTS

A geological design process which outlines a model-based plan for tunnel construction (refer to Figure 1) was developed.

- In Phase 1 of the process, the model area is defined.
- Phase 2 involves the detailed preparation of geological baseline data for tunnel design. Point of Information Need (POIN) areas can result from this detailed examination. From the synopsis of the geological basics and the detailed cross-section scenarios, a structure-related geological prognosis results, as well as the definition of ground types. A small-scale excavation element model is then created based on this geological prognosis data.
- During Phase 3, the geological prognosis and the geotechnical and tunnel construction design are combined. The individual design results are integrated as properties into the existing small-scale excavation element model and can be visualized by color-coding.

- Developed new approaches:
- Schematic excavation element model and detailed 2D profiles.

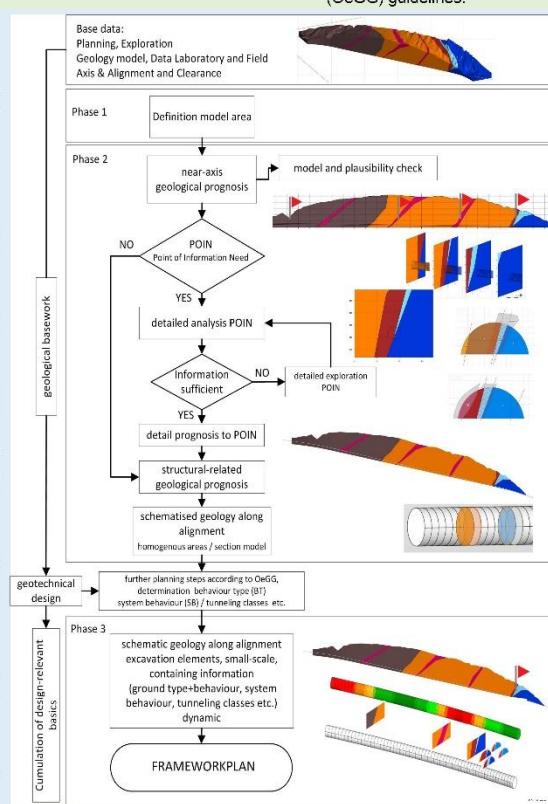


Figure 1. Process for the creation of a model-based tunnel engineering framework plan

CONSIDERED SCOPE

- Model-based tunnel construction framework plans.
- Developing a model-based representation of geological information.
- Updating geotechnical design during construction.
- Applying the solution based on the Austrian Society for Geomechanics (OeGG) guidelines.

To demonstrate the model-based framework plan for tunnel construction we did an example application in Perjtunnel fault-zone Innvalley-fault:

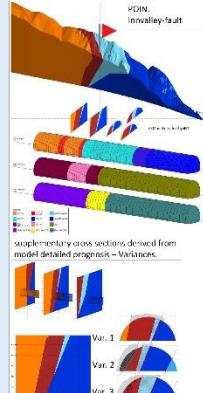


Figure 2. Representation of model-based tunnel construction framework plan

SUMMARY & OUTLOOK

The schematic preparation of the geological-geotechnical-tunneling basics in combination with the near-axis ground model enables the station-accurate prognosis, prognosis adjustment and recent documentation as well as the updating of the geotechnical design during the construction phase. Structured information and efficient data management are crucial for project development. This is even more important as the amount of information will further increase.

REFERENCES

- Austrian Society for Geomechanics (2010): Guideline for the Geotechnical Design of Underground Structures with Conventional Excavation. Ground characterization and coherent procedure for the determination of excavation and support during design and construction, 2010.
- Flora, Matthias, Fröch, Georg, Gächter, Werner (2020): Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle. In: *Bauingenieur* 97 (11), S. 780–788. DOI: 10.1002/bafe.201900095.
- Jonas Weil (2020): Digital ground models in tunnelling – Status, chances and risks. Digitale Baugrundmodelle im Tunnelbau – Status, Chancen und Risiken H.2., 2020. In: *Geomechanics and Tunnelling* 15 (3).S. 221–236. DOI: 10.1002/geot.201900078.



