

Diplomarbeit

# Open-BIM-Tauglichkeit und Benutzerdefinierte Erweiterbarkeit von Softwaretools im Untertagebau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

## Open BIM suitability, IFC compatibility and user-defined expandability of BIM software tools in tunneling

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

**Johannes Rist, BSc**

Matr.Nr.: 01526867

Betreuung: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Frank Lulei**  
Univ.Ass. **Oleksandr Melnyk**, MSc. BSc.  
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft  
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/235, 1040 Wien, Österreich

Wien, im September 2023

---



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

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nützen, um mich bei denjenigen Personen zu bedanken, welche mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit, jedoch auch während meines gesamten Studiums unterstützt, motiviert und finanziert haben.

Als erstes möchte ich mich bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Goger, dem Institutsvorstand am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft an der TU Wien bedanken, da er mir diese Arbeit ermöglicht hat. Bei der Bearbeitung wurde ich von Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Oleksandr Melnyk hervorragend betreut, weshalb auch ihm ein großer Dank gebührt.

Weiters bedanke ich mich bei meinen langjährigen Freunden, mit denen ich gemeinsam durch alle Höhen und Tiefen gegangen bin. Der gegenseitige Rückhalt und das gemeinschaftliche Motivieren vor schweren Prüfungen, aber auch die vielen schönen Stunden in der Freizeit um wieder Kraft zu tanken, haben mein Studium zu einem aufregenden und extrem wertvollen Lebensabschnitt gemacht.

Meine Arbeitgeber, bei welchen ich als studentischer Mitarbeiter beschäftigt war, dürfen nicht unerwähnt bleiben. Sie haben mir die Möglichkeit eingeräumt, viele wertvolle Erfahrungen zu sammeln und gleichzeitig meine finanzielle Freiheit etwas zu vergrößern. Durch ihre Rücksichtnahme auf mein Studium konnte ich zeitlich sehr flexibel agieren. Herzlichen Dank dafür!

Der größte Dank gebührt selbstverständlich meinen Eltern. Sie haben mich auf meinem gesamten Lebensweg begleitet und mir gewisse Grundwerte vermittelt, welche mich heute ausmachen. Durch ihr gezieltes Akzentsetzen in der Erziehung haben sie mich bei allen Freiheiten und ohne jeglichem Druck auf einen sehr erfüllenden und facettenreichen Lebensweg geleitet, der gegenwärtig mit dem Abschluss dieses Studiums zu einem sehr erstrebenswerten Ziel für mich führte. Ohne ihre bedingungslose Unterstützung, Motivation und Liebe wäre das alles nicht möglich gewesen. Die Dankbarkeit kann mit Wort nicht ausreichend beschrieben werden, dennoch möchte ich sie auf diesem Weg zum Ausdruck bringen.



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

# Kurzfassung

Schlagwörter: Building Information Modeling, Open-BIM, Tunnelbau, Datenaustausch, Digitalisierung, Softwarelösungen, Erweiterbarkeit

In der Baubranche wird die Digitalisierung anhand der Arbeitsmethode, Building Information Modeling, realisiert. Dabei handelt es sich um eine integrative Planung, die über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks kontinuierlich in einem Modell fortgeführt wird. Dafür bietet der Markt gegenwärtig eine Vielzahl spezialisierter Softwarelösungen an, welche im Zuge eines Tunnelprojekts eingesetzt werden. Um Planungen unterschiedlicher Gewerke aus unterschiedlichen Programmen in einem Modell zu vereinen, wird die Open-BIM -Methode für den Datenaustausch benötigt. Da im Tunnelbau oft individuelle Lösungen gefordert sind, spielen auch benutzerdefinierte Erweiterungen für bestehende Programme über Programmierschnittstellen eine Rolle.

In dieser Arbeit wird der gegenwärtige Entwicklungsstand der Datenweitergabe mittels offener Formate festgestellt. Die Programmauswahl beschränkt sich dabei auf jene, welche in einem Planungsprozess eines Tunnelprojekts sinnvoll eingesetzt werden können. Dazu wird deren Eignung für den Tunnelbau sowie die Open-BIM -Tauglichkeit, also Möglichkeiten eines offenen Datenaustauschs, untersucht. Sind spezielle Funktionen in der serienmäßigen Software nicht vorhanden, so besteht die Möglichkeit, sich über Programmierschnittstellen das Programm benutzerdefiniert zu erweitern. Inwiefern die Programme eine Individualisierung zulassen und ob vorgefertigte Plug-ins zur Verfügung stehen, wird ebenfalls thematisiert.

Für die Beantwortung der Forschungsfragen wurde eine umfassende Literaturrecherche sowie eine qualitative Inhaltsanalyse durchgeführt. Dabei wurden Websites der Hersteller, Fachmagazine, Fachbücher und Dissertationen herangezogen. Der Bezug zur Praxis wurde mit Interviews von Fachexperten aus den Bereichen Auftraggeber, Planung, Ausführung und Betrieb hergestellt.

Die Arbeit hat gezeigt, dass die meisten Programme für allgemeine Anwendungen konzipiert sind und nur teilweise Tunnelbau spezifische Funktionen vorhanden sind. Der Datenaustausch zwischen Programmen unterschiedlicher Hersteller wird über gängige native Formate, offene Formate und Drittprogramme realisiert. Die Möglichkeiten der Erweiterbarkeit variiert zwischen den Programmen und es kann sowohl der Funktionsumfang als auch die Kompatibilität gesteigert werden.

Letztlich wurde festgestellt, dass zum heutigen Zeitpunkt noch keine universelle Lösung für den Datenaustausch, welche frei zugänglich ist und von allen Softwarelösungen unterstützt wird, existiert. Im Tunnelbau ist die Entwicklung verglichen mit dem Hochbau etwas rückständig, insbesondere aufgrund der hochkomplexen Anforderungen an die Darstellungen betreffend Geometrie, Geotechnik, Geologie und andere Tunnelspezifika. Diesbezüglich müssen noch weitere Standards entwickelt werden, jedoch ist durch die Option der benutzerdefinierten Erweiterbarkeit eine individuelle Problemlösung möglich.



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

# Abstract

Keywords: Building Information Modelling, Open-BIM, tunnelling, data exchange, digitalisation, software solutions, extensibility

In the current fourth industrial revolution, the focus is no longer on innovations in production techniques but on networking and communication. In the construction industry, digitalization is realized using Building Information Modelling. This is integrative planning that is continued in a model over the entire life cycle of a building, from the initial idea to demolition. Currently, the market offers a variety of specialized software solutions that are used for tunnel projects. A collaborative work process aims to unite the planning of different trades in one model, using the Open BIM method for data exchange. The desired solution is an open data format compatible with all programmes.

In tunnelling, individual solutions are very often required. Programming interfaces can be used to add extensions to an existing programme that include both additional modelling tools and options for data exchange.

In this thesis, the current state of development of data transfer utilizing open formats is determined. The selection of programmes is limited to those that can be usefully employed in the planning process of a tunnel project. For this purpose, their suitability for tunnelling and the Open-BIM suitability, i.e. possibilities of open data exchange, are examined. If special functions are not available in the standard software, extending the programme in a user-defined way is possible via programming interfaces. The extent to which the programmes allow individualization and whether ready-made plug-ins are available will also be discussed.

A comprehensive literature search was conducted to answer the research questions. Manufacturer websites, trade magazines, textbooks and dissertations were consulted. In order to establish a link to practice, experts from the areas of client, planning, execution and operation were interviewed. These interviews were evaluated with a qualitative content analysis.

Ultimately, it was determined that there is still no universal solution for data exchange that is freely accessible and supported by all software solutions. Development is somewhat behind in tunnelling compared to structural engineering, especially due to the highly complex requirements for representations concerning geometry, geotechnics, geology and other tunnel specifics. Standards still need to be developed in this regard. The option of user-defined extensibility makes individual problem-solving possible.



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



# Gendergerechte Formulierung

Gleichbehandlung und Diversität haben für den Autor einen hohen Stellenwert. Um eine bessere Lesbarkeit zu gewähren, wird jedoch in der vorliegenden Arbeit nur das generische Maskulinum verwendet. Soweit es für die Aussage sinnvoll ist, beziehen sich alle Personenbezeichnungen ausdrücklich auf männliche, weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten.



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

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Historische Entwicklung . . . . .	1
1.2	Problemstellung . . . . .	1
1.3	Forschungsabgrenzung . . . . .	2
1.4	Forschungsfragen . . . . .	2
1.5	Methodik . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Tunnelbau . . . . .	3
2.1.1	Geschichtliche Entwicklung . . . . .	3
2.1.2	Konventioneller Tunnelbau . . . . .	4
2.1.3	Stand der Digitalisierung im Tunnelbau . . . . .	4
2.2	Building Information Modeling . . . . .	4
2.2.1	Little Closed - Big-Open-BIM . . . . .	5
2.2.2	Gesamtmodell - Fachmodell . . . . .	6
2.2.3	BIM im Tunnelbau . . . . .	6
2.3	Grundlagen Open-BIM . . . . .	7
2.3.1	Kollaboratives Arbeiten . . . . .	8
2.3.2	Normen in Österreich . . . . .	8
2.3.3	Begriffe . . . . .	9
2.4	Erweiterbarkeit der Software . . . . .	11
2.4.1	Programmierschnittstellen . . . . .	11
2.4.2	API . . . . .	11
2.4.3	Begriffe . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Programmanalyse</b>	<b>13</b>
3.1	Bauwerksmodellierung . . . . .	15
3.1.1	Autodesk AutoCAD . . . . .	15
3.1.2	Autodesk Civil 3D . . . . .	16
3.1.3	Autodesk InfraWorks 360 . . . . .	17
3.1.4	Autodesk Revit . . . . .	18
3.1.5	McNeel Rhinoceros 3D . . . . .	19
3.2	Kosten- und Terminplanung . . . . .	20
3.2.1	ib-data ABK8 . . . . .	20
3.2.2	Microsoft Projekt . . . . .	21
3.2.3	Nevaris Auer Success . . . . .	22
3.2.4	RIB iTWO . . . . .	23
3.3	Koordination und Viewer . . . . .	24
3.3.1	Autodesk BIM 360 . . . . .	24
3.3.2	Autodesk Navisworks . . . . .	25
3.3.3	Datacomp BIM Vision . . . . .	26
3.3.4	Kubus BIMcollab Cloude . . . . .	28

3.3.5	Kubus BIMcollab Zoom . . . . .	29
3.3.6	Nemetschek Solibri . . . . .	30
3.4	Geologie und Geotechnik . . . . .	31
3.4.1	Geoconsult TUGIS . . . . .	31
3.4.2	Geodata Eupalinos . . . . .	32
3.4.3	Geodata Kronos . . . . .	32
3.4.4	Itasca Consulting Group FLAC/UDEC/3DEC . . . . .	33
3.4.5	RIB RTwalls . . . . .	35
3.4.6	Rocscience RS2 . . . . .	35
3.4.7	Seequent Leapfrog Works . . . . .	36
3.5	Programmierweiterungen . . . . .	37
3.5.1	Autodesk Dynamo . . . . .	37
3.5.2	Autodesk Geotechnical Modeler für Civil 3D . . . . .	39
3.5.3	Fides Infrastructure Toolbox . . . . .	39
3.5.4	McNeel Grasshopper . . . . .	41
3.5.5	Mensch und Maschine BIM Booster . . . . .	42
3.5.6	Sofistik Bridge Modeler . . . . .	42
3.5.7	Sofistik Reinforcement Detailing . . . . .	43
3.6	Sonstige Programme . . . . .	43
3.6.1	Autodesk ReCap Pro . . . . .	44
3.6.2	CloudeCompare . . . . .	44
3.6.3	Dassault Systèmes Abaqus . . . . .	45
3.6.4	Epic Games Twinmotion . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Auswertung der Experteninterviews</b>	<b>48</b>
4.1	Interview Teilnehmer . . . . .	49
4.2	Allgemeine BIM-Themen . . . . .	49
4.3	Open-BIM-Projektentwicklung . . . . .	50
4.4	Tunnelbauspezifisch BIM-Methodik . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>53</b>
5.1	Eignung für den Tunnelbau . . . . .	53
5.1.1	Bauwerksmodellierung . . . . .	53
5.1.2	Kosten- und Terminplanung . . . . .	53
5.1.3	Koordination und Viewer . . . . .	54
5.1.4	Geologie und Geotechnik . . . . .	54
5.1.5	Programmierweiterungen . . . . .	55
5.1.6	Sonstige Programme . . . . .	55
5.2	Eignung für Open-BIM . . . . .	56
5.2.1	Bauwerksmodellierung . . . . .	56
5.2.2	Kosten- und Terminplanung . . . . .	56
5.2.3	Koordination und Viewer . . . . .	57
5.2.4	Geologie und Geotechnik . . . . .	57
5.2.5	Programmierweiterungen . . . . .	58
5.2.6	Sonstige Programme . . . . .	58
5.3	Erweiterbarkeit . . . . .	59
5.3.1	Bauwerksmodellierung . . . . .	59
5.3.2	Kosten- und Terminplanung . . . . .	60
5.3.3	Koordination und Viewer . . . . .	60

---

5.3.4	Geologie und Geotechnik . . . . .	61
5.3.5	Programmerweiterungen . . . . .	61
5.3.6	Sonstige Programme . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>63</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	63
6.2	Beantwortung der Forschungsfragen . . . . .	64
6.3	Limitationen . . . . .	65
6.4	Ausblick . . . . .	65

# Kapitel 1

## Einleitung

Die technische Entwicklung in der Baubranche geht mit der Digitalisierung einher. Neben weiterentwickelten Baustoffen und verbesserter Gerätetechnologie erhält die Baubranche durch die digitale Planung, geläufig unter dem Namen Building Information Modeling, neue Möglichkeiten.

### 1.1 Historische Entwicklung

Im Laufe der Menschheitsgeschichte gab es verschiedene Formen von industriellen Revolutionen, welche sich in vier Phasen grob einteilen lassen [54]. Begonnen mit der Industrie 1.0 wurden um 1800 herum die ersten Maschinen für Massenproduktion entwickelt, angetrieben von Menschen-, Wasser- und Dampfkraft.

Die nächste Entwicklungsphase wurde Ende des 19. Jahrhunderts dadurch eingeleitet, dass Elektrizität als Antriebskraft zur Verfügung stand [54]. Erste Fließband Betriebe beschleunigten die Produktionen und die Mobilität erfuhr einen Aufschwung durch die Herstellung der ersten Autos. Die verbesserte Kommunikation durch Telegramme und Telefone war für die Entwicklung in den Büros verantwortlich.

Mit der Entwicklung der ersten Computer ging die dritte industrielle Revolution los [103]. Das zentrale Thema ab 1970 war die Vernetzung durch Elektronik und Informationstechnologie, welche eine variantenreiche Serienproduktion ermöglichte und diese auf ein neues Level der Automatisierung brachte.

Die gegenwärtige industrielle Revolution findet unter dem Titel Industrie 4.0 statt [54]. Der Trend zur Digitalisierung geht ungebrochen weiter, zeichnet sich jedoch nicht mehr nur durch die Weiterentwicklung von Produktionstechnologien, sondern vor allem durch die Vernetzung der Systeme aus. Immer schneller werdende Produktionstechniken führen zu mehr Sonderanfertigungen und weniger Lagerwaren, dadurch kann auf die Bedürfnisse des Marktes viel schneller reagiert werden. Industriezweige wie die Baubranche werden durch neue Kommunikationsformen modernisiert.

### 1.2 Problemstellung

Der technologische Fortschritt bringt jedoch auch neue Herausforderungen mit sich. Für die BIM Planung stehen gegenwärtig eine Vielzahl von Softwarelösungen zur Verfügung, oftmals auf ein Fachgebiet spezialisiert. Nachdem bei einem Bauprojekt meistens mehrere Fachplaner beteiligt sind, kommen auch mehrere Softwareprodukte zum Einsatz.

Damit nicht jeder Planer sein eigenes Modell generieren muss und so die Effizienz gesteigert wird, benötigt es Wege für den Datenaustausch zwischen herstellerunabhängigen Programmen. Die allgemeine Entwicklung der vierten industriellen Revolution hin zur besseren Vernetzung zeigt sich im Bauwesen unter anderem anhand der Interoperabilität zwischen herstellerunabhängigen Softwareprogrammen. Wie weit diese Entwicklung bereits vorangeschritten ist, wird in der vorliegenden Arbeit untersucht.

## 1.3 Forschungsabgrenzung

Da der Markt eine Vielzahl von Softwarelösungen anbietet, wurde die Auswahl der Programme auf eine Anwendbarkeit für den Untertagebau, respektive dem Tunnelbau beschränkt. Allgemein gefasste Programme, welche nicht explizit für den Tunnelbau geeignet sind, aber trotzdem sinnvoll genutzt werden können sind mitinbegriffen. Der geografische Ursprung dieser Arbeit ist Österreich, weshalb die Normen und Experteninterviews die nationalen Gegebenheiten verstärkt beinhalten.

## 1.4 Forschungsfragen

Die konkreten Forschungsfragen, welche mit dieser Diplomarbeit beantwortet werden sollen sind Folgende:

- **Frage 1:** Wie geeignet sind die ausgewählten Programme für eine Anwendung im Tunnelbau?
- **Frage 2:** Wie tauglich ist die Software für eine Open-BIM Nutzung?
- **Frage 3:** In welchem Umfang können bestehende Programme von externen Programmierern und Anwendern erweitert werden?

Die erste Frage zielt auf die allgemeine Anwendbarkeit der jeweiligen Software im Untertagebau ab, da sich diese Diplomarbeit auf jenes Anwendungsgebiet beschränkt. Unterschieden wird dabei, ob ein Programm explizit für den Tunnelbau ausgelegt ist, ob es allgemein geeignet ist, obwohl es nicht auf Tunnelbau spezialisiert ist oder ob es nur mit zusätzlichen Erweiterungen sinnvoll nutzbar ist.

Im Zuge der zweiten Frage werden die Möglichkeiten nach einem gemeinsamen, zeitgleichen Zusammenarbeiten untersucht. Hierbei liegt der Fokus auf standardmäßig integrierte Formate für den Datenaustausch. Eine wesentliche Differenzierung wird hier zwischen offenen und proprietären Datenformaten vorgenommen.

Bei der dritten Frage befasst sich der Autor mit den herstellerseitig zur Verfügung gestellten Programmierschnittstellen. Es wird sowohl die Erweiterbarkeit bezüglich Werkzeugpaletten für die Modellierung, als auch für den Datentransfer analysiert. Weiters wird auch die direkte Kommunikation zwischen Programmen behandelt.

## 1.5 Methodik

Die Grundlagen dieser Arbeit, welche für ein sinnerfassendes Lesen benötigt werden, entstammen einer umfangreichen Literaturrecherche. Für die Beantwortung der Forschungsfragen werden 33 Softwareprodukte ebenfalls anhand einer Literaturrecherche analysiert und nach Anwendungsfelder unterteilt. Die Auswahl wurde durch vorhergehende Recherchen und Umfragen erstellt und liegt als Basis vor. Die einzelnen Programme werden je nach Kategorie einander gegenübergestellt. Als Literaturquellen wurden die Hersteller-Webseiten, Fachartikel und wissenschaftliche Arbeiten herangezogen.

Diese Diplomarbeit stellt auch einen Bezug zur Praxis her, um den aktuellen Stand der Entwicklung einordnen zu können. Dafür wird eine qualitative Inhaltsanalyse an einer Reihe von strukturierten Experteninterviews durchgeführt. Diese Informationen werden mit den Ergebnissen der Literaturrecherche verglichen, und liefern ergänzende Meinungen für die Auswertung der Programmanalysen.

# Kapitel 2

## Grundlagen

Wesentliche Themengebiete, welche für diese Arbeit relevant sind, werden hier kurz erörtert. Dabei wird auf den Tunnelbau, das Building Information Modeling und die Erweiterbarkeit der Software eingegangen. Eine Lesbarkeit der Arbeit wird dadurch für einen größeren Leserkreis als jenen der Fachexperten sichergestellt.

### 2.1 Tunnelbau

Als Tunnel werden langgestreckte unterirdische Hohlraumbauwerke bezeichnet, die unter anderem dem Bahn- und Straßenverkehr dienen [1]. Deren Abmessungen betragen für gewöhnlich 20 bis 300 Quadratmeter Querschnittsfläche und erreichen Längen bis zu 60 Kilometer. Neben der Verwendung und den Dimensionen der Tunnel werden diese vor allem nach ihrer Herstellungsweise unterschieden. Diese sind Maschineller Vortrieb, Tunnel in offener Bauweise und Konventioneller Vortrieb, wobei auf letztgenannten separat eingegangen wird.

Der Maschinelle Vortrieb, auch Kontinuierlicher Vortrieb genannt, wird mit einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM) realisiert [62]. Diese kann als Tunnelbohrmaschine oder als Schildmaschine ausgeführt sein und erledigt die Arbeitsschritte Lösen, Laden, Abtransport und teilweise Tunnel-sicherung und Ausbau zeitgleich [6]. Die Auswahl des Gerätes erfolgt anhand der zu erwarteten geologischen Verhältnisse, wobei stark wechselnde Verhältnisse einen Nachteil in der Anwendung darstellen.

Eine spezielle Errichtungsvariante für einen Tunnel stellt die offene Bauweise dar [62]. Hierbei wird die geplante Tunneltrasse von Obertage aus freigelegt, das Tunnelbauwerk errichtet und anschließend wieder überdeckt. Dies bringt eine Einschränkung hinsichtlich Tiefenlage des Tunnelbauwerks mit sich, da ab einer gewissen Tiefe diese Bauweise unwirtschaftlich wird.

#### 2.1.1 Geschichtliche Entwicklung

Die ersten Stollenbauwerke datieren bereits um 2800 vor Christus [62]. In dieser Arbeit wird der Fokus jedoch auf die historische Entwicklung von Bauweisen für Verkehrstunnel, welche mit heutigen Infrastrukturbauwerken vergleichbar sind, gelegt. 1803 wurde erstmals die Deutsche Bauweise erprobt, welche auch Kernbauweise genannt wird. Dabei wird der Querschnitt entlang des Außenrandes hergestellt und der Kern bleibt bis zum Schluss als Stützvolumen bestehen. Wenige Dekaden später, um 1840, kam die Alte Österreichische Tunnelbauweise zum Einsatz. Die Sicherung der Firste und der Ausbruch von oben nach unten charakterisierten diese Methode. Beim Ausbau wurde von unten nach oben gearbeitet, wobei massive Widerlager signifikant waren. Zeitgleich entwickelte sich auch die Belgische Bauweise, bei der eine noch raschere Firstsicherung angedacht war. Sie wird auch Unterfangungsbauweise genannt. Mit der Einführung von Spritzbeton und neuen Ankertechniken ab 1950 wurde der Holzbausbau ersetzt [56]. Gemauerte Tunnelinnenschalen wurden durch Ortbeton Auskleidungen abgelöst. Diese Entwicklungen bilden die Basis für den modernen Konventionellen Tunnelbau.



### 2.1.2 Konventioneller Tunnelbau

Die stark wechselnde Geologie begünstigt in Österreich die Anwendung des Konventionellen Tunnelbaus [56, 82]. Hierbei wird mittels Spreng- oder Baggervortrieb der Hohlraum ausgebrochen und gesichert und anschließend das Ausbruchsmaterial abtransportiert. Diese Arbeitsschritte, zusammengefasst unter dem Begriff Abschlag, werden zyklisch wiederholt. Eine neue Variante davon wurde mit der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT), international bekannt unter dem Namen New Austrian Tunneling Method (NATM), entwickelt. 1948 erkannte Rabcewicz den zeitlichen Einfluss beim abflauen des Gebirgsdrucks, sodass das anstehende Gebirge nicht nur als Last einwirkt, sondern nach dem Abwarten der Gebirgsverformungen auch für die Lastabtragung herangezogen werden kann [77]. Um die Verformungen des Gebirges zu erfassen ist die weiterentwickelte Messtechnik von Müller und Pacher entscheidend. Ein wesentlicher Aspekt ist das individuelle Anpassen der Stützmittelzahl, vor allem die ab 1965 verwendete Sicherung mit Systemankerungen und Spritzbeton. Unter dem 1965 eingeführten Begriff Neue Österreichische Tunnelbaumethode, versteht sich eine Methode, welche heute für nahezu alle Gebirgsverhältnisse angewendet werden kann. 1978 wurden die wesentlichen Bestandteile der Methode in 22 Grundsätze von Leopold Müller festgeschrieben [87].

### 2.1.3 Stand der Digitalisierung im Tunnelbau

Die Digitalisierung findet in der Baubranche unter dem Begriff BIM statt. Im Tunnelbau konkret befindet sich die Entwicklung in einer Phase in der vor allem Pilotprojekte durchgeführt werden. Verglichen mit dem Hochbau ist der Tunnelbau rückständig [109]. Ursache dafür ist einerseits die spätere Einführung der BIM-Methode im Zusammenhang mit Tunnelbauprojekten und andererseits die komplexeren Rahmenbedingungen. Durch das anstehende Gebirge muss der geplante Tunnel immer in ein dreidimensionales Baugrundmodell eingebettet werden, wohingegen im Hochbau der Luftraum die Umgebung bildet. Auf technischer Seite sind neben den gekrümmten Formen, die im Tunnelbau unausweichlich sind, auch fehlende IFC-Standards gegenwärtige Hürden. Nachdem die Möglichkeiten des Datenaustauschs zwischen unterschiedlichen Fachplanern einen wesentlichen Beitrag zur Digitalisierung beitragen, wird der aktuelle Fortschritt im Tunnelbau auch im Zuge dieser Arbeit konkreter eingeordnet.

## 2.2 Building Information Modeling

Ein wesentlicher Teil der Digitalisierung im Bauwesen fällt unter den Begriff BIM, Building Information Modeling [53],[70]. Dies ist eine kollaborative Arbeitsmethode und hat zum Ziel, sämtliche Bereiche der Baubranche digital miteinander zu vernetzen [37]. Daten sollen im gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks konsistent und durchgängig genutzt werden. Eine Qualitätssteigerung hinsichtlich Kostensicherheit, Terminalsicherheit, technischer Planungsqualität und Verwaltung soll dadurch erreicht werden. Fehlprozesse sollen bereits früh erkannt und behoben werden, um potentielle Folgeschäden sowohl zeitlich als auch finanziell auf ein Minimum zu reduzieren. Von der Planung, der Erstellung über die Erhaltung bis hin zum Abriss soll das gesamte Leben eines Bauwerks in einem digitalen Modell dargestellt werden, wie in Abb. 2.1 ersichtlich. Da im Laufe eines Bauwerklebens verschiedenste Fachbereiche interdisziplinär Leistungen erbringen, wird für eine optimale Wertschöpfung ein lückenloser digitaler Informationsaustausch benötigt. Um das Potential des digitalen Planungsprozesses vollumfänglich nutzen zu können, wird ein offener Datenaustausch erforderlich [78]. Entscheidend hierbei sind Datenumgebungen, die von allen Beteiligten verwendet werden können. Um nach Fertigstellung des Gebäudes das BIM Modell für Wartungs-, Erhaltungs- und Umbauarbeiten nutzen zu können, müssen die Daten bis zum

Abbruch kontinuierlich aktualisiert werden. Aufgrund der heterogenen Software Pakete wird der Austausch des digitalen Gebäudemodells erschwert.

Als Lösung kann Closed-BIM herangezogen werden [55]. Hierbei verwenden Planer aus den unterschiedlichen Fachbereichen Softwarepakete die untereinander kompatibel sind, was jedoch meist nur gegeben ist, wenn sie vom selben Hersteller sind [4]. Der Vorteil, welcher das Arbeiten in einer Software Umgebung des selben Herstellers hat, ist das zeitgleiche Arbeiten an einem Modell. Nachteilig ist eine gewisse Einschränkung, welche auch vergaberechtliche Probleme mit sich zieht, da die Bieter eine konkrete Software Umgebung in Verwendung haben müssen.

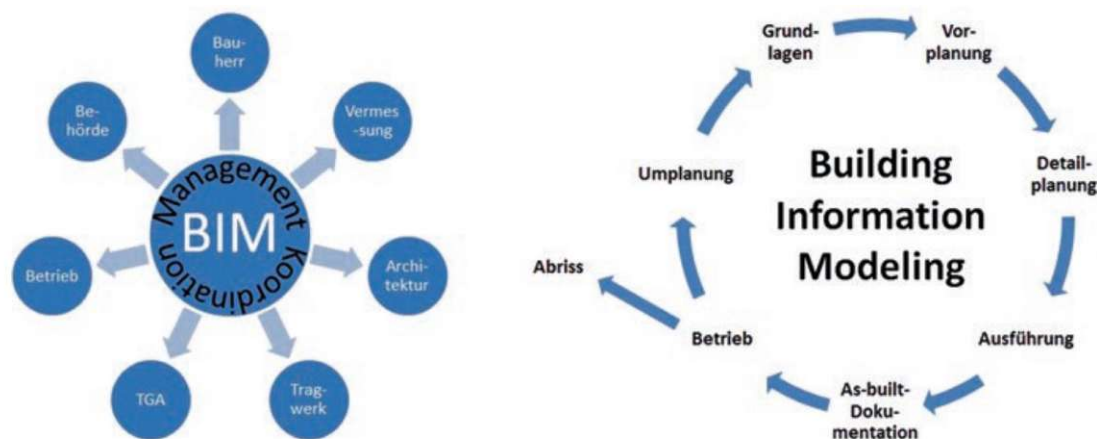


Abb. 2.1: Aufgabenbereich der BIM Planung (Quelle: [53])

### 2.2.1 Little Closed - Big-Open-BIM

Bei der Umsetzung einer Planung mit BIM können unterschiedliche Formen gemeint sein [37]. Die zwei wesentlichen Merkmale werden in Abb. 2.2 anhand der Achsen abgebildet und definieren wie das Modell verwendet und welche Softwareumgebung genutzt wird.

Bei der Modell Nutzung wird zwischen little BIM und big BIM unterschieden, wobei little BIM die Modellierung von kleinen spezifischen Abschnitten des gesamten Planungsprozesses von einem Fachplaner bedeutet [37]. Einen Nachnutzen beziehungsweise eine Weitergabe des Modells erfolgt nicht. Der gegenteilige Arbeitsablauf wird als big BIM bezeichnet und ermöglicht eine durchgängige Datennutzung für alle Projektbeteiligten. Das Modell wird dabei über alle Phasen eines Bauwerklebens von diversen Fachplanern mit Daten gespeist und ermöglicht die Kommunikation zwischen allen Parteien.

Auf Seite der Softwareumgebung wird zwischen Closed-BIM und Open-BIM differenziert, wobei hier der Datenaustausch das zentrale Thema ist [37]. Bei Closed-BIM wird ein Modell innerhalb einer herstellerabhängigen Umgebung verwendet. Der Datentransfer erfolgt nur mittels proprietärer Formate. Hingegen bei Open-BIM wird eine herstellerunabhängige Datenumgebung angestrebt, wo der Datentransfer mittels offener Formate stattfindet. Jeder Fachplaner kann dadurch eine freie Softwarewahl treffen.

Ziel muss eine Big-Open-BIM Nutzung sein, um das volle Potential eines digitalen Bauwerkmodells ausschöpfen zu können.

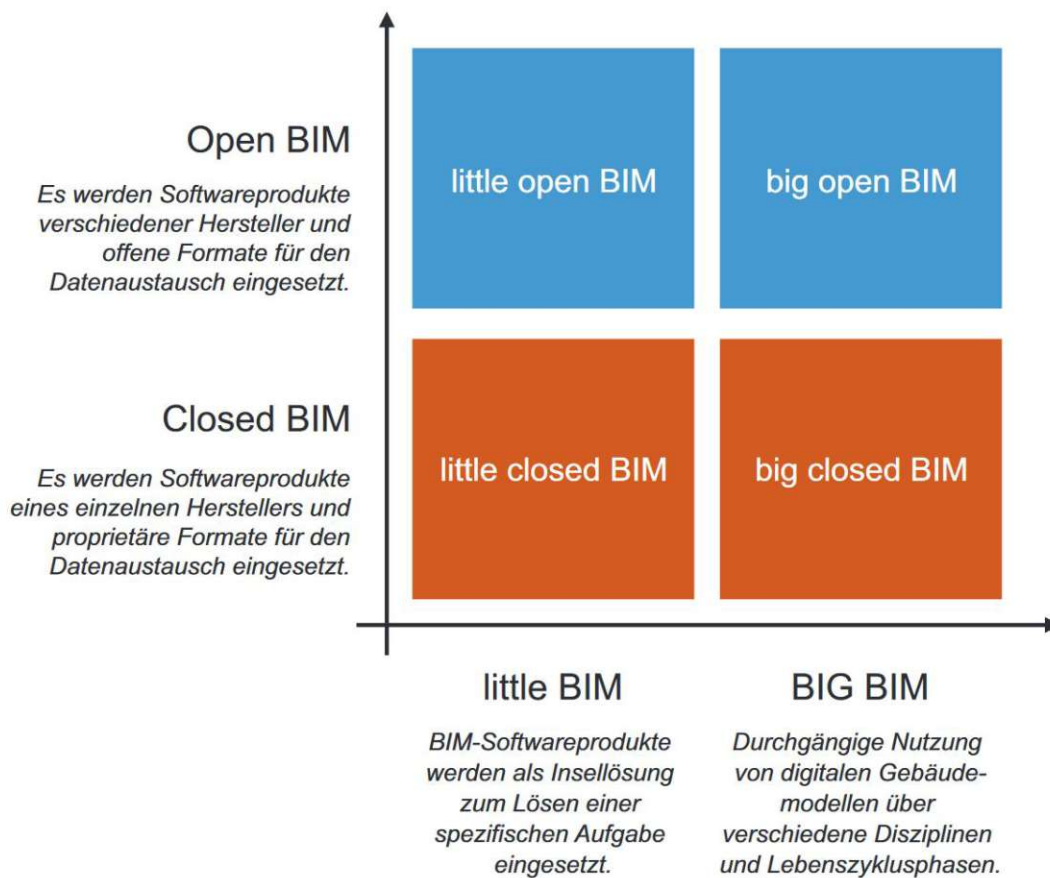


Abb. 2.2: Einteilung der verschiedenen BIM-Methoden (Quelle: [37])

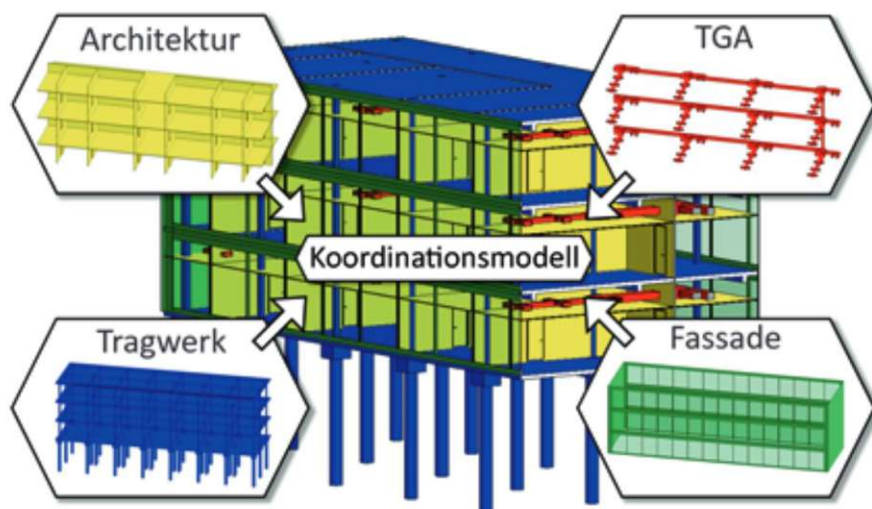
### 2.2.2 Gesamtmodell - Fachmodell

Im Zuge einer Planung sind diverse Fachplaner, beispielsweise Architekten, Tragwerksplaner und TGA-Planer, beteiligt [53]. Diese erstellen für das jeweilige Spezialgebiet ein Fachmodell mit ihrer dafür geeigneten Software. Für eine Anwendung im Sinn von Big-Open-BIM werden die Fachmodelle zu einem Gesamtmodell, auch Koordinationsmodell genannt, zusammengefügt. Dafür kommen Programme der Kategorie Koordination und Viewer zum Einsatz, in denen eine Kollisionsprüfung durchgeführt wird. Ein kollaboratives Arbeiten ist ab dieser Phase möglich.

### 2.2.3 BIM im Tunnelbau

Die BIM Technologie ist am weitesten im Hochbau entwickelt, jedoch wird sie im Zuge der Digitalisierung auch im Tunnelbau immer wichtiger [37]. In diversen Arbeitsgruppen auf nationaler und internationaler Ebene werden Leitfäden, Handlungsempfehlungen und Modellierungsrichtlinien erstellt. Ein wesentlicher Faktor für die BIM Entwicklung ist die Handhabe von Auftraggebern, welche den BIM Standard fordern, aber auch finanziell abgelten müssen. Im D-A-CH Raum haben die nationalen Firmen, welche potentielle Auftraggeber für Tunnelprojekte sind, Pilotprojekte am laufen, um Erfahrungen zu sammeln. Im Tunnelbau kann der tatsächliche Baugrund erst beim Antreffen festgestellt werden [70]. Somit ist während des Bauablaufes eine kontinuierliche Anpassung des BIM Modells nötig.

Auch im Tunnelbau findet eine separate Planung in unterschiedlichen Fachmodellen statt [37].



**Abb. 2.3:** Zusammenhang zwischen Fachmodellen und Gesamtmodell (Quelle: [53])

Diese sind fachlich meist in ein Baugrundmodell, ein Tunnelbauwerksmodell und ein Stadtmodell gegliedert. Die geologischen und geotechnischen Daten sind für ein Tunnelprojekt von zentraler Bedeutung, da der anstehende Boden Lasteinwirkung und Baugrund zugleich ist. Die Summe dieser Informationen wird in einem dreidimensionalen Baugrundmodell erfasst. Sämtliche Bauwerke, wie zum Beispiel Tunnelportale, Querschläge und Haupttröhren werden im Tunnelbauwerksmodell erfasst. Hierbei treten je nach Bauweise, also maschineller oder konventioneller Vortrieb, Unterschiede in der Modellierung auf. Dem Stadtmodell kommt bei innerstädtischen Projekten Bedeutung zu, um mögliche Probleme mit Leitungsführungen und setzungsempfindlichen Bauwerken frühzeitig zu erkennen.

Das Potential einer BIM Planung ist auch für den Bereich des Tunnelbaus hoch [37]. Um diese vollumfänglich nutzen zu können, fehlt es noch an Standardisierungen und Möglichkeiten einer durchgängigen Zusammenarbeit. Die Entwicklung muss nicht nur auf technischer Seite stattfinden, sondern erfordert auch eine Akzeptanz bei den Projektbeteiligten.

## 2.3 Grundlagen Open-BIM

Die Software Hersteller sind vor allem im deutschen Sprachraum viele Klein- und Mittelunternehmer, die eine Vielzahl an Programmen auf den Markt bringen. Um eine Kompatibilität zwischen den unterschiedlichen Software Herstellern zu ermöglichen, ist Open-BIM unausweichlich und dafür wurden offene Datenformate entwickelt. Durch die Bearbeitung in verschiedenen Programmen, ist ein gleichzeitiges Arbeiten an einem Modell nicht möglich. Dieser Nachteil wird durch ein Arbeiten mittels Bezugskordinaten umgangen. Jeder Fachplaner kann seinen aktuellen Planungsstand über diesen Bezugspunkt in das Gesamtmodell einfügen. Um das Zusammenfügen aller Informationen unterschiedlicher Programme zu realisieren ist das offene Format IFC, welches Stand der Technik ist, im Einsatz.

Durch die freie Auswahl der Planungssoftware ist das Open-BIM Format akzeptierter als das Closed-BIM Format. Nachteil ist jedoch der mögliche Datenverlust bzw. eine Datenreduktion aufgrund der Konvertierung ins offene Format. Dadurch können beim Generieren des Modells inkonsistente Darstellungen erfolgen. [55]

### 2.3.1 Kollaboratives Arbeiten

Unter kollaborativem Arbeiten versteht man das Zusammenarbeiten unterschiedlicher Projektbeteiligter [37]. Im Bauwesen ist damit das gemeinsame Arbeiten verschiedener Fachplaner gemeint. Durch die inhaltliche Ergänzung und hohem Vertrauen soll eine Kompetenz zum Lösen komplexer Probleme und eine hohe Kreativität geschaffen werden. Eine Open-BIM-Umgebung soll dieses kollaborative Arbeiten von der technischen Seite aus ermöglichen, wobei der Datenaustausch eine wesentliche Rolle spielt.

**Offene Formate** Die unterschiedlichen Planungsprogramme sind für ihren jeweiligen Anwendungsbereich spezialisiert, bilden jedoch häufig Automatisierungsinself [37]. Mangelnde Übertragungsmöglichkeiten ziehen eine erneute manuelle Dateneingabe von eigentlich bereits digitalisierten Daten nach sich, wodurch das Fehlerpotential steigt und die Effizienz sinkt. Um eine nachhaltige Interoperabilität zwischen den unterschiedlichen Softwarelösungen zu ermöglichen, werden offene und herstellerneutrale Datenformate benötigt.

**Proprietäre Formate** Dabei handelt es sich um herstellerepezifische Dateiformate [102]. Sie sind das Gegenteil von offenen Formaten und können für den Datenaustausch innerhalb einer Softwarefamilie eines Herstellers verwendet werden. Die Struktur dieser Datenformate ist auf das Anwendungsgebiet der jeweiligen Software spezialisiert und eignet sich daher nicht als Basis für eine vollumfängliche Open-BIM-Planung [37]. Definitionsgemäß wird der Datentransfer mit proprietären Formaten als Closed-BIM Methode bezeichnet. Ein Vorteil des Arbeitens mit proprietären Formaten ist die Datensicherheit, da beim Import und Export mittels offener Formate Fehler auftreten können.

### 2.3.2 Normen in Österreich

Um einen nationalen beziehungsweise internationalen Standard für BIM-Methoden zu erreichen, ist die Verwendung von Normen entscheidend [37]. Im internationalen Raum sind die ISO-Normen, beispielsweise die ISO 19650 für Informationsmanagement mit BIM, relevant. Die wesentlichen Normen in Österreich sind folgende [5]:

**ÖNorm A 6241-1** Digitale Bauwerksdokumentation Teil 1: CAD-Datenstruktur und Building Information Modeling(BIM) — Level 2

**ÖNorm A 6241-2** Digitale Bauwerksdokumentation Teil 2: Building Information Modeling (BIM) — Level 3-iBIM

**ÖNorm A 2063-1** Austausch von Daten in elektronischer Form für die Phasen Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung (AVA) Teil 1: Austausch von Leistungsbeschreibungs-, Ausschreibungs-, Angebots-, Auftrags- und Abrechnungsdaten

**ÖNorm A 2063-2** Austausch von Daten in elektronischer Form für die Phasen Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung (AVA) Teil 2: Berücksichtigung der Planungsmethode Building Information Modeling (BIM) Level 3

**ÖNorm A 7010-6** Objektbewirtschaftung — Datenstrukturen Teil 6: Anforderung an Daten aus Building Information Modeling (BIM)-Modellen über den Lebenszyklus .

### 2.3.3 Begriffe

Eine Erklärung der wesentlichen Begriffe im Zusammenhang mit BIM:

**3D Modell- 3D BIM Modell** Ein rein geometrisches, dreidimensionales Bauwerksmodell ist nicht gleich ein BIM Modell und es gibt auch BIM Modelle ohne Geometriedaten [7]. Ziel der BIM Methode ist, ein Modell über den gesamten Lebenszyklus mit Informationen, welche weit über die geometrischen Abmessungen hinausgehen, zu versorgen und dadurch einen digitalen Zwilling des Bauwerks zu erhalten. Zusätzliche Informationen, neben den Abmessungen, können in einem 3D Modell mittels Beschriftungen hinzugefügt werden, sind jedoch nicht mit dem Bauteil verknüpft. Bei einem BIM Modell werden alle Informationen in Form von Attributen assoziativ in dem Bauteil hinterlegt und passen sich automatisch an. Weiters sind die Bauteile auch miteinander verknüpft und behalten ihre Bezüge zueinander. Der wesentliche Unterschied zwischen einem 3D Modell und einem BIM Modell ist, dass die Bauteile in einem BIM Modell intelligent verknüpft sind und Eigenschaften besitzen.

**BIM Dimensionen** In diesem Absatz werden BIM Modelle in ihren verschiedenen Dimensionen erläutert. Die Eigenschaften eines 3D BIM Modells werden im vorherigen Absatz genannt. Wird ein dreidimensionales BIM Modell um den Faktor Zeit erweitert, erhält man ein 4D Modell [7]. Indem man die einzelnen Objekte mit einem Terminplan verknüpft, kann eine Bauablaufplanung erstellt und terminliche Kollisionen frühzeitig erkannt werden.

Ein Ergänzung der Baukosten führt zu einem 5D Modell und wenn die Kosten des gesamten Lebenszyklus berücksichtigt werden, spricht man von einem 6D Modell [70]. In diesen Modellen kann eine zeitabhängige Kostendarstellung ausgegeben werden [37].