AUSTRIAN
SOCIETY FOR
GEOMECHANICS

Contact presenting author
 ines.massimo@uibk.ac.at
**universität
innsbruck**
Unit of Construction
Management and Tunnelling

9.2.3 ISRM-Kongress 2023

Concept for Tunnel Information Modeling based work-preview and documentation during construction at Tunnel Angath.

[Konzept zur baubegleitenden Arbeitsvorbereitung und Dokumentation im Tunnel Angath auf Basis des Tunnel Information Modeling]

Concept for Tunnel Information Modelling based work-preview and documentation during construction at Tunnel Angath

Hans Exenberger

Unit of Construction Management and Tunnelling (iTBT), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

Ines Massimo-Kaiser

Unit of Construction Management and Tunnelling (iTBT), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

Hannah Salzgeber

Unit of Construction Management and Tunnelling (iTBT), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

Peter Kompolschek

Architekturbüro Kompolschek, Villach, Austria

Frédéric Heil

ÖBB-Infrastruktur AG, Vomp, Austria

Matthias Flora

Unit of Construction Management and Tunnelling (iTBT), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

ABSTRACT: For the realisation of the ÖBB project Tunnel Angath, the idea was developed to use BIM for various controlling purposes. This publication takes a closer look at the implementation for the areas of work preview and documentation. Derived from established methods of conventional tunnel construction, the necessary models and their data requirements are defined. These include a target model based on the tender, several evolutions of work-preview models as well as singular as-built models, representing each excavation round. All models combined allow for a full documentation of the construction processes and its complete history. The accompanying data structure offers automated dependencies and future-proof expansion capabilities. Finally, this paper presents a concept, which still needs to be proven feasible within the pilot project.

Keywords: *Tunnel Information Modelling, TIM, Building Information Modelling, BIM, Tunnelling, Digitalisation.*

1 INTRODUCTION

Building Information Modelling (BIM) in the field of tunnelling – Tunnel Information Modelling (TIM) – has turned from a trend to a method requested by the construction industry and is currently pushing into all life cycle phases and disciplines of tunnelling. The construction phase is currently underrepresented, but holds high potential to generate many advantages by implementing BIM methods. So far, very few documented efforts exist. Single aspects of TIM in the construction phase are, for example, described in (Baraibar et al., 2022), where BIM was used for special use-cases within the execution of a tunnelling project, or (Hegemann et al., 2020), showing a BIM-based as-built documentation of segmental lining rings. On a larger scale, the general benefits of implementing BIM in infrastructure projects are shown by (Massimo-Kaiser et al., 2022).

The BIM pilot-project of the Austrian Federal Railways (ÖBB) for the construction of the Tunnel Angath generated the requirement to further develop BIM into a controlling tool for the client. This paper therefore takes a closer look at the challenges of handling work previews and construction documentation with TIM, exemplified by a conventional tunnel project.

2 SCOPE

The scope and goal for the successful development of a BIM-supported work-preview and documentation of the construction process were defined in coordination with the client. This was done during the tendering phase, with the possibility of applying, testing and adapting the developed concept in the course of the execution of the Tunnel Angath in the sense of the BIM pilot project and the alliance according to the resulting requirements. A workflow is to be developed in order to handle these steps within the current possibilities of modelling and data management. The overall objective is the continuous and consistent documentation of all construction activities and construction-related services as well as their interconnection. Based on this information, the work-previews are verified and adapted if necessary. All this information will then be used to perform target-actual comparisons.

Working within the construction phase of a tunnelling project, it was further defined, that a parametrically constructed tender- and target-model are considered to be given. A possible approach for a model-based tunnel framework plan is described in (Massimo-Kaiser et al., 2023). Due to the project-specific approach, it is further necessary that current Austrian standards are considered. The most relevant standards therefor are the

- Guideline for the Geotechnical Design of Underground Structures with Conventional Excavation (Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2021)
- DAUB recommendations for BIM in Tunnelling and its five sub-parts (Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V., 2019)
- Applicable Austrian standards, e.g. B-2203-1 Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm (Austrian Standards International, 2001).

The client therefore wants a tool to analyse and monitor the ongoing construction and derive certain project key performance indicators (KPI's) from the model. It is the goal to provide a solution for the use-case of BIM for controlling.