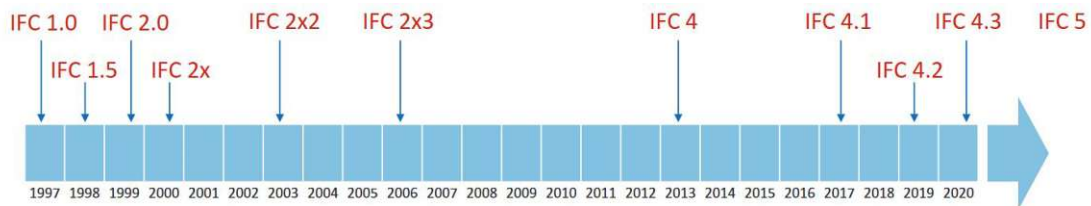


Abb. 2.4: Dimensionen eines BIM Modells (Quelle: [70])

**Interoperabilität** Der Begriff beschreibt die Fähigkeit, dass eine Software mit anderen Programmen interagieren kann [37]. Wesentlicher Faktor ist dabei der verlustfreie Datenaustausch und eine nahtlose Kommunikation der Systeme untereinander. Für die Realisierung einer Open-BIM-Umgebung ist die Interoperabilität entscheidend.

**IFC** Das IFC Format, Industry Foundation Classes, ist ein standardisiertes, offenes Format für den hochwertigen Datenaustausch digitaler Bauwerksmodelle und bildet den Stand der Technik ab. [37, 55]

Die Entwicklung des IFC Formats begann im Jahr 1997 mit der ersten Version IFC 1.0, wurde in den darauf folgenden Jahren oft erweitert und Revisionen durchgeführt. Dies ergab, wie in **Abb. 2.5** zu sehen, eine Vielzahl an Versionen in den Anfängen. Einen wesentlichen Aspekt der breiten Akzeptanz bildete die Tatsache, dass das IFC Format unabhängig von ISO-Norm, herstellerunabhängig, kostenlos und frei zugänglich war. Aufgrund der Unabhängigkeit von Herstellern fallen keine Lizenzgebühren an.



**Abb. 2.5:** Zeitliche Entwicklung des IFC-Formats (Quelle: [37])

Mit der Version 1.5.1 wurden erstmals bauspezifische Softwarepakete implementiert. Gegenwärtig haben 160 Programme das IFC-Format, hauptsächlich noch in der Version 2x3, als Standard implementiert (Stand Ende 2020). Die Version IFC 4 ersetzt zunehmend die Vorgängerversion und wurde nachträglich als ISO-Standard 16739 normiert. Durch diese Normierung bekommt das Format auch für den öffentlichen Auftraggeber immer mehr an Bedeutung, und ist teilweise bereits verbindlich für Vergabe- und Genehmigungsverfahren. Aufgrund der neutralen und transparenten Datenstruktur hat sich mittlerweile IFC in ganz Europa als Übergabeformat für BIM-Modelle an öffentliche Auftraggeber durchgesetzt.[37]

**BCF** BCF ist die Abkürzung für BIM Collaboration Format und beschreibt ein offenes Format, mit dem Informationen zu einem Modell, aber nicht das BIM Modell selbst ausgetauscht werden kann [37]. Umgelegt auf eine konventionelle Planung wird damit nicht der Plan, sondern Revisionswolken und Anmerkungen auf diesem weitergegeben.

Bei der Fusionierung von Teilmodellen, welche von unterschiedlichen Fachplanern erstellt wurden, treten oft Kollisionen auf die in iterativen Prozessen behoben werden müssen [37]. Während der Ausführungsphase werden Mängel meist manuell im Modell vermerkt. Um diese Themen, welche im Modell notiert sind, weitergeben zu können, kommt das BCF Format zum Einsatz. Für eine Kommunikation im Modell muss nicht mehr das gesamte Modell, sondern nur die BCF Datei übermittelt werden [65]. Diese kann entweder als Datei ausgetauscht oder über eine CDE mittels API zur Verfügung gestellt werden.

Technisch gesehen ist das BCF Format eine Zip-Datei, die verschiedene Informationen in standardisierten Ordnerstrukturen enthält [65]. Dabei werden neben Name und Beschreibung des Mangels auch Daten wie Position, Kameraausrichtung, Status der Bearbeitung und Datum ausgetauscht. Mängel können damit konkret einem Bauteil im Modell zugeordnet werden.

**CDE** Eine gemeinsame Datenumgebung, Common Data Environment, wird für ein kollaboratives Arbeiten im Sinne des BIM-Gedankens benötigt [37]. Eine Vielzahl unterschiedlicher Modell- und Projektdaten müssen zeitgleich verarbeitet und gespeichert werden. Auf technischer Ebene stehen beispielsweise Cloud-Lösungen als zentraler Datenspeicher zur Verfügung [53]. Neben dem Speicherort von Daten, ist eine Struktur für die Anwender vorzugeben. Zu beachtende Themen

sind die Dateiformate, in denen die Fachmodelle abgespeichert werden, aber auch organisatorische Punkte, wie Zugriffsrechte der Projektbeteiligten. In der CDE werden alle Informationen eines Projekts zentral gespeichert, wobei sie sich nicht nur für die Planungsphase sondern für den gesamten Lebenszyklus als tauglich erweisen muss.

## 2.4 Erweiterbarkeit der Software

Im Zusammenhang mit BIM ist oftmals eine Erweiterung von bestehenden Softwarelösungen erforderlich [37]. Die Gründe dafür sind einerseits spezifische Projektanforderungen, da jedes Bauvorhaben individuell ist und andererseits das große Angebot an Programmen, welches zu Kommunikationsproblemen untereinander führt. Kann das Aufgabenspektrum des Projektes nicht mit serienmäßiger Software abgedeckt werden, so ist ein Lösungsansatz die fehlenden Anforderungen über Programmierschnittstellen zu ergänzen.

### 2.4.1 Programmierschnittstellen

Über Programmierschnittstellen kann auf die Datenstruktur einer Software zugegriffen werden [37]. Die drei wesentlichen Möglichkeiten sind das Abfragen von Informationen, die direkte Kommunikation zwischen Programmen und das Hinzufügen von zusätzlichen Funktionen. Teilweisen arbeiten Programme mit ihrem nativen Format und geben keinen transparenten Einblick in ihre Datenstruktur. Über eine Programmierschnittstelle können zusätzliche Exportfunktionen hinzugefügt werden, um Zugang zu den Projektdaten zu erhalten. Eine weitere Möglichkeit um die werksmäßig implementierten Funktionen zu erweitern, ist eine direkte Verknüpfung zwischen herstellerfremden Programmen. Dabei erhält der Nutzer nicht direkt Einblick in die Datenstruktur, jedoch können Projektdaten ausgetauscht und synchronisiert werden. Für den Fall, dass eine Software um Funktionen innerhalb der Programmoberfläche erweitert werden soll, stehen Plug-ins zur Verfügung, welche direkt in das bestehende Programm eingespielt werden können.

### 2.4.2 API

Über Application Programming Interfaces (API) kann der Bedarf, ein bestehendes Programm um eigene Funktionen zu erweitern, über sogenannte Add-ins beziehungsweise Plug-ins gedeckt werden [37]. Ziel kann ein Hinzufügen von neuen Planungswerkzeugen oder die Abfrage von Daten sein. Im Fall von Programmen, welche für BIM Anwendungen herangezogen werden, können eigens generierte Erweiterungen über eine Programmierschnittstelle, namens API, implementiert werden. Die Add-ins beziehungsweise Plug-ins müssen entweder über dafür vorgesehene Pfade im Programm selbst oder über Ordner in der Programminstallation eingespielt werden. Nicht jedes Programm lässt die selben Möglichkeiten zu, um eigene Erweiterungen zu implementieren. Die wesentliche Vorgangsweise, in **Abb. 2.6** abgebildet, ist jedoch bei allen Programmen gleich. Die Erweiterung kann, je nach Programm, in verschiedenen Programmiersprachen erfolgen. Für diese Arbeit ist die Erweiterung von Funktionen bezüglich Import und Export von Daten von zentraler Bedeutung.

### 2.4.3 Begriffe

Eine Erklärung der wesentlichen Begriffe im Zusammenhang mit Erweiterbarkeit einer Software:



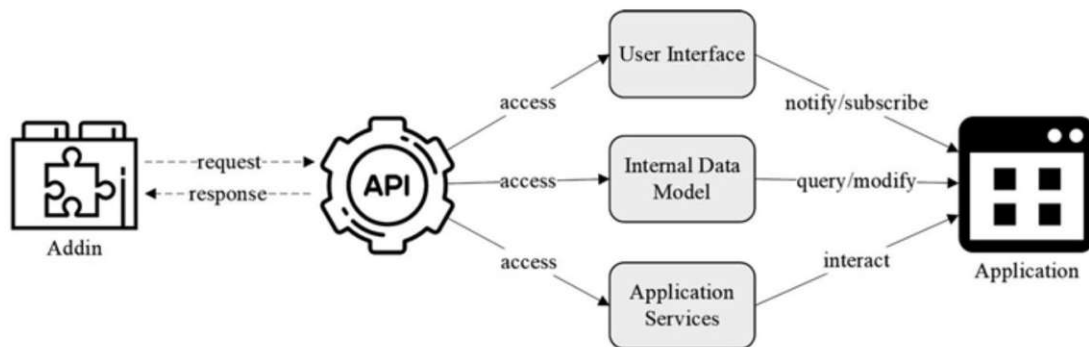


Abb. 2.6: Funktionsweise der Interaktion über eine API Schnittstelle (Quelle: [37])

**Plug-ins** Der Begriff Plug-in kommt aus dem Englischen und bedeutet anschließen beziehungsweise anstecken[44]. Im Zusammenhang mit Softwareprogrammen handelt es sich um Anwendungen mit kleinerem Funktionsumfang, welche man einem anderen Programm hinzufügt. Im Bereich der BIM-Planung können damit zahlreiche Programme um spezifische Funktionen erweitert werden [37]. Diese Plug-ins können sowohl selbst programmiert oder aus vorgefertigten Bibliotheken entnommen werden.

# Kapitel 3

## Programmanalyse

Um eine objektive Analyse der einzelnen Programme zu ermöglichen und keine unterbewusste Bewertung mit einfließen zu lassen, werden die nachfolgenden Programme innerhalb ihrer Anwendungskategorie alphabetisch sortiert. Bei den Programmen handelt es sich um diverse Planungsprogramme, welche sich für den Tunnelbau beziehungsweise für Aufgaben im Zusammenhang mit einem Tunnelbauprojekt eignen. Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden die Softwareprodukte in dieser Arbeit hinsichtlich der Anwendbarkeit im Tunnelbau, der Open-BIM-Tauglichkeit und der Erweiterbarkeit analysiert:

**Anwendung im Tunnelbau** Die Frage, ob ein Programm im Zuge eines Planungsprozesses des Tunnelbaus effektiv eingesetzt werden kann, soll hier beantwortet werden. Dabei wird sowohl darauf eingegangen für welche Fachplaner beziehungsweise Anwendungsgebiete dieses Programm geeignet ist, also auch auf die technische Umsetzbarkeit des Planungsprozesses für den Anwender. Weiters wird auch auf konkrete Problemlösungen und Erweiterungsmodule eingegangen, welche schlussendlich eine umfassende Planung ermöglichen.

**Open-BIM Tauglichkeit** In diesem Absatz werden die direkten Import und Export Möglichkeiten von Modelldaten behandelt. Dabei geht es um serienmäßig implementierte , welche der Anwender in der Basisversion der Software verwenden kann. Dazu sind die wichtigsten Dateiformate im Zusammenhang mit dem Open-BIM-Gedanken tabellarisch aufgelistet. Die jeweiligen Tabellen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern bilden nur Dateiformate mit einer Kausalität zur Frage des interoperablen Datenaustauschs ab. Um dem Open-BIM-Gedanken gerecht zu werden, wird der Fokus im speziellen auf, von Software Hersteller unabhängiger Formate gelegt, da diese einen offenen Datenaustausch ermöglichen.

**Erweiterbarkeit** Falls die serienmäßigen Import und Export Funktionen der Programme ein nicht ausreichendes Spektrum an Möglichkeiten für die Verwendung von offenen Formaten anbietet, besteht noch die Variante, die Software über Programmierschnittstellen zu erweitern. Die Erweiterbarkeit der jeweiligen Softwareumgebung um zusätzliche Import und Export Funktionen, beziehungsweise Möglichkeiten eines direkten Zugriffs auf Modelldaten über eine API, wird hier beschrieben. Darüber hinaus werden auch Erweiterungsmöglichkeiten für tunnelbautechnische Planungswerkzeuge genannt.

Die analysierten Programme je Anwendungskategorie sind:

#### **Bauwerksmodellierung:**

- Autodesk AutoCAD
- Autodesk Civil 3D
- Autodesk InfraWorks 360
- Autodesk Revit
- McNeel Rhinoceros 3D

#### **Kosten- und Terminplanung:**

- ib-data ABK8
- Microsoft Projekt
- Nevaris Auer Success
- RIB iTWO

#### **Koordination und Viewer:**

- Autodesk BIM 360
- Autodesk Navisworks
- Datacomp BIM Vision
- Kubus BIMcollab Cloude
- Kubus BIMcollab Zoom
- Nemetschek Solibri

#### **Geologie und Geotechnik:**

- Geoconsult TUGIS
- Geodata Eupalinos
- Geodata Kronos
- Itasca Consulting Group  
FLAC/UDEC/3DEC
- RIB RTwalls
- Rocscience RS2
- Seequent Leapfrog Works

#### **Programmerweiterungen:**

- Autodesk Dynamo
- Autodesk Geotechnical Modeler für Civil 3D
- Fides Infrastructure Toolbox
- McNeel Grasshopper
- Mensch und Maschine BIM Booster
- Sofistik Bridge Modeler
- Sofistik Reinforcement Detailing

#### **Sonstige Programme:**

- Autodesk ReCap Pro
- CloudeCompare
- Dassault Systèmes Abaqus
- Epic Games Twinmotion

## 3.1 Bauwerksmodellierung

Dieses Kapitel umfasst dreidimensionale CAD Programme, in denen die geplanten Bauwerke hauptsächlich graphisch als 3D Modell erstellt werden. Durch die Hinterlegung der Bauteile mit Attributen wird daraus ein BIM Modell generiert.

### 3.1.1 Autodesk AutoCAD

AutoCAD vom Hersteller Autodesk ist eine CAD (engl. computer-aided design) Software [10]. Damit können sowohl 2D als auch 3D Objekte gezeichnet werden. Aus sich wiederholenden Objekten können Blöcke erstellt werden, welche sich inklusive beigefügter Attribute wiederholt einfügen lassen. Um die erstellte Zeichnung als Plan auszugeben, können Bemaßungen und Beschriftungen hinzugefügt werden. Thematisch unterschiedliche Teilzeichnungen können auf eigenen Ebenen, sogenannten Layern, abgespeichert und je nach Bedarf übereinander eingeblendet werden.

Für eine variable Planung können Zeichenobjekte mit einer Excel-Tabelle verknüpft und somit Änderungen in den Tabellenblättern automatisch in die Zeichnung eingearbeitet werden [10]. In die entgegengesetzte Richtung kann der Datenfluss ebenfalls erfolgen. Daten von verschiedenen Blöcken können in einem Excel Dokument zusammengefasst werden. Damit kann man beispielsweise die Stückzahl und Art der geplanten Fenster effizient ermitteln. Bei 3D Modellen können Schnittführungen und fotorealistische Visualisierungen ausgegeben werden.

**Anwendung im Tunnelbau** Tunnelplanung erfolgt häufig in AutoCAD, jedoch können hier nur 3D Modelle generiert werden, aber keine BIM Modelle [110]. Zweidimensionale Zeichnungen in AutoCAD können als Grundlage für die BIM Modellierung in anderen Programmen dienen [70]. Spezielle Planungswerkzeuge für den Tunnelbau sind nicht integriert, jedoch sind die oben angeführten Funktionen auch für eine Tunnelplanung einsetzbar, weshalb eine Anwendung im Tunnelbau gegeben ist.

**Open-BIM Tauglichkeit** Die Zeichnungen können für unterschiedliche Projektbeteiligte freigegeben und von denen bearbeitet werden [10]. Planunterlagen kann man über eine von Autodesk zur Verfügung gestellte Cloud teilen.

Eine direkte Ausgabe der Daten in ein IFC Format ist nicht möglich, jedoch kann in vielen Programmen das Programmformat .dwg von AutoCAD eingelesen werden [8]. Über Umwege kann die AutoCAD Datei von einem anderen DWG kompatiblen Programm als IFC ausgegeben werden. Als Software für BIM Modellierung im engen Sinn wird AutoCAD nicht gezählt.

**Erweiterbarkeit** Über das Autodesk Developer Network stehen unterschiedliche Varianten zur Verfügung, um AutoCAD an die benutzerdefinierten Anforderungen anpassen zu können [9]. Neue Werkzeuge können entweder selbst programmiert oder aus dem Netzwerk heruntergeladen werden. In dieser Sammlung befinden sich auch Plug-ins für den Im- und Export von IFC Dateien. Über die offene Struktur der Software ist ein Zugriff auf die Datenbank, das Grafiksystem und die Befehle möglich. Die Programmierschnittstellen AutoLISP, ObjectARX, ActiveX -Automatisierung, JavaScript-Code, Verwaltetes .NET, VBA und Visuelle LISP, mit welchen auch eine Verknüpfung zu anderen Programmen hergestellt werden kann, sind vorhanden. Über die ObjectARX können Entwickler auf die Datenbank, das Grafiksystem und die Befehle zugreifen.

**Tab. 3.1:** Formate für den Datenaustausch in Autodesk AutoCAD (Quelle:[8])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.3ds, .ipt, .dgn, .iges, .pdf, .prt, .wmf,	.dwg, .dxx, .eps, .iges, .wmf, .dgn, .pdf,
Offene Formate	.sat, .3dm, .stp	.dwf, .sat, .bmp, .stl,

### 3.1.2 Autodesk Civil 3D

Civil 3D ist ein Planungsprogramm aus der AEC (Architecture, Engineering and Construction) Kollektion vom Hersteller Autodesk und bietet einen Funktionsumfang für die BIM-Modellierung. [110], [19] Diese Software unterstützt Planer bei der Erstellung eines digitalen Modells in den Bereichen Tief- und Infrastrukturbau. Die Software hilft nicht nur bei der Modellierung, sondern auch bei der Dokumentation und BIM Planung. Eine Anpassung an die örtlichen Planungsstandards ist durch das Importieren von länderspezifischen Zusatzpaketen, sogenannten Country-Kits möglich.

**Anwendung im Tunnelbau** Eine eigens vorgesehene Planungssparte in Civil 3D bildet der Tunnelbau [19]. Bei einer gesamtheitlichen Planung werden teilweise verschiedene Programme eingesetzt [110]. Civil 3D ist geeignet für die Achsenplanung und Trassierung des Tunnels. Damit ein anschließend verwendetes Programm die Trassierungspunkte nicht einfach mittels Spline verbindet, wird die Erstellung eines 3D Profilkörpers über die gesamte Tunnellänge empfohlen. Die erhaltenen Referenzpunkte können in Excel exportiert werden und damit als Grundlage für andere Planungsprogramme dienen. Die Ausgabe erfolgt in Weltkoordinaten, welche gegebenenfalls in Projektkoordinaten umgewandelt werden müssen.

Ebenfalls geeignet ist Civil 3D für die 3D Baugrundmodellierung [118]. Hierbei ist jedoch auf die räumliche Ausdehnung des Modells zu achten, da zu große Projektgebiete zu Problemen führen. Der Import von Tunnelbauwerken ermöglicht eine gute Betrachtung der Bauwerksinteraktionen.

**Open-BIM Tauglichkeit** Ein gemeinsames Arbeiten kann über die Autodesk Docs Cloud erfolgen [13]. Dies ist aber nur für die herstellerabhängige Autodesk Umgebung möglich. Um ein Modell als IFC ausgeben zu können, müssen die Elemente als Volumenkörper modelliert sein. Der Import und Export von und in ein offenes Format kann bei Civil 3D seit 2016 mit IFC erfolgen.

**Erweiterbarkeit** Für die Erweiterung von Civil 3D gibt es drei API's, die alle für benutzerdefinierte Modellierungen verwendet werden können [11]. Weiters gibt es bereits vorgefertigte Zusatzmodule, die man als Erweiterungen in Civil 3D einspielen kann. Dabei konnten aber nur proprietäre Erweiterungen ausgemacht werden.

**Tab. 3.2:** Formate für den Datenaustausch in Autodesk Civil 3D (Quelle:[21])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.iges, .wmf, .dgn, .3ds, .iam, .pdf, .prt,	.dwg, .dxx, .eps, .iges, .wmf, .dgn,
Offene Formate	.ifc, .sat, .3dm, .stp,	.ifc, .dwf, .sat, .bmp, .stl

### 3.1.3 Autodesk InfraWorks 360

Autodesk hat mit InfraWorks 360 eine Software für die Entwurfsplanung entwickelt, welche der AEC Kollektion (Architecture, Engineering and Construction) zugehörig ist [23]. Eine Entwurfsplanung kann dabei in einem realen Umfeld erfolgen, vor allem für Infrastrukturprojekte [70]. Durch die digitale Planung können aus dem Programm Materialmengen ausgegeben werden, welche unter anderem für die Kostenschätzung relevant sind. Eine umfassende Modellierung, dabei werden Straßen- und Brückenentwürfe miteinbezogen, kann bei der Trassenauswahl helfen. Weiters können Hochwassersimulationen im Projektgebiet durchgeführt werden.

**Anwendung im Tunnelbau** Im Rahmen des Tunnelbaus wird InfraWorks 360 für den Tunnelentwurf verwendet [13]. Mit Autodesk Tunnel Design können aus einer Palette verschiedene Tunnelkomponenten für den Entwurf gewählt werden. Falls man benutzerdefinierte Tunnelkomponenten benötigt, können diese in Autodesk Inventor erstellt werden. Wenn ein Tunnelquerschnitt festgelegt wurde, kann dieser entlang der Trasse extrudiert werden. Wurde der Tunnel entlang einer Komponentenstraße modelliert, so können im Nachhinein die Tunnelparameter geändert werden. Weiters können auch speziell für den Tunnelbau Massen ermittelt werden.

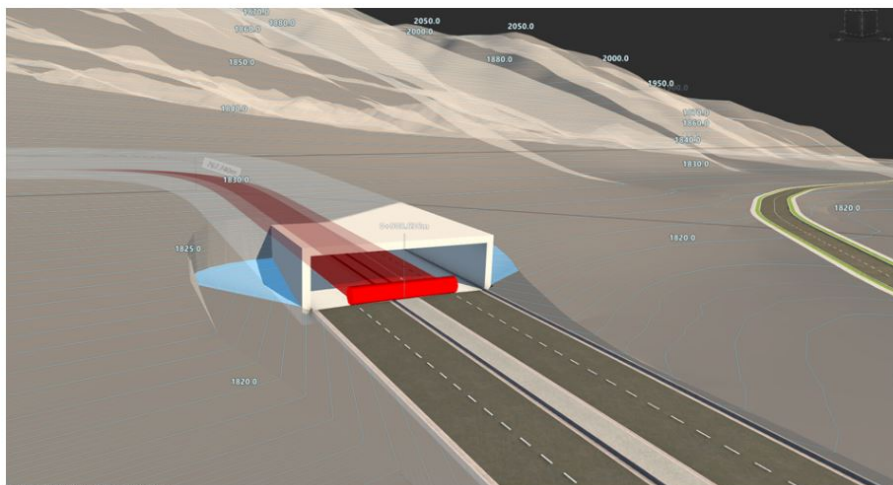


Abb. 3.1: Darstellung eines 3D Tunnelmodells in InfraWorks 360 (Quelle: [13])

**Open-BIM Tauglichkeit** Für die gemeinsame Zusammenarbeit in einem Modell bietet Autodesk drei Varianten an [22]. Sofern man ein Autodesk Benutzerkonto hat, kann man über eine Cloud gemeinsam arbeiten, oder nur eine Ansicht freigeben. Weiters gibt es auch die Möglichkeit, lokal an einem gemeinsamen Projekt zu arbeiten. Kompatible Formate für den Datenaustausch mittels Dateiweitergabe sind in Tabelle 3.3 ersichtlich.

**Erweiterbarkeit** Es ist eine API vorhanden, welche eine Verbindung zu einer Cloud von einem beliebigen Gerät ermöglicht [24]. Diese API ist allerdings nur mit einer Autodesk ID zugänglich und ermöglicht zwar einen zusätzlichen Datenaustausch, jedoch nur in der Umgebung von Autodesk. Weiters wird auch die Konnektivität nur in der Autodesk Umgebung angeboten. Eine Erweiterbarkeit hinsichtlich der Export Funktionen mittels offener Formate über eine API konnte nicht ermittelt werden.

**Tab. 3.3:** Formate für den Datenaustausch in Autodesk InfraWorks 360 (Quelle:[20])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.dwg, .dgn, .3ds, .fbx, .imx, .rcs, .rvt,	.fbx, .imx,
Offene Formate	ifc, .dae, .dxf, .obj, .xml,	.dae, .obj,

### 3.1.4 Autodesk Revit

Revit ist ein Planungsprogramm aus der AEC (Architecture, Engineering and Construction) Kollektion vom Hersteller Autodesk [31]. Diese Software unterstützt Planer bei der Erstellung eines BIM Modells in den Bereichen Architektur, Ingenieur- und Bauwesen. Eine umfassende Planung vom ersten Entwurf bis zum fertigen Bauwerk ist hier möglich.

**Anwendung im Tunnelbau** Ein BIM Modell eines Tunnels in Revit wird auf einer Modellierungsebene mit einem Durchmesser von 32 km und ohne Berücksichtigung der Erdkrümmung erstellt [45]. Die zwei möglichen Varianten sind entweder die Extrusion des Tunnelprofils oder die Aneinanderreihung von modellierten Blockfamilien entlang der Trasse. Eine Familie ist eine Gruppe von festen Parametern, zum Beispiel Abmessungen und Material, deren Werte jedoch variieren. Daraus folgen Familientypen, welche im Tunnelmodell gleiche Bauteiltypen mit unterschiedlichen Abmessungen und Eigenschaften darstellen. Revit bietet viele vorgefertigte Familien, wie zum Beispiel Türen und Wände an, für den Tunnelbau wird jedoch noch sehr wenig zu Verfügung gestellt [110]. Die verschiedenen Querschnitte erfordern daher ein selbstständiges Erstellen von Revit-Familien. Dabei muss ein Konzept überlegt werden, welche Parameter beziehungsweise Informationen diese Familie enthalten soll.

Die Variante mit den aneinander gereihten Blöcken ermöglicht die Zuweisung von Informationen und Eigenschaften, was den Anforderungen eines BIM Modells entspricht [45]. Durch diese Variante kann ebenso der Bauablauf realistisch wiedergegeben werden. Weiters können auch Informationen für Massenermittlung und Stützmittel eingepflegt werden. Eine Planerstellung von Längsschnitten und Grundrissen ist jedoch oft problematisch, weshalb die Revit Modellierung parallel zur konventionellen Planung empfohlen wird [110].

**Open-BIM Tauglichkeit** Die Open BIM-Tauglichkeit wird unter anderem über die IFC Schnittstelle gewährleistet [31]. Dabei kann das Modell in die Formate IFC2x2, IFC2x3 und IFC4 exportiert werden. Beim Import werden die IFC-Versionen IFC2x2, IFC2x3, IFC2x und IFC4 unterstützt, wobei letztgenanntes nur für Verknüpfungen funktioniert.

**Erweiterbarkeit** Die FIDES Infrastructure-Toolbox, kurz gesprochen FIT, ist ein Zusatzmodul, um entlang einer Tunneltrasse ein dreidimensionales Tunnelmodell zu generieren. Eine Verknüpfung mit einem Leistungsverzeichnis kann durch ein weiteres Zusatzmodul ermöglicht werden.

Die Erweiterbarkeit bei Revit mittels API erfolgt in einer .NET basierten Programmiersprache, wie C# und Visual Basic und C++ [30], [113]. Generelle Anwendungsgebiete der Erweiterungen sind:

- Erstellen von Add-Ins und Makros um wiederkehrende Aufgaben in Revit automatisch abzuwickeln
- Um Projekt-Design Standards automatisch zu überprüfen

- Exportieren von Daten zur Analyse und Dokumentation
- Importieren von externen Daten um neue Elemente oder Parameterwerte zu erstellen
- Einbinden von Anwendungen von Drittanbietern in Autodesk Revit Produkte
- Erstellung einer automatischen Projektdokumentation

Eine digitale Bibliothek, namens Revit API Docs, mit vorgefertigten Zusatzmodulen steht zur Verfügung, um eine benutzerdefinierte Anwendung mittels API Schnittstelle einrichten zu können.

**Tab. 3.4:** Formate für den Datenaustausch in Autodesk Revit (Quelle:[32])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.dwg, .dgn,	.dwg, .dgn, .fbx, .rvt, .nwc,
Offene Formate	.ifc, .3dm, .dxf, .sat	.ifc, .dxf, .sat, .obj,

### 3.1.5 McNeel Rhinoceros 3D

Rhinoceros 3D ist eine Software von McNeel für den Bereich der 3D Modellierung [80]. Das Anwendungsgebiet geht weit über die technische Planung im Bauwesen hinaus. Neben Kurven, Flächen und Volumenkörpern können auch Punktwolken, Netze und organische Formen erzeugt werden. Die Oberflächen der Formen können für die optische Gestaltung illustriert und animiert werden. Für die Bildsynthese der Modelle stehen Rendering-Funktionen wie Glanzlichter und Schatten zur Verfügung. Neben der 3D Modellierung kann man aber auch technische Zeichnungen in 2D erstellen. 2D Zeichenelemente, wie Punkte, Pfeile, Bemaßungen und Textblöcke sind als Funktionen integriert, um eine planliche Darstellung zu ermöglichen.

**Anwendung im Tunnelbau** Zur Generierung von Geländemodellen oder der Erhebung von Bestandsbauten werden oft Laser-Scans eingesetzt. Die erhaltenen Punktwolken können mit Rhinoceros 3D verarbeitet werden [80]. Die Modellierung eines U-Bahn Tunnels wurde in der Praxis mit Rhinoceros 3D umgesetzt [66]. Es sind zwar keine exklusiven Funktionen für den Tunnelbau integriert, jedoch sind die oben angeführten Funktionen auch für eine Tunnelplanung nützlich. Durch die vielfältigen Modellierungsmöglichkeiten können alle Querschnittsformen realisiert werden.

**Open-BIM Tauglichkeit** Diese Software kann auch als Erweiterung in Autodesk Revit verwendet werden [80]. Somit stehen die Revit Funktionen bezüglich Datenaustausch indirekt auch für Rhinoceros 3D zur Verfügung. Neben den standardmäßig integrierten Dateiformaten ist Rhinoceros 3D auch mit der openNURBS Bibliothek kompatibel. Die openNURBS-Initiative stellt Werkzeuge zur Verfügung um den Datenaustausch von 3D-Modellen zwischen herstellerunabhängigen Programmen zu ermöglichen. Eine direkte IFC Schnittstelle ist nicht implementiert.

**Erweiterbarkeit** Über die von McNeel verwaltete Webseite, food4Rhino, können Erweiterungen von externen Programmierern bezogen werden [79]. Es stehen zusätzliche Werkzeuge für die Geländemodellierung zur Verfügung. Ebenso gibt es Aufsätze für den Datenaustausch. Mit beispielsweise BIM GeomGym IFC können die Modelle in Form eines IFC Formats exportiert werden. Weiters gibt es auch Erweiterungen für Export Funktionen in andere native Formate, wenn man ein 3D-Modell in ein konkretes Programm überspielen möchte. Für Software-Entwickler



stehen in Rhinoceros 3D über die Plattform Rhino Developer diverse Möglichkeiten für die Erstellung eigener Erweiterungen zur Verfügung. Mit dem Projekt Rhino.Inside wird die Möglichkeit geschaffen, Rhinoceros 3D innerhalb anderer Programme zu verwenden [80]. Über die API kann Rhinoceros 3D Informationen mit einer Hostsoftware bidirektional austauschen.

**Tab. 3.5:** Formate für den Datenaustausch in McNeel Rhinoceros 3D (Quelle:[81])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.dwg, .iges, .dgn, .3ds, .pdf, .fbx, .ai,	.dwg, .iges, .wmf, .3ds, .pdf, .fbx, .ai, .xgl,
Offene Formate	.dxf, .stl, .3dm, .stp, .obj, .3mf, .amf,	.dxf, .sat, .stl, .3dm, .stp, .dae, .obj, .3mf, .amf,

## 3.2 Kosten- und Terminplanung

Programme die sowohl bei Themen der Ausschreibung und Vergabe, als auch für Kosten- und Terminplanung essenziell sind, werden hier betrachtet.

### 3.2.1 ib-data ABK8

Die ABK Software vom Hersteller ib-data ist eine Baumanagementsoftware mit dem Fokus auf AVA (Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung) [42]. Dabei lässt sie sich in vier Anwendungsbereiche, Projektmanagement, Büromanagement, Auftraggeber und Auftragnehmer unterteilen. Im Bereich des Projektmanagements werden sowohl die Terminplanung als auch die Kostenplanung behandelt. Eine Fortschreibung dieser, und ein Vergleich zwischen Soll und Ist Werten sind möglich. Zusätzliche Projektdaten, Verträge und E-Mails können gesammelt und für alle Projektbeteiligten abgelegt werden. Eine Unterstützung zur Erstellung eines SiGe-Plans (Sicherheits- und Gesundheitsplan) inklusive aller benötigten Dokumente wird angeboten. Der Bereich der Büroplanung umfasst Themen wie Controlling, Rechnungswesen und Mitarbeiterverwaltung. Für Auftraggeber ist die Software für die Erstellung von Ausschreibungsunterlagen konzipiert [42]. Das LV (Leistungsverzeichnis) kann mit Vorlagen ausgearbeitet und geprüft werden. Im Zuge der Vergabe können unterstützend die vorliegenden Angebote geprüft und analysiert werden. Während des laufenden Projekts bietet die Software Funktionen zur Abrechnungskontrolle an. Auf Seiten des Auftragnehmers unterstützt die Software im gesamten AVA Ablauf [42]. Die Kalkulation der Einzelpositionen sowie die Möglichkeit verschiedene Angebotsvarianten zu berechnen sind vorhanden. Um Angebote von Subunternehmern vergleichen zu können liegt die Funktion des Preisspiegels vor. Auch auf der Seite des Auftragnehmers kann ABK bei der Bauabrechnung eine Hilfestellung darstellen [119].

**Anwendung im Tunnelbau** Für Tunnelbauprojekte kommt die ABK Software häufig zur Anwendung [117]. Spezielle Werkzeuge für den Tunnelbau konnten nicht ermittelt werden.

**Open-BIM Tauglichkeit** ABK beschäftigt sich auch explizit damit, dass Open-BIM von der Planung bis zur Ausschreibung verwendet werden kann [42]. Über das IFC Format wird ein Importieren von CAD Modellen möglich und diese können mit dem ABK-BIM-Viewer angesehen werden. Bauwerke werden automatisch interpretiert und somit eine Zuordnung zu Bauteilgruppen und Materialien durchgeführt. Danach wird jedem BIM-Objekt mindestens eine Position im

LV zugeordnet. Weiters sind auch die ÖNORMen A2063, B2062 und B2063 integriert, um den Austausch von AVA Daten zwischen unterschiedlichen Projektbeteiligten zu vereinheitlichen.

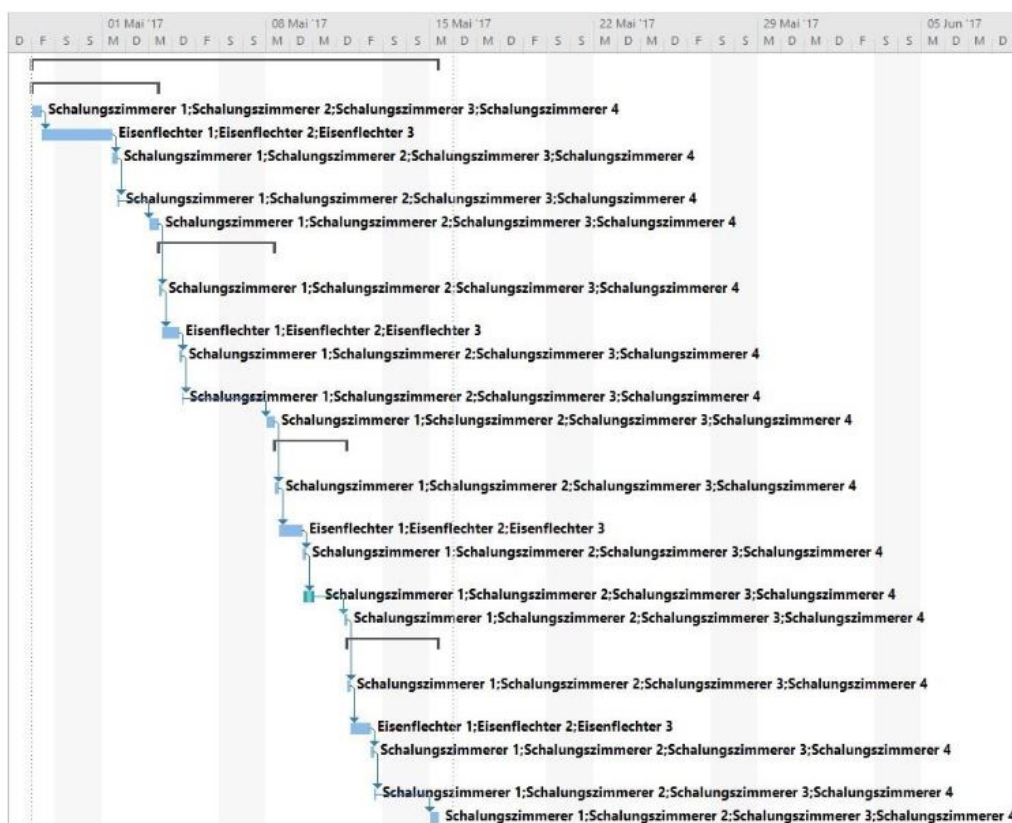
**Erweiterbarkeit** Eine Erweiterbarkeit über eine API konnte nicht ermittelt werden.

**Tab. 3.6:** Formate für den Datenaustausch in ib-data ABK8 (Quelle:[42])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.pdf, .xls,	.pdf, .xls,
Offene Formate	.ifc, .csv,	.ifc, .csv,

### 3.2.2 Microsoft Projekt

Mit Projekt, vom Hersteller Microsoft, kann das Projektmanagement, vor allem die Terminplanung, unterstützt werden [84]. Um die vernetzten Abhängigkeiten der einzelnen Bauabläufe in unterschiedlichen Detaillierungsgraden anzuzeigen, wird eine Software benötigt [116]. Bei der Planung werden sowohl Dauer und Ressourcen als auch der Einsatz von Teammitgliedern eingetaktet [84]. Ein gemeinsames, zeitgleiches Arbeiten in einem Projekt ist durch die Cloude möglich. Um ein 4D Modell zu erhalten wird dem Projekt ein Ablaufplan hinzugefügt. Dieser wird oft als Terminliste, Gantt-Diagramm oder Netzwerk-Diagramm dargestellt [72].



**Abb. 3.2:** Ein Bauablaufplan in MS Project als Gantt-Diagramm dargestellt. (Quelle: [72])

**Anwendung im Tunnelbau** Eine konkrete Anwendung für den Tunnelbau konnte nicht gefunden werden. Jedoch sind die oben angeführten Funktionen auch für eine Tunnelplanung essentiell, weshalb eine Anwendung im Tunnelbau angenommen werden kann.

**Open-BIM Tauglichkeit** Die Erstellung eines 4D Modells bedarf schon vorab eine förmliche Abstimmung mit dem 3D Modell, da die Ablaufplanung und die geometrische Planung die gleiche Projektstruktur benötigen [46]. Das 3D Modell und die Terminplanung müssen über eine dritte Anwendung, beispielsweise über Navisworks, zusammengefügt werden. Dabei wird jedem Objekt ein Vorgang zugewiesen.

**Erweiterbarkeit** Eine Erweiterbarkeit über Add-ins ist über eine API möglich [27]. Ein Zugriff auf Daten funktioniert nur für proprietäre Programme. Hinsichtlich der Erweiterbarkeit von Export Funktionen mittels offener Formate über eine API konnte nichts ermittelt werden.

**Tab. 3.7:** Formate für den Datenaustausch in Microsoft Projekt (Quelle: [84])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.xls,	.xls,
Offene Formate	.txt, .csv, .xml,	.txt, .csv, .xml,

### 3.2.3 Nevaris Auer Success

Auer Success ist eine in Österreich weit verbreitete AVA Software, des Unternehmens Nevaris Bausoftware [89]. Mit Success X wurde Anfang 2020 ein Produktnachfolger auf den Markt gebracht. Die drei wesentlichen Bereiche der Software sind:

- Ausschreibung
- Abrechnungsprüfung
- Abrechnung

Für eine Ausschreibung muss vor allem ein Leistungsverzeichnis erstellt werden. Dies kann in Auer Success mit den vorgefertigten Positionen, welche von einer Normen Basis ausgehen, oder eigenen Positionstexten erfolgen. Für die Massenermittlung steht ein Bereich für Formeln zur Verfügung, wodurch der Rechenweg dokumentiert werden kann. Speziell für Allplan liegt die Möglichkeit vor, die Mengen direkt aus dem CAD Plan zu ermitteln. Für Internationale Projekte kann die Ausschreibung auch zweisprachig erfolgen.

Die Abrechnungsprüfung erfolgt über die Bereiche der Mengenermittlung, der Überprüfung des Aufmaßblatts, des Summenblatts und der Schlussrechnung. Korrekturen, welche sowohl händisch als auch mit vorgefertigten Formeln erfolgen, können direkt auf der originalen Rechnung in einer zweiten Ebene durchgeführt werden. Die einzelnen Ebenen können je nach Bedarf mit Passwörtern gesichert werden.

Bei der Abrechnung werden sowohl Teilrechnungen als auch die Schlussrechnung gelegt [92]. Die Massenberechnungen können mittels integrierter Formel oder händisch durchgeführt und zur Dokumentation mit Skizzen und Kommentaren ergänzt werden. Durch die integrierten Formeln können einzelne Parameter vernetzt werden, wodurch bei Änderungen eine automatische Anpassung erfolgt. Bei zeitlich unterschiedlich erstellten Aufmaßblättern erfolgt die Index Anpassung ebenfalls automatisch. Erhaltene Zahlungsbeträge können in der Rechnungsverwaltung geordnet werden.

**Anwendung im Tunnelbau** Eine konkrete Anwendung für den Tunnelbau konnte nicht gefunden werden. Jedoch sind die oben angeführten Funktionen auch für eine Tunnelplanung nützlich, weshalb eine Anwendung im Tunnelbau angenommen werden kann.

**Open-BIM Tauglichkeit** Der Datenaustausch kann laut ÖNORMen A2063, B2062 und B2063 erfolgen [89]. Eine GAEB Schnittstelle ist ebenfalls integriert. Um eine Open-BIM Tauglichkeit zu ermöglichen ist eine IFC Schnittstelle vorhanden. Die importierten Modelle können über einen BIM-Viewer angezeigt werden. Das volle Potential der Software kann jedoch nicht genutzt werden, da kein AEK (Allgemeiner Elemente Katalog) im Bereich der Verkehrs-Infrastruktur vorhanden ist [91].

**Erweiterbarkeit** Auer Success hat eine API integriert, um mit anderen ERP (Enterprise Resource Planning) Systemen zu kommunizieren, Plug-ins können aber nicht angebunden werden [89]. Über die Erweiterung kann man auch eine BCF Datei austauschen [91].

**Tab. 3.8:** Formate für den Datenaustausch in Nevaris Auer Success (Quelle: [89])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.xls,	.xls,
Offene Formate	.ifc,	.ifc,

### 3.2.4 RIB iTWO

RIB Software hat das Programm iTWO entwickelt und ist für die Bereiche Kostenmanagement, AVA und Planung spezialisiert [95]. Dabei basieren jedoch sämtliche Daten auf 3D Modellen, wodurch der Prozess der Planung und des Bauens visuell unterstützt wird. Durch iTWO 5D werden die Modelle hinsichtlich Planung, AVA und Kontrolle der Bauleistung erweitert. In dem 5D Modell kann eine Kollisionsprüfung sowie eine Massenermittlung, welche als Grundlage für die Ausschreibung dienen kann, durchgeführt werden. Weiters sind ERP (Enterprise Resource Planning) und ein Werkzeug für die e-Vergabe integriert. Für die Kostenermittlung können selbst definierte Kostenkontrolleneinheiten angelegt, oder Einheiten aus dem Leistungsverzeichnis übernommen werden.

Für die Erstellung des LVs sind automatische Mengenermittlungen aus dem 3D Modell möglich [95]. Als Positionstexte stehen neben den Standardpositionen auch eigene Texte aus bereits abgeschlossen oder laufenden Projekten zur Verfügung. Die Preise im LV können mit der Datenbank abgeglichen, und so eine projektübergreifende Vergleichbarkeit hergestellt werden.

**Anwendung im Tunnelbau** Für die Kalkulation im Tunnelbau werden, wie im Hochbau, die Geometrien aus dem BIM Modell herangezogen [75]. Diese dienen als Grundlage für das LV, indem Mengen, Massen und Materialien heraus gelesen werden können. Die gekrümmten Flächen einer Tunnelschale verursachen teilweise Probleme beim IFC Datenaustausch und werden deshalb polygonal angenähert. Daraus entstehen Abweichungen in der Massenermittlung.