3 CONCEPT FOR TIM BASED WORK-PREVIEW AND DOCUMENTATION

In order to demonstrate a concept for TIM-based work-preview and documentation for conventional tunnelling, a two-step development process was completed. First, the necessary models were derived from the current workflow to create a work-preview and document the tunnel-advance. Based on these models, their individual requirements regarding data structure were developed in a second step.

Figure 1 shows the current workflow and the necessary derived models. Starting with the tender design and the accompanying tender model, the first step before construction starts involves the execution design. The resulting model forms the target-model for the controlling process. Then, construction can commence and the cyclical part of the process from Figure 1 starts. The first current work preview is solely based on the target model. Next, the excavation rounds commence, as does the need for documentation. This means that first as-built models are created in order to allow for full documentation. Based on new information from the documented excavation round, it is decided whether the excavation and support need to be adapted or not. If not, the work preview is updated on the basis of the target model and the cycle starts again. If it needs adapting, the work preview has to be worked on and once again go through an approval process, before the construction workflow is adapted and updated. For this concept, it is not further described how, for example, a construction and cost schedule can automatically be derived from the current work-preview and the target model.

When visualised over time, the models go through a development as presented in Figure 2. The target model is untouched. The work-preview model evolves over time and is either updated from the target model or changed with each excavation round and its accompanying knowledge gain. Finally, the sum of the individual as-built models, used for documentation, forms the overall as-built model. To facilitate easy target-actual comparisons, weekly, monthly and quarterly summaries of the as-built models are also provided.