**Open-BIM Tauglichkeit** Es können mehrere Personen, in zugeteilten Positionen, gleichzeitig an einem Projekt arbeiten, wodurch eine manuelle Datenweitergabe nicht mehr erforderlich ist [95]. Durch die Schnittstellen GAEB, GAEB-XML ist in iTWO eine digitale Vergabe möglich. Für eine Open-BIM Anwendbarkeit werden die Modelle in iTWO als IFC Datei mittels BIM Qualifier eingespielt [111]. Es kann für Autodesk Revit ein Erweiterungstool hinzugefügt werden,

um ein Modell als CPI Datei (Construction Process Integration) direkt in iTWO zu überspielen. Dabei handelt es sich aber um kein offenes Format. Die Daten, welche in der Phase der AVA benötigt werden können nach ÖNORM A 2063 ausgetauscht werden [92].

**Erweiterbarkeit** Die Software kann mit iTWO 5D erweitert werden, um ein Bauwerksmodell mit inkludierter Zeit- und Kostenplanung zu erhalten [95]. Eine Erweiterbarkeit hinsichtlich der Export Funktionen mittels offener Formate steht nicht zur Verfügung, da iTWO keine API Schnittstelle hat [43].

**Tab. 3.9:** Formate für den Datenaustausch in RIB iTWO (Quelle: [43])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.xls, .mpp, .dwg, .pdf,	.xls, .mpp, .dwg, .pdf,
Offene Formate	.ifc, .xml, .txt, .csv,	.ifc, .xml, .txt, .csv,

### 3.3 Koordination und Viewer

Für bereits erstellte BIM Modelle kommen anschließend Programme dieses Kapitels zum Einsatz. Dabei handelt es sich um Softwarelösungen, welche für die Koordination und Kommunikation in unterschiedlichen BIM Modellen geeignet sind. Bei der Fusionierung dieser kann es zu Abweichungen in den Daten kommen, weshalb in den folgenden Programmen auch Funktionen für eine Kollisionsprüfung integriert sind.

#### 3.3.1 Autodesk BIM 360

Bei BIM 360 handelt es sich um eine Cloud-Basierte Plattform vom Hersteller Autodesk [16]. Diese ist für das Baumanagement konzipiert, um den Informationsaustausch zwischen allen Projektbeteiligten zu ermöglichen. Daten werden auf dem Cloud Speicher in Echtzeit aktualisiert, damit jedem Projektbeteiligten die aktuellsten Informationen zur Verfügung stehen. Ein effizienterer Bauablauf sowie eine Fehlerminimierung soll damit erreicht werden. Dabei lässt sich die Softwareumgebung von BIM 360 in folgende Produkte unterteilen:

- BIM 360 Docs
- BIM 360 Build
- BIM 360 Design
- BIM 360 Coordinate
- BIM 360 Layout
- BIM 360 Plan
- BIM 360 Ops

Für die Analyse dieses Programms werden nur die Produkte BIM 360 Docs und BIM 360 Design herangezogen.

Bei BIM 360 Docs geht es um die Verwaltung jeglicher Baudokumente und Modelle. Die gesamten Projektinformationen sind zentral abgelegt und können von den Beteiligten, je nach definierten Berechtigungen, eingesehen und kommentiert werden. Eine dynamische Planung vom Entwurf

bis zur Fertigstellung kann damit realisiert werden. Ein Zugriff von mobilen Geräten aus ist ebenfalls möglich.

Mit BIM 360 Design ist für ein gemeinsames Arbeiten zwischen unterschiedlichen Firmen in den Programmen Revit, Civil 3D und Plant 3D eine Plattform vorhanden. Ein kontrollierter Informationsaustausch so wie eine Nachverfolgung der Änderungen ermöglicht mehreren Beteiligten ein Arbeiten im selben Modell. Ein manueller Datenabgleich sowie ein regelmäßiges Austauschen der aktuellsten Version der Planung inklusive Nacharbeiten kann dadurch entfallen.

**Anwendung im Tunnelbau** Eine konkrete Anwendung für den Tunnelbau konnte nicht gefunden werden. Jedoch sind die oben angeführten Funktionen auch für eine Tunnelplanung einsetzbar, weshalb eine Anwendung im Tunnelbau angenommen werden kann.

**Open-BIM Tauglichkeit** Die wesentlichen unterstützten Dateiformate für BIM 360 Docs sind in Tabelle 3.10 ersichtlich [17]. Nachdem die Plattform keine neuen Daten generiert, wird die Annahme getroffen, dass die Unterstützten Dateiformate für Import und Export funktionieren. Ein umfassender Datenaustausch zwischen gängigen Programmen sowie ein offener Datenaustausch mittels IFC Format ist dadurch gegeben. Die Planung in BIM 360 Design wird nur für ausgewählte Autodesk Programme unterstützt.

**Erweiterbarkeit** Über die verschiedenen API's von BIM 360 können Entwickler ihre eigenen Zusatzanwendungen in die Software integrieren [15]. Im Autodesk App Store stehen viele vorgefertigte Plug-ins zur Verfügung, jedoch nur für allgemeine Anwendungsgebiete. Weiters gibt es Erweiterungen für einzelne proprietäre Formate. Durch die offene Datenstruktur können eigens programmierte Anwendungen auf die Informationen zugreifen.

Die Thematik einer API Erweiterbarkeit bezüglich Exportmöglichkeiten ist hier nicht zu behandeln, da es sich hierbei um eine Software handelt die bestehende Dateien zentral speichert und keine neuen Daten produziert, welche für andere Programme ausgegeben werden sollen.

**Tab. 3.10:** Formate für den Datenaustausch in Autodesk BIM 360 (Quelle:[17])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.dwg, .dxx, .iges, .dgn, .3ds, .ipt, .iam, .pdf, .prt, .fbx, .rvt, .nwc, .rcp,	.dwg, .dxx, .iges, .dgn, .3ds, .ipt, .iam, .pdf, .prt, .fbx, .rvt, .nwc,
Offene Formate	.ifc, .dwf, .sat, .bmp, .stl, .3dm, .stp, .dae, .obj,	.ifc, .dwf, .sat, .bmp, .stl, .3dm, .stp, .dae, .obj,

### 3.3.2 Autodesk Navisworks

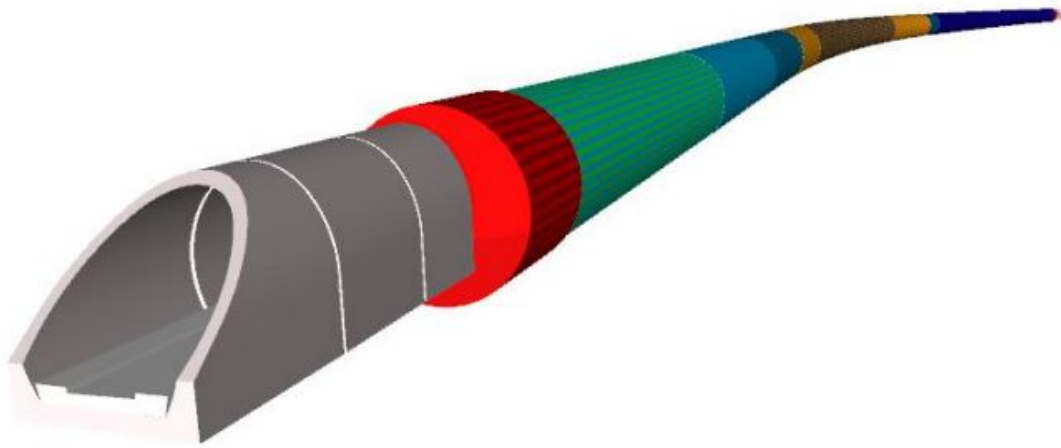
Navisworks ist ein Programm des Herstellers Autodesk und wird für die Koordination von BIM Modellen verwendet [26]. Dabei lässt sich die Software in zwei Versionen, Navisworks Simulate und Navisworks Manage differenzieren. Der wesentliche Unterschied liegt in der Funktion der Kollisionserkennung und Behebung, welche nur in Navisworks Manage vorhanden ist. Für die Programmanalyse wird daher nur Navisworks Manage in Betracht gezogen, da die Version mit einem reduzierten Funktionsumfang nicht die technische Entwicklung widerspiegelt.

Die Hauptanwendungen der Software sind Koordination, Modellüberprüfung, Quantifizierung

und Modellsimulation [26]. Bei der Koordination geht es vor allem um die Kollisionserkennung. Dabei werden die Pläne der verschiedenen Fachplaner in einem 3D Modell zusammengefasst und Probleme automatisch aufgezeigt. Ebenfalls werden Probleme hinsichtlich der Realisierbarkeit eines Bauwerks erkannt. Dafür kann eine Simulation des Bauablaufs erstellt werden, welche logistische Themen wie beispielsweise Materiallieferungen berücksichtigt. Es können 5D Modelle erstellt werden, welche Zeit- und Kostenplanung beinhalten.

Für eine Massenermittlung direkt aus dem Modell stehen Funktionen zum Messen von Längen, Flächen und Volumina, sowie eine Zählung von Stückzahlen zur Verfügung. Dies kann sowohl in 3D Modellen als auch in 2D Plänen angewendet werden.

**Anwendung im Tunnelbau** Eine Darstellung und Kollisionsprüfung der 3D Modelle kann auch im Tunnelbau angewendet werden [110]. Die Analyse von Konflikten in diesem Programm funktioniert bauwerksunabhängig. Da die Erstellung selbiger in anderen Programmen durchgeführt werden, sind keine tunnelbauspezifischen Planungswerkzeuge von Nöten.



**Abb. 3.3:** Darstellung eines 3D Tunnelmodells in Navisworks Manage (Quelle: [110])

**Open-BIM Tauglichkeit** Für das einspielen der Planungsdaten ist Navisworks mit den CAD-Formaten aus Tabelle 3.11 kompatibel [28]. Mit dem IFC Dateireader können auch ganze Modelle eingespielt werden. Eine weitere Funktion ist das Einspielen von Laserscans.

**Erweiterbarkeit** Falls der Import einer CAD Datei nicht fehlerfrei funktioniert, stehen für die CAD Programme AutoCAD, MicroStation, Revit und ArchiCAD Erweiterungsmodule zur Verfügung, um die Dateien direkt ins Navisworks Format zu exportieren [25]. In Navisworks können über die API Erweiterungen aus dem Autodesk App Store hinzugefügt werden [27]. Dabei stehen jedoch keine Tunnelbau spezifischen Funktionen zur Verfügung. Seitens der Exportfunktionen existieren diverse Aufsätze, unter anderem auch für zusätzliche IFC Versionen. Über die API können auch Funktionen von Navisworks in andere Programme integriert werden.

### 3.3.3 Datacomp BIM Vision

BIM Vision vom Hersteller Datacomp ist ein BIM-Viewer, mit welchem CAD Modelle von anderen Anbietern im Ansichtsmodus geöffnet werden können [36]. Dazu muss die Datei in einem

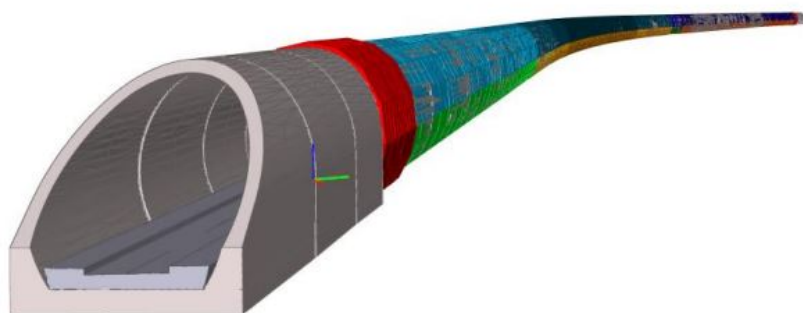
**Tab. 3.11:** Formate für den Datenaustausch in Autodesk Navisworks (Quelle:[28])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.dwg, .iges, .dgn, .3ds, .ipt, .iam, .prt, .fbx, .nwc, .rcs, .pts, .ptx, .rcp,	.dwg, .iges, .dgn, .3ds, .ipt, .iam, .prt, .fbx, .nwc,
Offene Formate	.ifc, .dwf, .sat, .stl, .3dm, .stp, .obj, .asc, .txt,	.ifc, .dwf, .sat, .stl, .3dm, .stp, .obj,

IFC Format vorliegen. Für die Durchsicht können die Modelle nach Stockwerken aufgeteilt oder als Draufsicht in 2D dargestellt werden. Weiters kann man einzeln ausgewählte Elemente ein- und ausblenden.

Ein Bauwerk wird meist von diversen Fachplanern geplant und diese arbeiten dabei an unterschiedlichen Modellen [36]. Falls diese einzelnen Modelle im IFC Format vorliegen, so können sie mit Hilfe von BIM Vision in ein einzelnes zusammengefügt werden. Dabei können die Modelle aber nur visuell übereinander gelegt werden. Für eine dauerhafte Integration wird das Erweiterungsmodul BIMvision IFC Merge-Plugin benötigt. Eine falsche Position der einzelnen Modelle zueinander kann mittels Synchronisation der Koordinaten bereinigt werden. Unterschiede im Modell zwei gleicher Elemente werden automatisch erkannt. Eine weitere Funktion ist das Zählen von Elementen so wie die Messung von Längen, Flächen und Volumen, wodurch eine automatische Massenermittlung durchgeführt werden kann.

**Anwendung im Tunnelbau** Die Ansicht eines CAD Modells ist unabhängig vom dargestellten Inhalt. Da die Erstellung des 3D Modells in anderen Programmen durchgeführt wird, sind keine tunnelbauspezifischen Funktionen von Nöten [110]. Ein Einsatz im Zuge eines Tunnelprojekts ist möglich [36]. Viele Plugins und Objektparameter sind aber für Gebäudes des Hochbaus ausgelegt und können bei der Parametrisierung im Tunnelbau nicht verwendet werden.

**Abb. 3.4:** Darstellung eines 3D Tunnelmodells in BIM Vision (Quelle: [110])

**Open-BIM Tauglichkeit** Der Hersteller Datacomp ist Mitglied beim Verband buildingSMART, welcher an der Umsetzung und Weiterentwicklung für Open-BIM arbeitet [36]. Die Modelle können in den offenen IFC Formaten 2×3 und 4.0 eingespielt werden. Da BIM Vision ohne Plugins nur als Viewer genutzt werden kann, sind Exportformate nur im Zusammenhang mit



Erweiterungen relevant. Die Datenspeicherung im proprietären BVF Format ermöglicht ein Zwischenspeichern des Projekts inklusive Anmerkungen.

**Erweiterbarkeit** Das Programm ist durch eine ganze Palette an Plugins erweiterbar [36]. Sowohl die Funktionen innerhalb von BIM Vision als auch die Kompatibilität können über eine API gesteigert werden. Hinsichtlich der Funktionen können Berichtsfunktionen, Kollisionsprüfungen, Kommentarfunktionen und viele weitere hinzugefügt werden. Auf Seiten der Export Funktionen können die Dateiformate BCF, STL, GLTF und IFC sowie Cloude Arbeitsbereiche genutzt werden. Über die API kann man die Software auch in andere Programme integrieren.

**Tab. 3.12:** Formate für den Datenaustausch in Datacomp BIM Vision (Quelle:[36])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.bvf,	.bvf,
Offene Formate	.ifc,	

### 3.3.4 Kubus BIMcollab Cloude

Der Softwareanbieter Kubus, welcher auf BIM Planung spezialisiert ist, hat BIMcollab Cloude entwickelt [35]. Dabei handelt es sich um eine Koordinierungssoftware, die unterschiedliche Planungsdateien diverser Fachplaner zusammenfügt und anschließend auf mögliche Fehler aufmerksam macht. Zu beachtende Punkte, Änderungen, Kollisionen, Markierungen beziehungsweise Kommentare werden in Form von Themen (engl. Issues) eingearbeitet. Die in BIMcollab Cloude angelegten Informationen sind zentral in einer Cloude gespeichert und können von allen Projektbeteiligten verwendet werden. Die jeweiligen BIM Modell Dateien müssen separat ausgetauscht werden [94]. Es werden nur Themen in BIMcollab Cloude ausgetauscht, welche sich zwar in einem 3D Modell befinden, aber das 3D Modell selbst nicht übermittelt wird. Diese Informationen befinden sich im BCF Format. Um die aktuelle BCF Datei auf dem neuesten Stand zu halten, kann mit dem BCF Manager eine Kommunikation zwischen dem 3D Modell der jeweiligen Modellierungssoftware und BIMcollab Cloude hergestellt werden.

Durch das Erstellen von verschiedenen Gruppen, das Vergeben benutzerdefinierter Berechtigungen und das Nachvollziehen von Änderungen ist ein kollaboratives Arbeiten möglich [35]. Weiters sind diverse Berichtsfunktionen implementiert. Neben dem Einarbeiten von konstruktiven Planungsthemen können auch Termine verwaltet und eine Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten darüber geführt werden.

**Anwendung im Tunnelbau** Diese Software ist für den Informationsaustausch innerhalb bereits erstellter 3D Modelle entwickelt worden. Die Art des Bauwerks hat hierbei keine Auswirkung, weshalb eine Anwendung im Tunnelbau möglich ist.

**Open-BIM Tauglichkeit** Der offenen Datenaustausch, hinsichtlich Open BIM, erfolgt hierbei über die Cloude [35]. Die Kompatibilität mit anderen gängigen BIM Programmen, siehe Abb. 3.5, ermöglicht eine Interaktion zwischen herstellerfremden Programmen, was ein Arbeiten im Sinne des BIM Gedanken erlaubt. Durch die Integration von Autodesk BIM 360 und Trimble Connect können Anwender über die BIMcollab Anwendung, auf Modelle in Autodesk BIM 360 oder Trimble Connect mit Hilfe des Webbrowsers zugreifen, ohne die genannten Programme zu besitzen. Durch das BCF Format werden die Informationen auf IFC Basis ausgetauscht, aber das Modell selbst wird nicht übertragen [94]. Das IFC Modell selbst kann auch nicht hochgeladen

werden. Themen können auch manuell in den Formaten BCF-, BCFZIP- oder CSV-Dateien eingegeben werden.

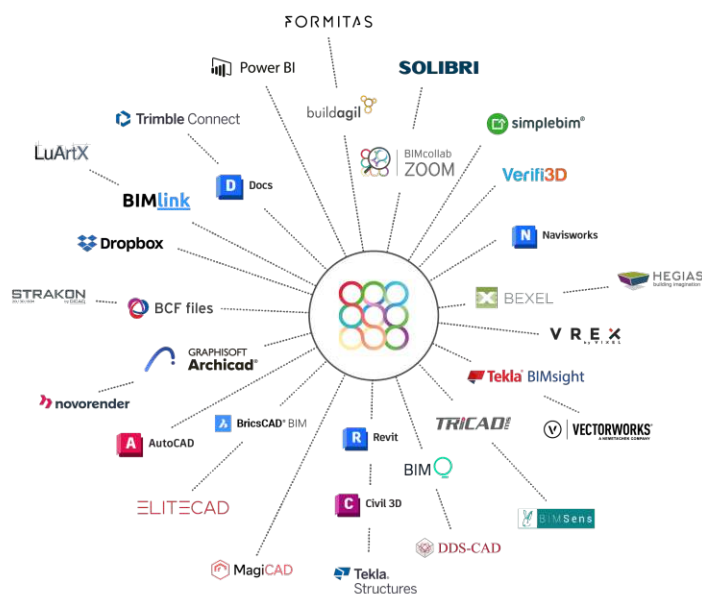


Abb. 3.5: Mit BIMcollab kompatible Programme (Quelle: [35])

**Erweiterbarkeit** Eine Erweiterbarkeit ist mit dem Zusatz des BCF Managers möglich, jedoch nicht um zusätzliche Import- oder Exportfunktionen zu implementieren [94]. Für gewisse Programme stehen direkte Verbindungen zu BIMcollab über die BCF-API zur Verfügung.

Tab. 3.13: Formate für den Datenaustausch in Kubus BIMcollab Cloude (Quelle:[94])

	Import	Export
Proprietäre Formate		.pdf, .xls,
Offene Formate	.bcf,	.bcf,

### 3.3.5 Kubus BIMcollab Zoom

Kubus, spezialisiert auf Software für die BIM Planung, ist der Hersteller von BIMcollab Zoom [34]. Dabei handelt es sich um eine Validierungssoftware und einen IFC-Viewer für BIM Modelle. Hierbei können geometrische und teilweise finanzielle Probleme ermittelt werden [74]. Der Bauablauf wird hinsichtlich Termine nicht überprüft. Bereits erstellte 3D Modelle können damit angesehen, auf Kollisionen überprüft und ausgewertet werden [34]. Über eine integrierte Berichtsfunktion können benötigte Informationen aus dem Modell ausgegeben werden. Sämtliche BIM Informationen können Beschriftet, kommentiert und mit Eigenschaftenstempel hinzugefügt werden. Des Weiteren können damit auch 3D Modelle mit Parametern versehen werden, um daraus ein BIM Modell zu erstellen. Die Kollisionsprüfung erfolgt anhand individuell erstellter Regeln, die anschließend für Mitarbeiter als standardisierte Regeln zur Verfügung stehen.

**Anwendung im Tunnelbau** Diese Software ist für die Datenvalidierung innerhalb bereits erstellter 3D Modelle entwickelt worden. Die Art des Bauwerks hat hierbei keine Auswirkung, weshalb eine Anwendung im Tunnelbau möglich ist.

**Open-BIM Tauglichkeit** Die Datenfreigabe erfolgt über eine Listenfunktion, welche über das hauseigene Programm BIMcollab Cloud mit den Projektbeteiligten kommuniziert werden kann [34]. Weiters können diese Daten auch im CSV- und Excel Format ausgegeben werden. Das Programm selbst arbeitet mit der Version 2.1 des BCF Formats [71].

**Erweiterbarkeit** Eine Erweiterbarkeit ist mit der hauseigenen Software BIMcollab Cloud möglich, um die erkannten Kollisionen mit dem Projektteam zu teilen und weiteren Informationsaustausch darüber zu führen [94]. Die Frage nach der Open-BIM Erweiterbarkeit wird hiermit nicht beantwortet, da zusätzliche Import- oder Exportfunktionen nur über ein herstellerabhängiges Programm zur Verfügung stehen. Die Open-BIM Tauglichkeit der Erweiterungssoftware wird im programmspezifischen Absatz analysiert.