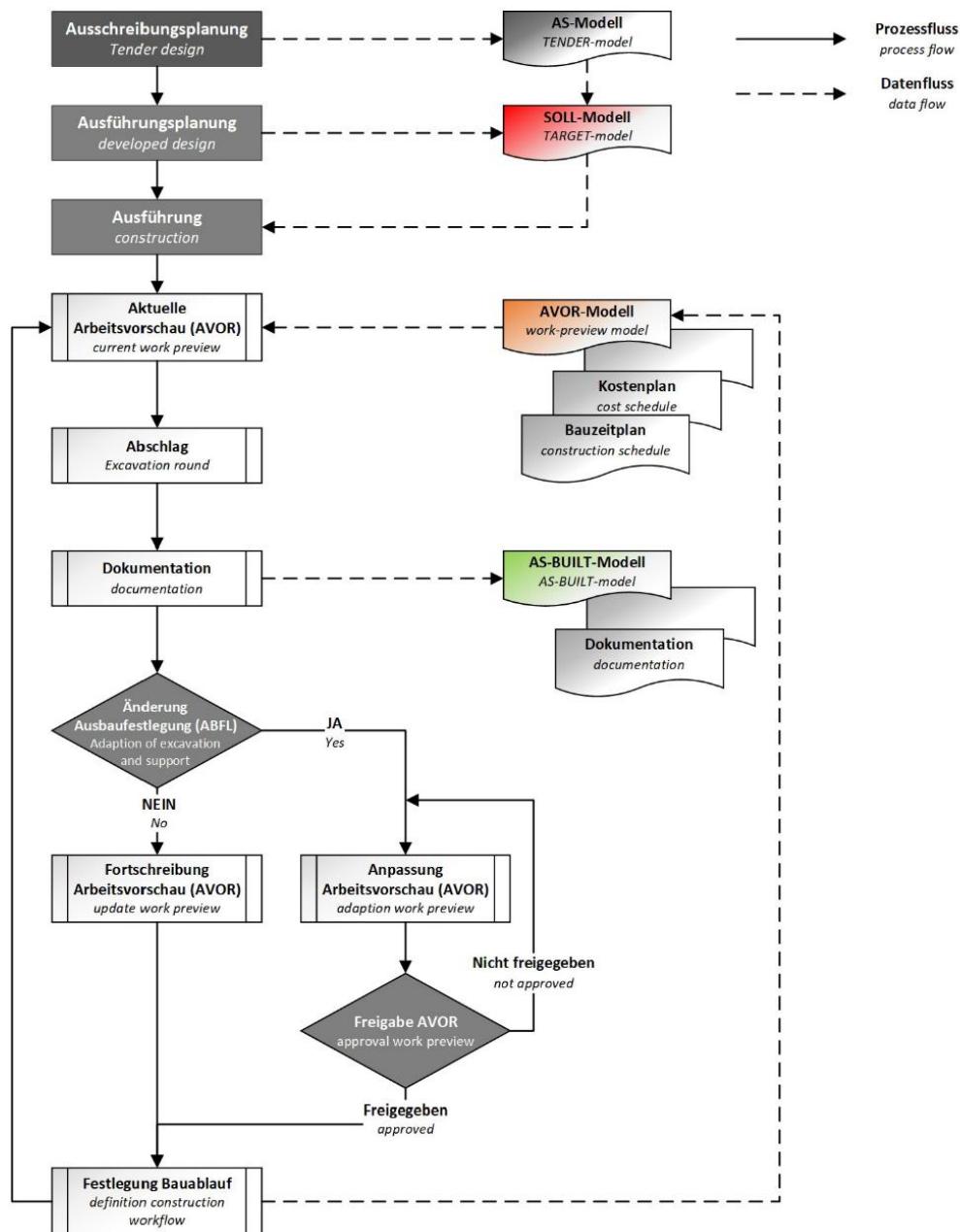


Figure 1. Schematic process of model-based documentation and work preview within conventional tunnelling.

As for the required data structure for each of these models, the minimum information need was identified regardless of the software to be used. These specifications are project- and client-specific and have to be further worked on within the alliance as soon as it is clear which tools will be used. For other projects and/or clients, however, this represents an effective starting point.

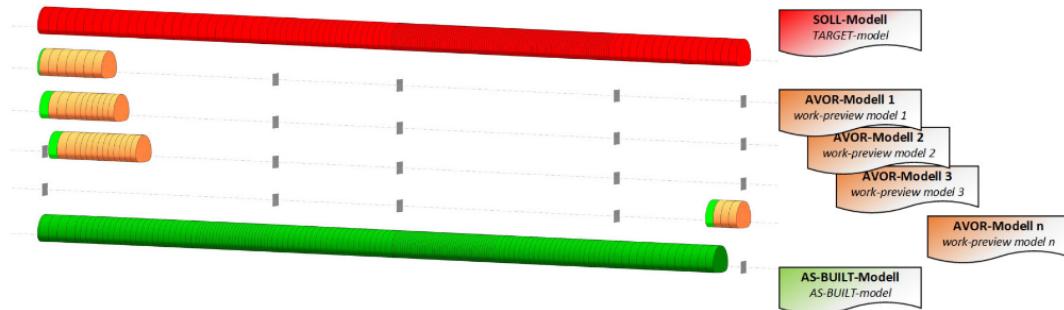


Figure 2. Development of models over time.

3.1 Target model

The target model, built during execution design, requires information on the geology and the tunnel structure. Based on the information from the tender-model, it needs a more detailed geometry of the tunnel, which has to be divided into sections corresponding with the planned excavation round lengths and includes the necessary geological information. This allows element-based mapping of the information on the tunnelling classes and work section in the bill of quantities as well as the cost information based on the tender and the scheduling done by the design team.

3.2 Work-preview model

These models are a further development of the originating target model, split into excavation rounds for work-preview. This allows for the storage of data records for the services to be provided. These cover a property-set (PSET) for the work section in the bill of quantities and one each for the construction schedule and the costs on the level of performance. For this phase, the model has to allow for an approval process by the necessary stakeholders within the project.

3.3 As-built model

In order to be able to include the necessary information, as-built models have to be based on the real geometry of each excavation round. The focus is on documenting the provided services and the execution of the works, including geology, 3D scanning and monitoring. They further have to include the work section in the bill of quantities and obtain approval thereof from a responsible person. The PSETs for construction schedule and costs now have to include the actual values.

3.4 Implementation Tunnel Angath

As mentioned, the developed concept is developed in preparation for the construction of the BIM and alliance pilot project Tunnel Angath. The endurance test will come with the actual implementation and daily use within the ongoing project and in accordance with the requirements of the alliance. In advance, however, a number of boundary conditions for the data structure have been defined. This is shown in Figure 3, resembling the TIM-model at any point in the course of project execution. The red segments only exist within the tender-target-model. Ahead of the advance, the current work preview covering a predefined time span or stretch of tunnel is shown in orange. The green segments represent the excavation rounds, which have already been documented with as-built models. The lighter green segment in between is the excavation round that is just being documented at this point in time.