**Tab. 3.14:** Formate für den Datenaustausch in Kubus BIMcollab Zoom (Quelle:[33])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.pts, .bcp,	.pts, .xls, .bcp,
Offene Formate	.ifc,	.ifc, .csv,

### 3.3.6 Nemetschek Solibri

Nemetschek hat Solibri entwickelt, um eine digitale Koordinierung auf der Baustelle zwischen unterschiedlichen Gewerken zu ermöglichen [108]. Die Anwendung führt verschiedene Planungsmodelle in eines zusammen, um etwaige Probleme frühzeitig zu erkennen. Sowohl in der Planungs- und Bauphase, als auch im Betrieb des Bauwerks soll eine Zeit und Kostenersparnis damit ermöglicht werden. Das Programm besteht aus drei Teilen:

- Solibir Anywhere
- Solibir Site
- Solibir Office

Solibri Anywhere ist für die Projektbeteiligten vorgesehen, welche die Informationen lediglich erhalten müssen, jedoch keine eigene Bearbeitung im Modell durchführen. Solibri Site ist für die Personen gedacht, welche auf der Baustelle die Projektdaten überwiegend abrufen und die Kommunikation mit den Kollegen im Büro über die Kommentarfunktion herstellen. Solibri Office ist die Vollversion des Programms und ermöglicht das Zusammenführen verschiedener Modelle und eine automatische Erkennung von Kollisionen. Für die Analyse des Programms wird nur die Vollversion, also Solibri Office, herangezogen, da die Versionen mit einem reduzierten Funktionsumfang nicht die technische Entwicklung widerspiegeln.

**Anwendung im Tunnelbau** Im Tunnelbau kann die Software genau so zum Einsatz kommen wie im Hochbau, da die Analyse von Konflikten bauwerksunabhängig funktioniert [51]. Da in diesem Programm die Modelle nur übereinander gelegt werden und eine Erstellung selbiger in anderen Programmen durchgeführt wird, werden keine tunnelbauspezifischen Planungswerkzeuge benötigt. Neben der Funktion des ModellCheckers kann Solibri auch eine Massenermittlung ausgeben, um Kalkulationen zu überprüfen [41].

**Open-BIM Tauglichkeit** Die verschiedenen Modelle können im IFC Format importiert werden [3]. Das BCF (BIM Collaboration Format) wurde unter anderem von Solibri entwickelt, um die Kommunikation zwischen verschiedenen BIM Modellen, in einem offenen Format, austauschen zu können. Auch ein Datenaustausch ist damit möglich, um Änderungen in einem Modell auf alle anderen zu übertragen. Die detektierten Kollisionen können entweder in einem 2D Bericht, als Word, Excel oder PDF Datei, oder als BCF Format exportiert werden.

**Erweiterbarkeit** Die Erweiterbarkeit dieses Programms mittels API ist nur dafür vorgesehen, um Testmethoden, beziehungsweise Regeln für die Kollisionsprüfung zu ergänzen [101]. Die Dokumenten API ermöglicht einen Zugriff auf Daten von Cloud Speichern. Für den Export der Daten ist keine Erweiterbarkeit möglich und es bleibt ein gewisser Blackbox Charakter vorhanden. ArchiCAD kann über die API direkt mit Solibri kommunizieren [107].

**Tab. 3.15:** Formate für den Datenaustausch in Nemetschek Solibri (Quelle:[107])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.smc, .dwg, .pdf, .xls,	.smc,
Offene Formate	.ifc,	.bcf,

## 3.4 Geologie und Geotechnik

In dieser Kategorie finden sich Programme mit denen der Baugrund technisch erfasst wird. Darunter gibt es Softwarelösungen die den anstehenden Baugrund als dreidimensionales Modell wiedergeben, oder die eine Berechnung von typischen Versagensmechanismen der Geotechnik ermöglichen.

### 3.4.1 Geoconsult TUGIS

TUGIS ist ein Programm des Unternehmens Geoconsult und ermöglicht die digitale Erfassung des Baugrunds [90]. Geologische, geotechnische und hydrologische Informationen können damit dokumentiert werden. Das Programm TUGIS.NET Suite besteht aus fünf Teilen:

- TUGIS.MANAGE
- TUGIS.DRAW
- TUGIS.IMAGE
- TUGIS.SECTION
- TUGIS.VIEWER

Diese stellen eine breite Palette an Funktionen zur Verfügung und greifen ineinander [73]. Die Speicherung der Daten erfolgt in einer Cloud, wodurch ein Zugriff von unterschiedlichen Geräten möglich ist. Ebenfalls ist eine Bearbeitung durch mehrere Benutzer möglich.

**Anwendung im Tunnelbau** TUGIS wurde für die geologische Dokumentation eines Tunnelbauprojekts entwickelt und ist demnach auf Tunnelbau spezialisiert [73]. Funktionen wie die automatische Erstellung des geologischen Berichts und 3D Profile aus fotogrammetrischen Aufnahmen von der Ortsbrust sind integriert.

**Open-BIM Tauglichkeit** Die Daten können in den Formaten laut Tabelle 3.16 in die Cloud exportiert werden [73]. Sich noch in Entwicklung befindliche IFC-Objekte werden durch Platzhalter, sogenannte IFC-Proxys, berücksichtigt. Die Geometrie des Ausbruchprofils kann in gängigen CAD Programmen erstellt werden und mittels DXF Datei oder XML-Datei importiert werden. Für die graphische Variante muss die Tunnelachse immer als Polylinie, welche die Koordinaten verbindet, eingespielt werden. Wenn nur die Koordinaten vorliegen muss in anderen Programmen eine Achse erstellt und diese danach importiert werden. Ein bereits bestehendes 3D Modell oder ein gesamtes Baugrundmodell kann über die unterstützten Formate geladen werden. Durch den Einsatz von IFC4 kann TUGIS 3D Modelle mit zusätzlichen Attributen austauschen und ist daher für Open-BIM sehr gut geeignet [90]. Geologische Befunde können aufgrund fehlender Standards noch nicht problemlos integriert werden.

**Erweiterbarkeit** Die Erweiterbarkeit dieses Programms konnte nicht festgestellt werden, weshalb davon ausgegangen werden muss, dass keine Möglichkeit der Erweiterbarkeit mittels API besteht.

**Tab. 3.16:** Formate für den Datenaustausch in Geoconsult TUGIS (Quelle:[73])

	Import	Export
Proprietäre Formate		.shp,
Offene Formate	.ifc, .dxf, .xml, .obj, .asc	. ifc, .dxf, .png,

### 3.4.2 Geodata Eupalinos

Eupalinos ist eine Software für ein 3D Tunnel Monitoring, für eine Überwachung von Verformungen des anstehenden Gebirges und für Vermessungsaufgaben [57]. Dabei handelt es sich um ein Programm von Geodata. Dies ist ein spezialisiertes Unternehmen im Bereich Mess- und Prüftechnik im Ingenieurwesen.

**Anwendung im Tunnelbau** Die Software ist auf den Infrastrukturbau, aber vor allem den Tunnelbau spezialisiert [57]. Eine Kontrolle des Ausbruchprofils, Dokumentation von Verformungen sowie die Wiedergabe von Absteckdaten ist damit möglich. Eine begleitende Protokollierung aller Kontrollmessungen während des Vortriebs und gleichzeitige Erfassung der geotechnischen Verhältnisse sind die Hauptanwendungsgebiete. Zur Steuerung einer Totalstation für ein 3D Monitoring kann das Programm ebenfalls herangezogen werden. Die erhaltenen Ergebnisse kann man numerisch oder visuell darstellen.

**Open-BIM Tauglichkeit** Für den Datenaustausch steht proprietäre ASCII Schnittstellen zur Verfügung [57]. Weiters können Daten im WMF- oder PDF Format exportiert werden. Die geotechnischen Daten beziehungsweise Vermessungsdaten können auch auf einem externen Server gespeichert, und von dort aus mit Eupalinos ausgewertet werden [86]. Offene Formate wie IFC werden für eine Datenweitergabe im Sinne des BIM Gedanken nicht unterstützt [39].

**Erweiterbarkeit** Eine Erweiterbarkeit über eine API Schnittstelle ist nicht möglich [39].

### 3.4.3 Geodata Kronos

Kronos ist eine Datenintegrationsplattform für den Tunnelbau und wurde von Geodata entwickelt [58]. Diese sind ein spezialisiertes Unternehmen im Bereich Mess- und Prüftechnik im

**Tab. 3.17:** Formate für den Datenaustausch in Geodata Eupalinos (Quelle:[39], [57])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.dwg,	.dwg,
Offene Formate	.dxf, .ags,	.dxf, .ags,

Ingenieurwesen. Es werden Daten zu Vortriebszuständen, Maschinendaten einer Tunnelbohrmaschine, Geologie, Hydrogeologie und Geophysik, aber auch Pläne, Dokumente, Gebäudedaten und Baufortschritt des Gebäudes gesammelt [38]. Weiters werden Messdaten von Neigungsmesser, Bohrlochinklinometer, Extensometer, Nivellementpunkte und Werte von Messprismen automatisch oder manuell erfasst. Diese Software kann wegen der umfassenden Funktionen in Bezug auf Datenverwaltung und Archivierung für die Projektsteuerung verwendet werden [58]. Die Daten werden dabei auf einem zentralen Server abgelegt und können je nach benutzerdefinierten Berechtigungen von unterschiedlichen Projektbeteiligten eingesehen beziehungsweise verändert werden.

**Anwendung im Tunnelbau** Speziell für große Infrastrukturbauwerke, vor allem Tunnelbauwerke, wird Kronos als Datenbanksystem eingesetzt, um die großen Datenmengen des Projekts zu verwalten [86]. Weiters können die Daten mit einer graphischen Benutzeroberfläche visualisiert werden [58]. Wenn es sich dabei um Monitoring Daten handelt, können in der Software Grenzwerte definiert werden und dessen Überschreitung einen Alarm oder eine Benachrichtigung auslösen.

**Open-BIM Tauglichkeit** Der Import und Export von Daten wird über das KRONOS Collect-Format realisiert [58]. Eine Schnittstelle zu den Messgeräten, welche die Software Hermes verwenden, ist ebenfalls implementiert. Die weiteren Datenformate, welche verarbeitet werden können sind in Tabelle 3.18 ersichtlich. Die Kommunikation der Software selbst mit der Datenbank funktioniert über eine SQL-Schnittstelle. Für eine Datenweitergabe im Sinne des BIM Gedanken konnte nichts ermittelt werden.

**Erweiterbarkeit** Eine Erweiterbarkeit über eine API Schnittstelle ist für die Web-Version in Entwicklung aber gegenwärtig noch nicht möglich [39].

**Tab. 3.18:** Formate für den Datenaustausch in Geodata Kronos (Quelle:[39])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.dwg, .xls,	.dwg, .xls,
Offene Formate	.dxf, .ags, .csv,	.dxf, .ags, .csv,

### 3.4.4 Itasca Consulting Group FLAC/UDEC/3DEC

Die drei Programme, FLAC, UDEC und 3DEC sind von der Itasca Consulting Group hergestellt worden [64]. Dieses Unternehmen ist auf Geomechanik, Hydrogeologie und Mikroseismizität sowie das Bewerten des Verhaltens von Felsen spezialisiert. Die in diesem Abschnitt betrachteten Programme sind alle auf geomechanische Themen ausgelegt, welche mit der Finiten Elemente Methode analysiert werden. Dateneingaben erfolgen über einen programmierten Code, welcher das Modell definiert. Eine graphische Eingabe ist nicht möglich.

FLAC besteht aus drei Teilen, FLAC 3D, FLAC 2D und FLAC/Slope, aber für die Programmanalyse wird die Summe über die Funktionen der drei Programme betrachtet [64]. Dieses

Programm ermöglicht eine kontinuumsmechanische Betrachtung von Hängen oder Tunneln aber auch Betonbauteilen.

UDEC, der Universal Distinct Element Code, ist ein zweidimensionales Programm, welches den Einfluss von statischen oder dynamischen Lasten auf diverse Medien mit einer Struktur, bestehend aus mehreren Schnittflächen, betrachtet [64]. Dabei werden die Schnittflächen als Randbedingungen und die Blöcke als starr oder verformbar definiert. So können auch nichtlineare Beziehungen analysiert werden.

3DEC ist die dreidimensionale Version von UDEC und ist ebenfalls für die Verhaltensanalyse von diskontinuierlichen Materialien unter statischen oder dynamischen Lasten geeignet [64].

**Anwendung im Tunnelbau** FLAC ist für die Modellierung von unterirdischen Aushüben geeignet [64]. Für Tunnelportale kann man die Stabilität der Hänge analysieren. Mit UDEC kann ein Tunnelquerschnitt eingegeben und damit das Verhalten des geklüfteten Felsens bei den Vortriebsarbeiten betrachtet werden. Die erhaltenen Ergebnisse können beispielsweise Verschiebungswerte der einzelnen Blöcke sein. In 3DEC kann der Ausbruchsquerschnitt dreidimensional modelliert werden. Weiters besteht die Option der Modellierung von Stützmittel, wie beispielsweise Felsanker, deren Kräfte damit ermittelt werden können.

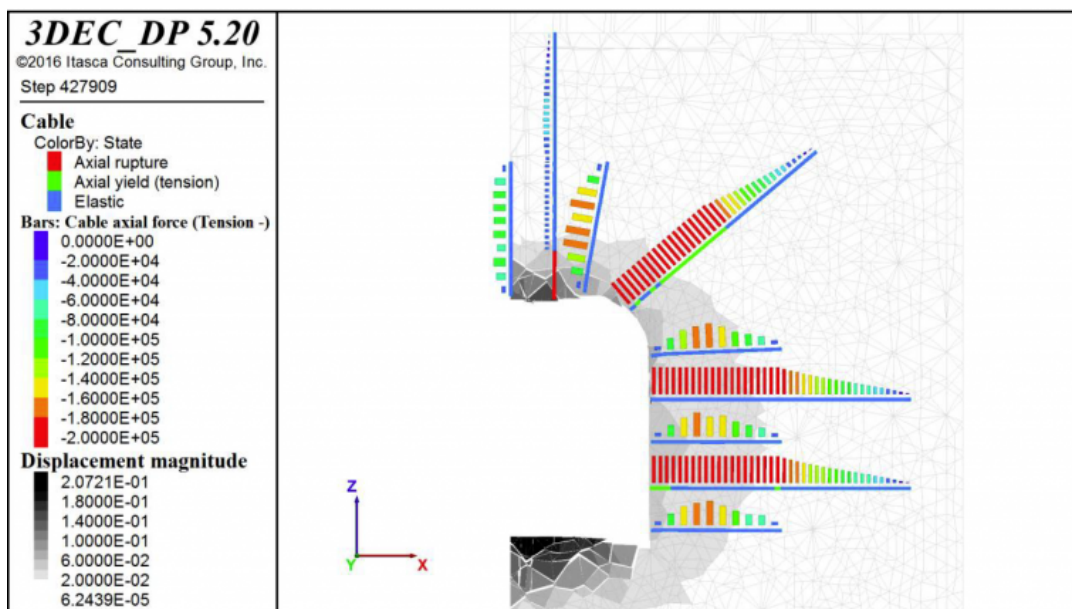


Abb. 3.6: Ein Tunnelprofil in 3DEC modelliert mit der Ausgabe der Ankerkräfte. (Quelle: [64])

**Open-BIM Tauglichkeit** FLAC, UDEC und 3DEC kann das Modell nur als Bild ausgeben und dementsprechend keine Datenweitergabe im Sinne von Open-BIM durchführen [64]. Da das Modell jedoch nur aus einem Programmcode besteht ist ohne diese nicht von einem BIM tauglichen Modell auszugehen.

**Erweiterbarkeit** Es gibt eine API um das programmieren mit Python zu verknüpfen, jedoch hinsichtlich BIM Erweiterungen konnte nichts gefunden werden [63].

### 3.4.5 RIB RTwalls

RTwalls ist ein Bemessungsprogramm für den Bereich Grundbau, im speziellen für die Berechnung von Verbauwänden [96]. Damit können Spundwände, Trägerbohlenwände, aufgelöste und überschnittene Bohrpfehlwände und Schlitzwände bemessen werden. Durch das setzen von Ankern kann man neben Kragarmen auch Einfeld- und Durchlaufträger als statisches Modell berücksichtigen. Die Arbeitsoberfläche umfasst dabei einen tabellarischen und einen zweidimensionalen grafischen Bereich für die Dateneingabe und Modellübersicht. Weiters können unterschiedliche Situationen zum Beispiel verschiedene Bauzustände und Lastfälle eingegeben werden. Den Baugrund kann man mit unterschiedlichen Schichten realitätsnah modellieren.

**Anwendung im Tunnelbau** Eine konkrete Anwendung im Tunnelbau konnte nicht gefunden werden, jedoch sind im Zuge eines Tunnelbauwerks oftmals auch Verbauwände im Portalbereich von Nöten. Weiters kann eine Bemessung der Verbauwände für einen Tunnel in offener Bauweise genutzt werden.

**Open-BIM Tauglichkeit** Ein Austausch von digitalen Modellen, und somit eine BIM Anwendung, kann nicht durchgeführt werden [96]. Die Exportformate für die Ergebnisse sind PDF, DOCX, RTF und XPS.

**Erweiterbarkeit** Eine Erweiterung mittels API für die Datenausgabe ist nicht vorhanden.

### 3.4.6 Rocscience RS2

Der Hersteller Rocscience hat mit RS2 ein Programm für die Finite-Elemente Analyse im Bereich der Geotechnik auf den Markt gebracht [97]. Die Software ist dabei auf 2D Modelle beschränkt, jedoch gibt es auch das Programm RS3 indem 3D Aufgabenstellungen bearbeitet werden können. Für die Analyse wird der Fokus jedoch nur auf RS2 gerichtet. Spannungen, Verformungen und Stabilität können dabei für Bodenaushübe und Tunnelausbrüche nachgewiesen werden. Die Wirkung von Stützmitteln und Stützkonstruktionen kann man im Modell mitberücksichtigen. In Bereichen wo Grundwasser auftritt, kann eine Grundwasserversickerungsanalyse durchgeführt werden. Bei den Tunnelportalen wird die Hangstabilität anhand der Scherfestigkeit des Bodens beurteilt, wobei die Software den Festigkeitsreduktionsfaktor ausgibt.

**Anwendung im Tunnelbau** Für den Tunnelbau sind zusätzliche Module integriert [97]. Eine Spannungs- und Verformungsberechnung kann für die Berechnung der Tunnelschale durchgeführt werden. Dabei sind die Materialkennwerte des anstehenden Bodens und des Ausbaumaterials des Tunnels zu definieren. Durch die achsensymmetrische Analyse können kreissymmetrische Querschnitte zweidimensional eingegeben werden, wohingegen die Ergebnisse auf den dreidimensionalen Raum umlegbar sind. Eine geotechnische Beurteilung kann auch bei halbseitigen Tunneln an der Oberfläche durchgeführt werden, wobei es sich hier eher um einen Kragarm aus dem Fels heraus handelt [48].

**Open-BIM Tauglichkeit** Die Daten können über das DXF Format als geometrisches Modell, als Bild, oder als ein Format für das herstellereigene Programm Slide 2 exportiert werden [97]. Der Import von Projektdaten kann über das DXF Format und mittels Koordinaten erfolgen. Weiters besteht eine Schnittstelle zu den herstellereigenen Programmen Slide 2, Examine 2D und zu anderen RS2 Modellen. Von einem BIM Modell kann im zweidimensionalen Raum nicht wirklich gesprochen werden.



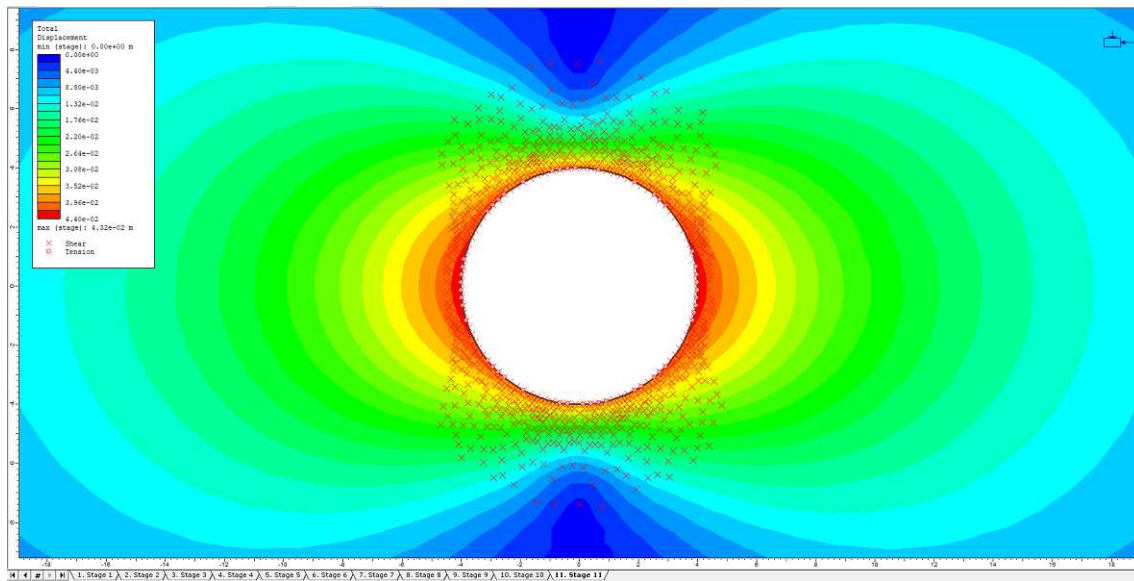


Abb. 3.7: Spannungsanalyse einer Tunnelschale in RS2. (Quelle: [97])

**Erweiterbarkeit** Eine Erweiterbarkeit hinsichtlich der Export Funktionen mittels offener Formate über eine API konnte nicht ermittelt werden.

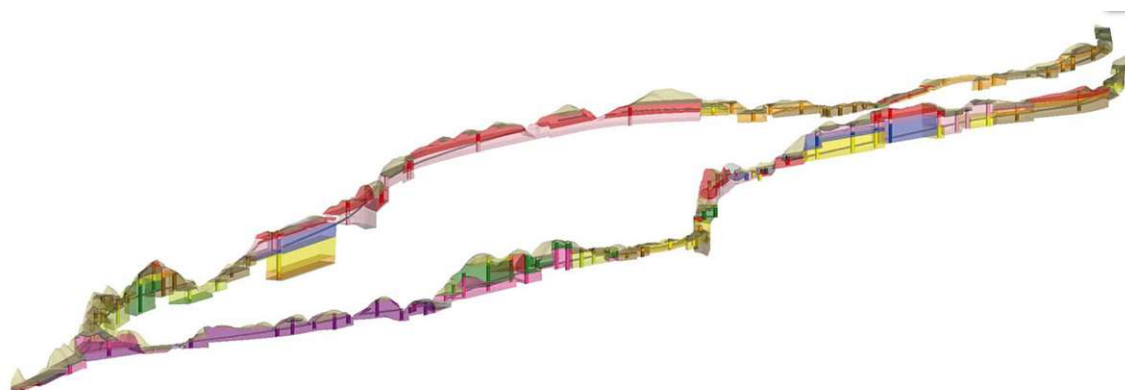
Tab. 3.19: Formate für den Datenaustausch in Rocscience RS2 (Quelle:[98])

	Import	Export
Proprietäre Formate	sli, .slim, .slmd, .exa, .fea, .bmp, .jpg,	sli, .slim, .slmd, .bmp, .jpg,
Offene Formate	.dxf,	.dxf,

### 3.4.7 Sequent Leapfrog Works

Die Software Leapfrog Works, vom Hersteller Sequent, ist auf eine dreidimensionale Modellierung von geologischen Situationen ausgelegt [104]. Bei den vorgesehenen Anwendungsgebieten handelt es sich um Tiefbau- und Umweltprojekte. Eingabedaten, beispielsweise gewonnen aus Bohrlochanalysen, werden in einem räumlichen Modell erfasst und laufend aktualisiert. Für die Überführung der punktuellen Bohrlochdaten in ein 3D Modell stehen unterschiedliche Interpolationsmöglichkeiten zur Verfügung. In das Modell können auch zusätzliche Informationen, wie Bereiche mit erhöhten Schadstoffgehalt, eingearbeitet werden. Die Modelle kann man sowohl in axonometrischer Ansicht als auch über assoziative Schnitte visualisieren.