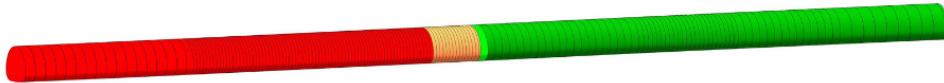


Figure 3. Reflection of the model at any point in time during project execution.

4 DISCUSSION

The developed concept comes with certain advantages and disadvantages, and has huge potential for future developments and extensions.

One major advantage is the comprehensive documentation of the full construction process within one system. The extra work resulting from the continuous model adaptation is less costly than the efforts to find documents and information during construction and especially in all situations following this phase. The concept also allows for possible adaptions of current workflows towards daily updates of the work-preview by automating the model generation and implementing automatic dependencies within the semantic data. This would be an advance over the current situation, made possible by the automation of model creation and the efficient use of the implemented digital information. Another major advantage is the documented history of the construction processes. Being able to look back at the different developments of the work-preview models allows for the comprehensibility of all construction-related decisions.

Currently, there are disadvantages that can be identified. At the moment, for efficiency reasons, the different evolutions of the models are created as new models rather than adapting the existing ones. Being able to adapt the models while still having an explicit reference to the target situation would allow for even easier data-storage throughout the whole construction process. For now, the combination of various models still does the job efficiently enough. Also, any deviation of the work-preview that lies outside of everything the target-model covers will need a lot of extra work to be implemented in the model and the data structure. With further development of software-tools, templates and standards, this issue will soon resolve itself.

Next steps of the concept have to take a close look at the possibilities of automatically creating a construction and cost schedule, based on the target model at first and later on the evolving work-preview models as well as the as-built models. It should also be looked into further possibilities for usage within project-controlling, i.e., post-calculation, resource planning, or reports, to name just a few. As the Tunnel Angath is being realised with an alliance contract, this could also be an interesting approach to find solutions tailored to this specific framework.

5 CONCLUSION

This paper presents a concept for the usage of BIM within the construction phase of a tunnelling project for controlling purposes. The use-case was defined by the client to cover the work-preview as well as documentation on a model basis. With the presented concept, four phases of the actual model are defined, including the tender-, target-, work-preview- and as-built model. The work-preview model can thereby go through a number of evolutions, always adapting to newly gathered information. Equally important is the development of appropriate data structures, which, on the one hand, enable automated adaptations and further developments of the model. On the other hand, they should enable simple and targeted evaluations of target-actual comparisons at the desired time intervals. The basic idea for an implementation within the Tunnel Angath was shown, but only comprehensive testing under real life conditions can show if the concept can be used as intended. With the beginning of the execution phase (02/2023), the presented concept is currently being implemented and evaluated in the planned BIM process within the alliance, taking into account the available software.

REFERENCES

- Austrian Standards International (2001, December 1). *Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm*: Teil 1: Zyklischer Vortrieb (ÖNORM B 2203-1).
- Baraibar, J.-M., de-Paz, J., & Rico, J. (2022). Challenges for the Implementation of BIM Methodology in the Execution of Underground Works. *Buildings*, 12(3), 309. <https://doi.org/10.3390/buildings12030309>
- Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (Mai 2019). *BIM im Untertagebau: Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten*.
- Hegemann, F., Stascheit, J., & Maidl, U. (2020). As-built documentation of segmental lining rings in the BIM representation of tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 106, 103582. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103582>
- Massimo-Kaiser, I., Exenberger, H., Hruschka, S., Heil, F., & Flora, M. (2022). Streamlining Tunnelling Projects through BIM. *Sustainability*, 14(18), 11433. <https://doi.org/10.3390/su141811433>
- Massimo-Kaiser, I., Exenberger, H., Salzgeber, H., Werkgarner, H., Loidl, R., & Flora, M. (2023). From prognosis Ground Model to Tender Model and Tunnel Construction Framework Plan with Tunnel Information Modelling [*Manuscript Submitted for Publication*].
- Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (2021). *Richtlinie für die Geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb: Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung*. Salzburg.