**Anwendung im Tunnelbau** Neben Erdbau- und Brückenprojekten können auch Tunnelprojekte mit Leapfrog Works bearbeitet werden [104]. Für grobe Entwürfe kann man Achsen importieren, entlang dieser Aushubvolumen abschätzen und einen Längenschnitt erstellen. Vor allem eignet sich Leapfrog Works um die geologischen Verhältnisse, welche die geplante Tunneltrasse durchläuft, zu veranschaulichen [68]. Dies liefert eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für die Trassenauswahl. Speziell für Modelle mit großen Längsausdehnungen und komplexen geologischen Verhältnissen, was häufig im Tunnelbau der Fall ist, eignet sich Leapfrog Works [118].



**Abb. 3.8:** Baugrundmodell entlang der Tunneltrassen in Leapfrog Works (Quelle: [118])

**Open-BIM Tauglichkeit** Für ein kollaboratives Arbeiten zwischen Geologen und Planern werden von Leapfrog Works gängige Datenformate von Bodenaufschlüssen unterstützt [104]. Weiters können auch BIM Arbeitsabläufe und Grundwasserverhältnisse ins Modell eingearbeitet werden. Die Modelle können unter anderem über in Tabelle 3.20 ersichtliche Formate als BIM- oder CAD Daten geteilt werden. Eine native Softwareumgebung von Bentley ermöglicht ein interoperables Arbeiten über eine zentrale Datenumgebung als Cloud Lösung. Die Open-BIM Tauglichkeit wird durch die IFC-Kompatibilität gesteigert.

**Erweiterbarkeit** Für Präsentationen oder Berichte stehen Erweiterungsprogramme zur Verfügung, mit welchen man Bilder und Filme erstellen kann [104]. Auf geotechnischer Ebene können die Modelle über unterschiedliche Zusatzprogramme beispielsweise hinsichtlich Grundwasserverhältnisse erweitert werden. Eine zusätzliche Erweiterung bietet die Integration von geophysikalischen Messwerten, um das Modell mit seismischen Radardaten abzugleichen. Eine Erweiterbarkeit des Programms selbst mit Plug-Ins hinsichtlich Zusatzfunktionen oder Export-Möglichkeiten konnte nicht ermittelt werden.

**Tab. 3.20:** Formate für den Datenaustausch in Seequent Leapfrog Works (Quelle:[105])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.dwg, .dgn, .shp,	.dwg, .dgn, .pdf, .shp,
Offene Formate	.dxf, .bmp, .obj, .xml, .asc, .txt, .csv, .png, .ags	.dxf, .ifc, .obj, .asc, .csv, .png,

## 3.5 Programmiererweiterungen

Unter diese Kategorie fallen Programme, die entweder nur als Erweiterungen für eine andere Software vorgesehen sind, oder übergeordnet als solche verwendet werden. Das Anwendungsfeld der hinzugefügten Werkzeuge umfasst sowohl allgemeine, aber auch tunnelbauspezifische Funktionen.

### 3.5.1 Autodesk Dynamo

Dynamo des Herstellers Autodesk ist eine hauseigene Erweiterungssoftware für Revit [93]. Es erhält den Zugriff auf Daten und kommuniziert über die API von Revit. Die Bedienung erfolgt

mittels visueller Programmierung, der Erstellung eines Dynamo-Skripts, und es müssen keine Codes programmiert werden. Obwohl mit Dynamo auch andere Programme erweitert werden können, ist es für Revit spezialisiert.

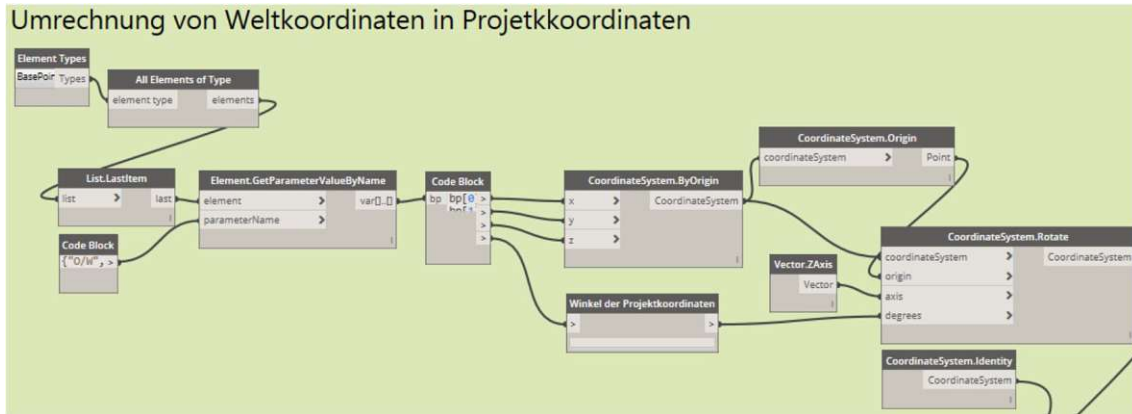


Abb. 3.9: Beispiel eines visuell programmierten Dynamo Skripts (Quelle: [110])

Revit erstellt für jedes Projekt eine Datenbank, jedoch ist die Gesamtheit aller Informationen nicht immer frei zugänglich [93]. Um diese Informationen zu erhalten stellt Revit eine API zur Verfügung, mit der Drittanbieter eigene Programmiererweiterungen implementieren können. Diese Erweiterungen sind jedoch programmierte Anwendungen und daher nicht für jeden Anwender benutzerfreundlich. Dynamo ermöglicht, die Daten über eine graphisch Programmieroberfläche zur Verfügung zu stellen.

Weiters kann Dynamo parametrische Arbeitsvorgänge erweitern, um Dokumentationen und Analysen zu erstellen. Neben dem Automatisieren von Aufgaben bietet Dynamo auch Möglichkeiten an, um Daten zu importieren und exportieren.

**Anwendung im Tunnelbau** Wird eine Objektfamilie in Revit erstellt, so kann diese mit Dynamo im Nachhinein auf graphischer Ebene nachgearbeitet werden [110]. Ist das Querschnittselement in Form einer Revit Familie fertig modelliert, so erfolgt die Austeilung zu den Referenzpunkten auf der Trassierungsachse ebenfalls mit Dynamo.

Die Handhabung kann mit Erweiterungspaketen aus dem Internet erheblich erleichtert werden. Für spezifische Probleme können auch eigene Werkzeuge erstellt werden, die beispielsweise eine Umrechnung von Koordinaten automatisieren. Eine häufig genutzte Anwendung ist das Verarbeiten von Excel Daten in Revit.

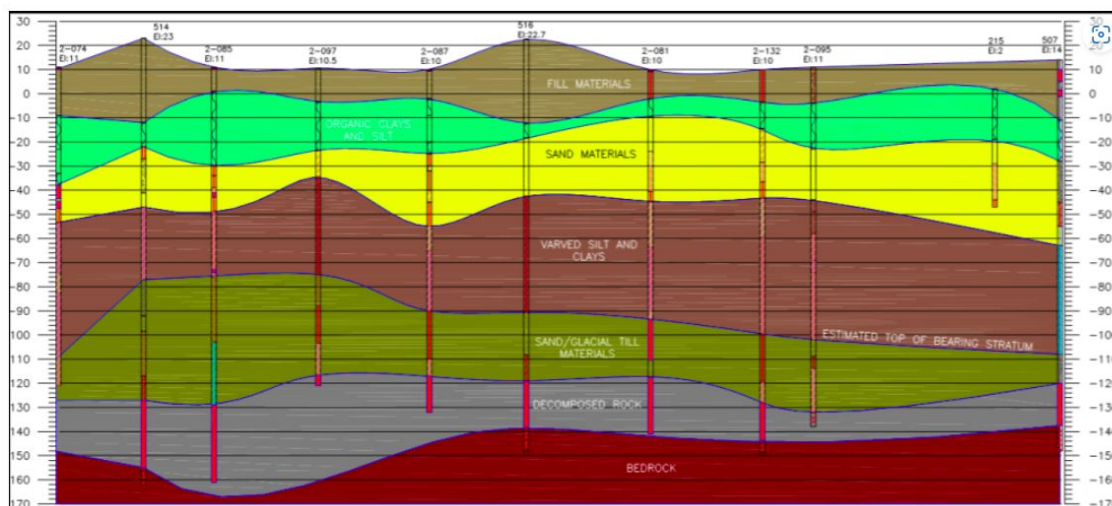
Ebenso kann die Software Civil 3D mit Dynamo erweitert werden, um über das Dynamo Skript, wiederkehrende Prozesse zu automatisieren [118]. Als Anwendungsgebiet kann die Austeilung von Bohrpfählen genannt werden.

**Open-BIM Tauglichkeit** Dynamo wird nur als Erweiterung bestehender Programme angewendet und kann ohnedies nicht als alleinige Software genutzt werden [93]. Die integrierten Import- und Exportfunktionen sind daher nicht von Dynamo selbst, sondern von der Hauptsoftware, welche erweitert wird, abhängig.

**Erweiterbarkeit** Da Dynamo bereits selbst eine Erweiterungssoftware für Revit über eine Programmierschnittstelle ist, wäre eine Analyse selbiger Erweiterbarkeit thematisch verfehlt [93].

### 3.5.2 Autodesk Geotechnical Modeler für Civil 3D

Der Geotechnical Modeler ist eine Erweiterung für Autodesk Civil 3D [18]. Damit können geotechnische Daten in Civil 3D dargestellt und analysiert werden. Funktionen zur Einarbeitung von Schichtflächen sind integriert. Dabei werden die Daten aus den Bohrlöchern zu einer Schichtfläche verbunden. Treten Änderungen in den Bohrllochdaten auf, werden diese automatisch aktualisiert. Die Informationen können anschließend als Schnittprofil oder 3D Modell ausgegeben werden. Die Benutzeroberfläche ist im Stil von Civil 3D aufgebaut und ist in der Handhabung ident.



**Abb. 3.10:** Schichtaufbau aus Bohrlochdaten im Geotechnical Modeler für Civil 3D (Quelle: [18])

**Anwendung im Tunnelbau** Eine konkrete Anwendung für den Tunnelbau konnte nicht gefunden werden. Die geotechnischen Informationen sind für eine Tunnelplanung jedoch unerlässlich, weshalb eine Anwendung im Tunnelbau angenommen werden kann.

**Open-BIM Tauglichkeit** Die geotechnischen Daten können über das AGS oder CSV Format importiert werden [18]. Gesichert werden die Daten nur auf dem lokalen Rechner und können auch nur dort verwendet werden. Eine Möglichkeit der Datenweitergabe besteht derzeit nicht. Das 3D Modell kann nur in eine neue Civil 3D Datei exportiert werden. Wie das übrige BIM Modell für andere Projektbeteiligte zugänglich gemacht und in ein offenes Format exportiert werden kann, hängt ausschließlich von den Funktionen des Basisprogramms, Civil 3D, ab. Diese werden im programmspezifischen Teil analysiert.

**Erweiterbarkeit** Da es sich beim Geotechnical Modeler für Civil 3D um eine Erweiterung für Autodesk Civil 3D handelt, ist die Frage nach der Erweiterbarkeit beim Basisprogramm zu untersuchen [18]. Die Thematik einer API Erweiterbarkeit bezüglich Exportmöglichkeiten ist hier nicht zu behandeln.

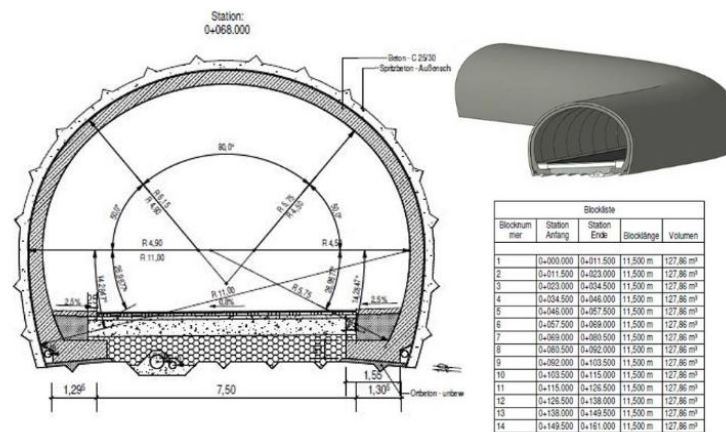
### 3.5.3 Fides Infrastructure Toolbox

Die Fides Infrastructure Toolbox ist eine Software-Erweiterung für Autodesk Revit vom Hersteller Fides [52]. Dieser bietet Softwarelösungen für die Schwerpunkte Geotechnik und Tunnelbau an.

Das Programm wird über die API von Revit verknüpft und kann ohne dem Basisprogramm nicht verwendet werden [90].

**Anwendung im Tunnelbau** Die zur Verfügung stehende Werkzeugpalette kann auch für die Erstellung von Brückenquerschnitten genutzt werden, ist aber vor allem für den Tunnelbau ausgelegt. Neben der Modellierung von benutzerdefinierten Querschnitten liegt auch eine Bibliothek mit vordefinierten Querschnitten vor [59]. Es werden damit zu den standardisierten Modellierungswerkzeugen zusätzlich Funktionen integriert, welche eine BIM Modellierung eines Tunnels erleichtern.

Es können beliebige Querschnitte erzeugt, mit Parametern versehen und diese entlang der Tunneltrasse extrapoliert werden [52]. Bei der Austeilung des Regelquerschnitts entlang der Trasse kann man eine Blockteilung definieren [45]. Um bei gekrümmten Verläufen der Trasse keine klaffenden Fugen im Zuge der Austeilung der Blöcke zu erhalten, können diese zugeschnitten werden. Nur bei der Modellierung mittels Blockausteilung kann man abschnittsweise Parameter hinzufügen. Die Trasse selbst kann anhand von Absteckpunkten als 3D Spline erstellt werden [52]. Für die Darstellung des Längenschnitts werden die Bauteile entlang der Trasse abgewickelt. Die Erstellung einer 2D Achse ermöglicht die Ausrichtung auf die richtige Höhenlage entlang der Trasse.



**Abb. 3.11:** Mit der Fides Infrastructure Toolbox erstelltes 3D Tunnelmodell (Quelle: [45])

**Open-BIM Tauglichkeit** Absteckpunkte kann man aus einer Excel-Datei einspielen [52]. Ein Längenschnitt kann direkt an die FIDES Geotechnik Programme weitergegeben werden. Die, mit Hilfe der Fides Infrastructure Toolbox, generierten BIM Modelle befinden sich im Basisprogramm Autodesk Revit. Wie das BIM Modell für andere Projektbeteiligte in ein offenes Format exportiert werden kann, hängt ausschließlich von den Funktionen des Basisprogramms ab. Diese werden im programmspezifischen Teil analysiert.

**Erweiterbarkeit** Da es sich bei der Fides Infrastructure Toolbox um eine Erweiterung für Autodesk Revit handelt, ist die Frage nach der Erweiterbarkeit beim Basisprogramm Revit zu untersuchen [52]. Die Thematik einer API Erweiterbarkeit bezüglich Exportmöglichkeiten ist hier nicht zu behandeln.

### 3.5.4 McNeel Grasshopper

Bei der Software Grasshopper handelt es sich um eine Erweiterung für Rhinoceros 3D [80]. Damit können Algorithmen ohne Kenntnis von Programmiersprachen für die Formerzeugung erstellt werden. Die Parameter werden mit einzelnen Feldern, wie zum Beispiel Schieberegler für variable Wertebereiche eingegeben. Die Verarbeitung der Parameter erfolgt über Aktionsfelder, welche mit Flusslinien verbunden sind. Mehrfach verknüpfte Prozesse können damit übersichtlich und ohne Skript-Programmierung erstellt und graphisch dargestellt werden.

Eine Anwendung ist das automatische Einfügen von sich wiederholenden Elementen, um Zeit zu sparen [100].

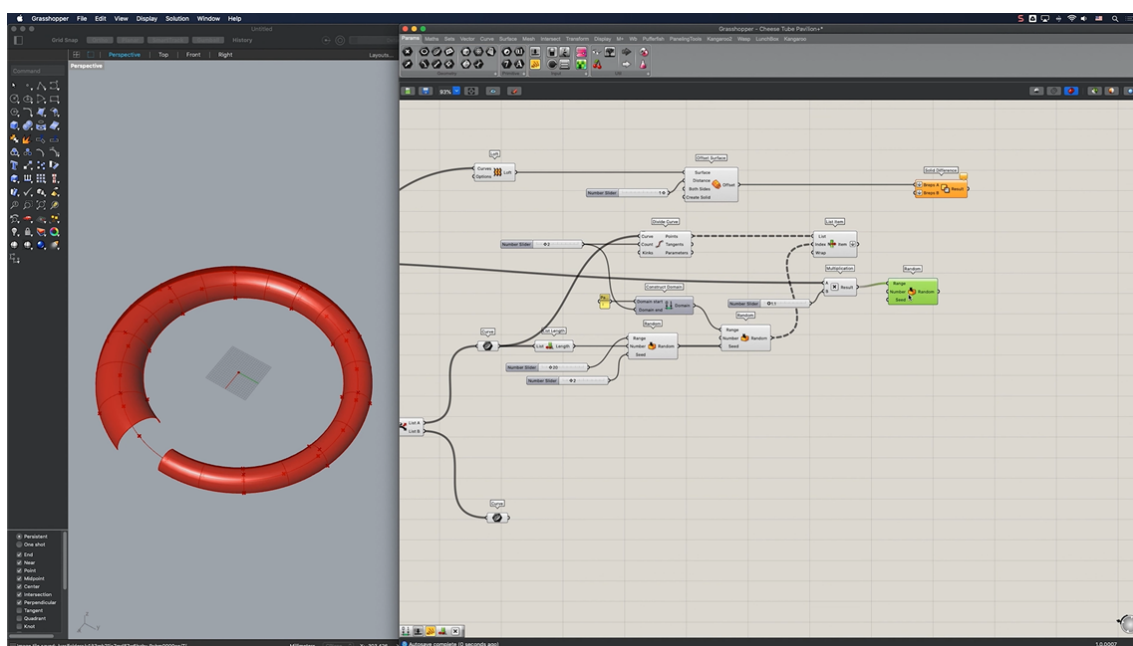


Abb. 3.12: Graphische Algorithmus Programmierung in McNeel Grasshopper. (Quelle: [80])

**Anwendung im Tunnelbau** Eine Modellierung eines Tunnels mit veränderlichen Parametern ist möglich [100]. Dadurch kann man Planungsangaben wie beispielsweise Betonstärke der Innenschale sehr schnell anpassen. Die veränderte Masse kann ausgegeben und somit eine technische Planungsänderung auch auf finanzielle Auswirkungen abgeschätzt werden. Weiters besteht die Möglichkeit einer Modellierung von Stützmitteln.

**Open-BIM Tauglichkeit** Es sind Zusatzprogramme für das Teilen der Geometriedaten im Webbrowser vorhanden [100]. Wie das 3D Modell für andere Projektbeteiligte zugänglich gemacht und in ein offenes Format exportiert werden kann, hängt ausschließlich von den Funktionen des Basisprogramms Rhinoceros 3D ab. Dies wird im programmspezifischen Teil analysiert.

**Erweiterbarkeit** Da es sich um eine Erweiterung für Rhinoceros 3D handelt, sind gleichen Funktionen wie beim Basisprogramm vorhanden [80]. Die Thematik einer API Erweiterbarkeit bezüglich Exportmöglichkeiten ist hier nicht zu behandeln.

### 3.5.5 Mensch und Maschine BIM Booster

Der BIM Booster von Mensch und Maschine ist ein Erweiterungsaufsatz für Autodesk Revit [88]. Aufwendige Prozesse lassen sich damit effizienter und schneller durchführen. Die Anwendungsbereiche unterteilen sich in folgende Segmente:

- BIM Booster Planung
- BIM Booster Kalkulation
- BIM Booster Modellprüfung

Bei der Planung wirkt die Software unterstützend, indem vorgefertigte Blöcke zur Verfügung stehen. Für die Planung der Haustechnik gibt es zusätzliche Funktionen, um beispielsweise die Heizungsleitungen kollisionsfrei zu entwerfen. Weiters ist die bidirektionale Excel Schnittstelle für die Parametrisierung von den jeweiligen Bauteilen nutzbar.

Bezüglich Kalkulationsthemen kann über die Schnittstelle des BIM Boosters mit gängigen AVA Programmen kommuniziert werden [88]. Bauteile aus dem BIM Modell kann man direkt mit LV Positionen verknüpfen. Für die Preisermittlung der einzelnen Position kann eine automatische Massen- beziehungsweise Mengenermittlung durchgeführt werden.

Im Bereich der Modellprüfung wird während der Erstellung des BIM Modells bereits auf Fehler sowohl visuell als auch tabellarisch hingewiesen. Eine zusätzliche Software für Kollisionsprüfungen kann entfallen [88].

**Anwendung im Tunnelbau** Eine konkrete Anwendung für den Tunnelbau konnte nicht gefunden werden. Jedoch sind die oben angeführten Funktionen auch für eine Tunnelplanung einsetzbar, weshalb eine Anwendung im Tunnelbau angenommen werden kann.

**Open-BIM Tauglichkeit** Die Grundlage für die Kalkulation sind IFC Modelle, welche mittels BIM Booster speziell dafür aufbereitet werden können [88]. Wie das BIM Modell für andere Projektbeteiligte zugänglich gemacht und in ein offenes Format exportiert werden kann, hängt ausschließlich von den Funktionen des Basisprogramms Revit ab. Dies wird im programmspezifischen Teil analysiert.

**Erweiterbarkeit** Da es sich beim BIM Booster um eine Erweiterung für Autodesk Revit handelt, ist die Frage nach der Erweiterbarkeit beim Basisprogramm zu untersuchen [88]. Die Thematik einer API Erweiterbarkeit bezüglich Exportmöglichkeiten ist hier nicht zu behandeln.

### 3.5.6 Sofistik Bridge Modeler

Die von Sofistik hergestellte Software ist eine Erweiterung für Autodesk Revit [106]. Sie ermöglicht eine BIM Modellierung, vor allem in der Entwurfsphase, sowohl im Brücken- als auch im Tunnelbau. Aus dem parametrisierten 3D Modell können Schnitte erstellt und auch eine Abfrage von Stück, Flächen beziehungsweise Volumina für die Massenermittlung durchgeführt werden. Durch die umfangreiche Revit Umgebung kann das gesamte Modell im Bridge Modeler erstellt werden, ohne dabei über Schnittstellen einen Qualitätsverlust zu erleiden [59].

**Anwendung im Tunnelbau** Der Bridge Modeler funktioniert auf Basis von Revit und stellt zusätzliche Funktionen zur Verfügung [2]. Die Tunnelachse kann in 3D modelliert werden. Entlang dieser kann man dann erstellte Objekte, sogenannte Familien, positionieren. Im Tunnelbau eignet sich hier beispielsweise die Verteilung der Tübingringe.

**Open-BIM Tauglichkeit** Der Import von Geländemodellen im LandXML Format ist möglich [106]. Bestehende 3D Tunnelachsen können mittels LandXML, JSON, CDB Format oder aus Koordinatentabellen in den Formaten CSV, TXT oder XYZ importiert werden [2]. Der Export eines mittels Bridge Modeller erstellten Modells wird über die IFC Schnittstelle realisiert. Ein hoher Detaillierungsgrad ist möglich.

**Erweiterbarkeit** Da es sich bei diesem Programm um einen Erweiterungsaufsatz für Autodesk Revit handelt, gelten die gleichen Erweiterungsmöglichkeiten wie beim Hauptprogramm.

### 3.5.7 Sofistik Reinforcement Detailing

Das Softwarepaket Reinforcement Detailing von Sofistik ist eine Werkzeugpalette, die in Autodesk Revit als Erweiterung hinzugefügt werden kann [106]. Die Hauptanwendung liegt in der Erstellung eines zweidimensionalen Bewehrungsplans basierend auf einem dreidimensionalen Revit Modell. Der Arbeitsablauf beginnt mit dem Bewehren des 3D Modells in Revit. Als Unterstützung gibt es für diesen Vorgang das Zusatzmodul Sofistik Reinforcement Generation, welches aus der gleichen Programmfamilie kommt, jedoch nicht näher analysiert wird. Aus dem 3D Modell können folgend Schnitte erstellt werden, die als Grundlage für den Bewehrungsplan dienen. Die zweidimensionalen Geometrien werden danach mit Positionen und Abmessungen beschriftet. Eine Ausgabe der Biegeliste und einer Mengenliste so wie das Herauszeichnen von Spezialpositionen ist ebenfalls möglich.

**Anwendung im Tunnelbau** Eine konkrete Anwendung für den Tunnelbau konnte nicht gefunden werden. Jedoch sind die oben angeführten Funktionen auch für ein Tunnelbauwerk einsetzbar, weshalb eine Anwendung im Tunnelbau angenommen werden kann. Die Software unterstützt nur bei der Umwandlung eines 3D Modells inklusive Bewehrung in einen zweidimensionalen Bewehrungsplan.

Für die Anwendbarkeit im Tunnelbau ist die Erstellung eines 3D Tunnelmodells entscheidend. Dafür ist die Hauptsoftware Autodesk Revit zu analysieren, was im programmspezifischen Teil geschieht.

**Open-BIM Tauglichkeit** Die Stahlliste wird als OpenXML im .docx Format ausgegeben [106]. Sofistik-Reinforcement Detailing ist eine Erweiterung für Autodesk Revit und kann ohnedies nicht als alleinige Software genutzt werden. Die integrierten Import- und Export Funktionen sind daher von der Hauptsoftware, welche erweitert wird, abhängig.

**Erweiterbarkeit** Sofistik-Reinforcement Detailing ist bereits selbst eine Erweiterungssoftware für Autodesk Revit die über eine Programmierschnittstelle zugreift [106]. Eine Analyse hinsichtlich der Erweiterbarkeit dieser wäre thematisch verfehlt.

## 3.6 Sonstige Programme

In dieser Kategorie sind weiter Programme genannt, welche keiner der vorherigen passend zugeordnet werden können. Sie umfasst Programme mit dem Schwerpunkt auf Punktwolkenverarbeitung, Finiten Elemente Analyse und erweiterte Visualisierung.



### 3.6.1 Autodesk ReCap Pro

Der Hersteller Autodesk hat mit ReCap Pro eine Software zur Verarbeitung von Punktwolken entwickelt, welche der Gruppe der AEC (Architecture, Engineering and Construction) Programme zugehörig ist [29]. Bestandsobjekte und natürliche Gegebenheiten können damit digital erfasst werden, um sowohl den Bauablauf, als auch den Endzustand zu dokumentieren. Dazu werden die Daten aus Laserscans verarbeitet und in ein 3D Modell überführt. Die Punktwolken werden in ein BIM Modell integriert, um eine Vergleichbarkeit zwischen Planung und Realität zu erhalten. Um die Arbeitsabläufe zu beschleunigen, können die Punktwolken auch in einem 3D Netze verarbeitet werden. Weiters können damit Vermessungsaufgaben ersetzt, und diese mit photogrammetrischen Aufnahmen visuell hinterlegt werden.

**Anwendung im Tunnelbau** Die Software ist für die Verarbeitung der Punktwolken geeignet und differenziert dabei nicht, um welche Objekte es sich handelt [99]. Für den Untertagebau kann eine Bestandsaufnahme ebenso durchgeführt werden, wie bei Objekten obertage. Nachdem sich die Methode speziell für Linienelemente gut eignet, zählen auch Tunnelprojekte zu den Anwendungsfeldern. Sowohl in der Bauphase als auch in der Erhaltung, kann der digitale Zwilling die Planungsarbeiten erheblich erleichtern.

Der Arbeitsprozess bis zum 3D Modell beginnt mit dem Laserscan an verschiedenen Punkten [99]. Diese Daten werden direkt an ein mobiles Gerät, auf welchem ReCap Pro installiert ist, übertragen. Nach der Verarbeitung der Punktwolken, kann das Modell in Autodesk Revit weiterbearbeitet werden.

**Open-BIM Tauglichkeit** Der Datenaustausch in ReCap Pro kann über die Dateiformate aus Tabelle 3.21 durchgeführt werden [69]. Nachdem die Verwendung in Kombination mit Revit sehr häufig erfolgt, hängt die Open-BIM Tauglichkeit auch von den Funktionen von Revit ab. Das Projekt kann über die herstellerinternen Programme, Autodesk Drive oder BIM 360, mit andern Projektbeteiligten per E-Mail geteilt werden [14]. Weiters kann mit Autodesk Drive eine offene Projektumgebung erstellt werden, wo berechtigte Personen die Datei von ReCap Pro ansehen und bearbeiten können. Auf die Open-BIM Tauglichkeit von BIM 360 wird im programmspezifischen Absatz eingegangen.

**Erweiterbarkeit** Eine Erweiterbarkeit hinsichtlich der Export Funktionen mittels offener Formate über eine API und das Hinzufügen von Plug-ins ist nicht möglich. Eine Verbindung zwischen Programmen der Autodesk Familie kann aber hergestellt werden [69].

**Tab. 3.21:** Formate für den Datenaustausch in Autodesk ReCap Pro (Quelle:[12], [69])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.pts, .ptx, .ptg, .e57, .dwg,	.fbx, .rcs, .pts .e57, .dwg,
Offene Formate	.txt,	.obj,

### 3.6.2 CloudeCompare

CloudeCompare ist ein frei zugängliches Software Projekt initiiert von Daniel Girardeau-Montaut [60]. Diese Software wurde entwickelt, um 3D Punktwolken zu verarbeiten, genauer gesagt, um zwei verschiedene Punktwolken miteinander zu vergleichen. Die Ergebnisse können farblich dargestellt werden, um Differenzen zwischen den beiden Punktwolken zu visualisieren. Weiters können

Statistiken ausgegeben werden. Die Punktwolken können beispielsweise aus einer Vermessung mittels Laserscan stammen. Das Programm kann auch direkt mit Sensoren kommunizieren. Die Anwendungsfelder sind branchenunabhängig und reichen vom Zahnarzt, über Künstler bis hin zum Vermesser.

**Anwendung im Tunnelbau** Für die geologische Aufnahme der vorherrschenden Verhältnisse kommen vollflächige 3D Laserscans zum Einsatz [83]. Die erhaltenen Daten liegen in Form von Punktwolken vor. Mit CloudeCompare können Trennflächen analysiert und deren Raumlage und Abstand, mittels integriertem Kompass-Werkzeug, festgestellt werden. Weiters kann man zeitlich versetzte Punktwolken miteinander vergleichen, um so Verschiebungen des anstehenden Gebirges zu erkennen. Die Verformungen der Tunnellaibung sind für den Bauablauf im Tunnelbau von hohem Interesse. Neben dem Laserscan, kommen auch photogrammetrische Aufnahmen zum Einsatz, welche mit CloudeCompare als 3D Modell dargestellt werden können. Eine Dokumentation des Vortriebs kann so realisiert werden.

**Open-BIM Tauglichkeit** Für den Import von Daten werden die Formate laut Tabelle 3.22 zur Verfügung gestellt. Da es sich um ein Open Source Projekt handelt, ist es frei zugänglich und herstellerunabhängig [60]. Eine IFC Schnittstelle ist aber nicht vorhanden.

**Erweiterbarkeit** Mit Plugins kann die Software hinsichtlich ihrer Funktionen mit vorgefertigten Zusatzpaketen erweitert werden [60]. Eine Erweiterbarkeit hinsichtlich der Export Funktionen konnte nicht ermittelt werden.

**Tab. 3.22:** Formate für den Datenaustausch in CloudeCompare (Quelle: [61])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.fbx, .ptx, .pts, .shp, .e57,	.fbx, .pts, .shp, .e57,
Offene Formate	.dxf, .bmp, .stl, .obj, .asc, .txt, .csv,	.dxf, .bmp, .stl, .obj, .asc, .txt,

### 3.6.3 Dassault Systèmes Abaqus

Abaqus wurde vom Hersteller Dassault Systèmes entwickelt und ist ein Teil aus einem Paket mehrerer Analyse- und Simulationsanwendungen namens Simulia. Dabei handelt es sich um ein Finite Elemente Programm mit dem sowohl statische als auch dynamische Lasten simuliert werden können. Abaqus besteht aus vier Teilen: [112]

- Abaqus Standard
- Abaqus CAE
- Abaqus Explicit
- Abaqus Multiphysics

Mit Abaqus Standard sind Analysen für langsame Belastungen und Schwingungen möglich. Dabei können sowohl nicht lineares Materialverhalten als auch variierende Lasten berücksichtigt werden. Eine Funktion zur Weitergabe der Modelle in die jeweils anderen Teile der Software ist implementiert. Abaqus CAE ermöglicht eine erweiterte Analyse in der CAD Modell assoziativ

verknüpft werden können. Weiters können Berechnungsergebnisse visualisiert ausgegeben werden. Mit Abaqus Explicit sind stark dynamische Ereignisse wie Autounfälle und Explosionen zu simulieren. Im Bauwesen können damit Extremfälle wie Anprall behandelt werden. Abaqus Multiphysics findet im Tunnelbau kein konkretes Anwendungsfeld. [112]

**Anwendung im Tunnelbau** Für den Tunnelbau kann die Software in unterschiedlichen Teilbereichen sinnvoll eingesetzt werden. Beispielsweise wurde die Auswirkung einer Sprengladung im Felsen mittels Finite Elemente analysiert. Für solche nicht linearen Belastungen ist Abaqus gut geeignet. [120] Weiters wurde auch ein zweischaliger Tunnelausbau simuliert, bei dem auch das Langzeitverhalten durch Verwitterung der Tunnelschale berücksichtigt wurde. [85]

**Open-BIM Tauglichkeit** Eine 3D Modellierung eines Tunnelbauwerks ist möglich, jedoch konnte keine BIM Verwendung im engeren Sinne gefunden werden. Die kompatiblen Formate für den Datenaustausch sind in Tabelle 3.23 ersichtlich.

**Erweiterbarkeit** Es gibt Add-Ons als Schnittstellen für CAD Programme und andere Analyseprogramme [112]. Eine Erweiterung für die Datenausgabe konnte nicht gefunden werden.

**Tab. 3.23:** Formate für den Datenaustausch in Dassault Systèmes Abaqus (Quelle: [112])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.sim, .iges,	.sim, .iges,
Offene Formate	.sat .stp, .obj,	.sat .stp, .obj,

### 3.6.4 Epic Games Twinmotion

Der Hersteller Epic Games bietet eine Software für Visualisierung an, welche unter dem Begriff Extended Reality arbeitet. Der Ursprung stammt aus der Computerspiel-Industrie, wobei Twinmotion die Verbindung zu Bauanwendungen herstellt [47]. Dafür können die Modelle aus kompatiblen CAD und BIM Programmen direkt in Twinmotion eingespielt und auch aktuell gehalten werden [67], [50]. Für die optische Ausgestaltung der Modelle stehen externe Bibliotheken mit vorgefertigten Objekten zur Verfügung. Weiters können auch Abläufe animiert werden, wie beispielsweise die Herstellung eines Bauabschnitts. [50]

**Anwendung im Tunnelbau** Eine konkrete Anwendung im Tunnelbau konnte nicht gefunden werden. Die eingespielten Geometrien können mit den integrierten Funktionen visualisiert werden, jedoch liegen keine spezifischen Tunnelemente vor. Diese können jedoch aus kostenlosen Bibliotheken importiert werden. Über das Datasmith Format können die Modelle auch in die herstellergleiche Software Unreal Engine, welche mit Twinmotion eng zusammenhängt, übertragen werden. Dort liegen ebenfalls Zusatzpakete vor, mit welchen eine Animation eines Tunnelmodells (siehe Abb. 3.13) realisiert werden kann. [50]

**Open-BIM Tauglichkeit** Über das Datasmith Exporter Plugin kann ein Datenaustausch über eine direkte Schnittstelle stattfinden [114]. Über ein Plug-in in den Programmen laut Tabelle 3.24 werden für Twinmotion kompatible Dateien exportiert.

Neben der lokalen Sicherung der erstellten Präsentation kann diese auch in die Twinmotion Cloud geladen werden [114]. Darüber können die Visualisierungen im Webbrowser oder auf mobilen Geräten angezeigt werden. Für ein gemeinsames Arbeiten in dem selben Modell wird



**Abb. 3.13:** Visualisierung eines Straßentunnels mit dem Plugin Motorway Tunnel für Unreal Engine. (Quelle: [49])

eine regelmäßige Aktualisierung der Cloud Datei benötigt, was jedoch über eine integrierte Schaltfläche möglich ist.

**Erweiterbarkeit** Der Datenaustausch zu den oben angeführten CAD oder BIM Programmen kann über eine API direkt erfolgen. Dazu wird beispielsweise in Revit ein Zusatzmodul installiert. [115] Eine Erweiterung für die Datenausgabe wurde nicht gefunden.

**Tab. 3.24:** Formate für den Datenaustausch in Epic Games Twinmotion (Quelle: [114])

	Import	Export
Proprietäre Formate	.3ds, .fbx, .pts, .e57	
Offene Formate	.dxf, .stl, .dae, .obj, .txt, .png,	
Direkte Schnittstelle	Archicad, BricsCAD, CET, Revit, Rhino, SketchUp Pro, Vectorworks,	.png,

Zusammenfassend zeigt sich, dass die ausgewählten Programme eine Vielzahl von Anwendungsgebieten abdecken, die aber nur teilweise auf den Tunnelbau spezialisiert sind. Die Open-BIM-Tauglichkeit kann über offene Formate oder auch über native Formate, falls diese mit beiden zu verknüpfenden Programmen kompatibel sind hergestellt werden. Individuelle Probleme können über Programmierschnittstellen gelöst werden, wobei kein standardisiertes Prozedere vorliegt. Ergänzend zu den theoretischen Informationen der Literaturrecherche werden auch Erfahrungen aus der Praxis über eine Interviewreihe herangezogen.

# Kapitel 4

## Auswertung der Experteninterviews

In einer Interviewreihe wurden fünf Fachexperten aus der Praxis befragt. Dabei wurden allen Teilnehmern die gleichen strukturierten Fragen aus den Bereichen allgemeine BIM-Themen, Open-BIM-Projektentwicklung und Tunnelbauspezifisch BIM-Methodik gestellt.

Das zu analysierende Material wurde in Einzelinterviews, mit einer Dauer von rund 45 bis 60 Minuten, gewonnen. Die Interviews wurden im Zeitraum von März bis Mai 2023 sowohl in Form von Gesprächen in Präsenz in Büroräumlichkeiten der Teilnehmer als auch über Video-Konferenzen abgehalten. Da Aspekte der Körpersprache und Emotionen einen untergeordneten Einfluss auf die qualitative Inhaltsanalyse bei vorliegender Thematik hat, wird der Ort der Gespräche nicht weiter berücksichtigt [76]. Die Gespräche selbst wurden über ein Mobiltelefon aufgezeichnet und als Tonaufnahme gesichert.

Die Tonaufnahmen wurden, mit Fokus auf die Inhalte, nach dem vereinfachenden Verfahren transkribiert [40]. Sprachliche Ungenauigkeiten sowie Versprecher und Zwischenlaute wurden geglättet, um die Lesbarkeit zu verbessern. Für die Anonymisierung wurden den Interview-Partnern Nummern (IP1) bis (IP5) zugewiesen, welche sich auch im Anhang wieder finden.

Die Transkription der Interviews wurde anhand einer qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet [76]. Dabei wird der sprachlichen Wirkung keine Bedeutung gegeben, sondern rein den Inhalten. Als Grundform wurde die zusammenfassende Inhaltsanalyse gewählt, um die wesentlichen Inhalte wiederzugeben, jedoch das Material zu reduzieren. Dabei werden Paraphrasierungen, Generalisierungen und Reduktionen vorgenommen. Redundante Aussagen sowie gleiche Aufzählungen werden inhaltlich gebündelt.

**Tab. 4.1:** Übersicht befragter Fachexperten der Interviewreihe

Nr.	Bereich, Position	Beschreibung
IP 1	Planung, BIM-Modellierer	7 Jahre BIM Erfahrung mit Projekten im Tiefbau
IP 2	Planung, Projektleiter	Bauingenieur, 16 Jahre Erfahrung statisch konstruktive Planung
IP 3	Ausführung, Bereichsleiter Innendienst	Bauingenieur, 19 Jahre Erfahrung im Tunnelbau, BIM Entwicklung
IP 4	Planung, Teamleiter Modellierungsteam	Bauingenieur, 26 Jahre Erfahrung internationaler Hohlraumbau,
IP 5	Auftraggeber und Betreiber, BIM-Management	Bauwirtschaftsingenieur, strategische BIM Entwicklung,

## 4.1 Interview Teilnehmer

Bei den Interview Teilnehmern handelt es sich um Personen welche als Auftraggeber (IP5), Planer(IP1,2,4), Ausführende (IP3) oder Infrastruktur-Betreiber (IP3) im Bauwesen tätig sind. Sie sind hauptsächlich ausgebildete Bauingenieure und können teilweise auf über 20 Jahre Erfahrung im Tunnelbau, sowohl national als auch international, zurückgreifen. Die unterschiedlichen Gesprächspartner bekleiden Positionen als BIM-Modellierer (IP1), Projektleiter (IP2), Bereichsleiter für den Innendienst (IP3), Teamleiter für BIM-Modellierung (IP4) und Strategie Manager für die BIM-Methodik (IP5). Sie sind seit der Anfänge der BIM Entwicklung in den Prozess eingebunden und waren auch bei Pilotprojekten beteiligt. Weiters können sie aufgrund ihrer internationalen Erfahrungen einen Vergleich mit anderen Ländern ziehen. Die befragten Personen bilden einen Querschnitt der BIM Experten aus der Praxis ab.

## 4.2 Allgemeine BIM-Themen

Das größte Potential in der BIM-Planung wird an unterschiedlichen Stellen geortet. Auf der einen Seite wird der Einsatz von BIM in der Planungsphase am vorteilhaftesten gesehen (IP3), wohingegen ein Fachkollege die größte Stärke der Betriebsphase des Bauwerks zuordnet (IP5). Man muss jedoch beachten, dass die zukünftigen Anforderungen der Betriebsphase bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden, um eine Reduktion der Betriebskosten zu erwirken. Die einzelnen Projektphasen beeinflussen sich gegenseitig und können nicht immer klar voneinander abgegrenzt werden. Die sinnvolle Verwendung der BIM-Methode ist nicht nur von der technischen Seite sondern auch vom Finanzierungswillen der Auftraggeber abhängig (IP2), weil dadurch die Modellierungstiefe je Projektphase wesentlich beeinflusst wird.

Ob sich der erhöhte Planungsaufwand aus finanzieller Sicht rentiert, hängt stark vom Projekt und dem Projektfortschritt ab (IP2). Ein bereits konventionell geplantes Bauwerk nachträglich als BIM-Modell zu erstellen, produziert Mehrkosten, welche sich über die Lebensdauer des Bauwerks nicht mehr egalisieren lassen (IP3). Wird hingegen von Anfang an das Projekt mit der BIM-Methode realisiert, so kann sich der erhöhte Planungsaufwand amortisieren (IP1,4,5). Falls in dem umsetzenden Unternehmen bereits genügend Kompetenzen aufgebaut sind, kann sogar von weniger Planungsaufwand ausgegangen werden (IP3,5). Eine konkrete Kosten-Nutzen-Analyse liegt nicht vor (IP2), jedoch wird eine Kostenersparnis, aufgrund besserer Abstimmung der Beteiligten über das gesamte Projekt hinweg erwartet.

Als technisches Muss wird die BIM-Planung aufgrund der komplexen Bauwerke nur in Detailfragen gesehen (IP2,3,4). Je aufwändiger ein Projekt ist, desto sinnvoller ist BIM um Klarheit zu schaffen (IP1,3), jedoch wurden auch schon ohne BIM aufwendige Bauwerke errichtet (IP2). Im internationalen Raum ist eine BIM-Planung in Ausschreibungen teilweise schon verpflichtend, weshalb es in Zukunft ohnedies nicht mehr ohne diese funktionieren wird (IP1,3). Weiters wird die BIM-Methode als notwendig erachtet, um über die steigende Effizienz der einzelnen Experten dem zukünftigen Fachkräftemangel entgegenzuwirken (IP5).

Die Sinnhaftigkeit der Anwendung der BIM-Methode hängt von der Projektgröße ab (IP3). Generell wird eine BIM-Planung als sinnvoll betrachtet, jedoch sind bei kleinen Projekten oder in frühen Planungsphasen auch einfachere Modelle ausreichend (IP1,2,5). Technisch sind BIM-Modelle immer sinnvoll, der zusätzliche Aufwand muss aber auch finanziell tragbar sein (IP2). Bei Bauwerken mit einem Auftragsvolumen größer fünf Millionen Euro, oder öffentlicher Infrastruktur

wird eine BIM-Planung jedenfalls als nötig angesehen (IP3).

Die meisten Tunnelmodelle werden als 3D Modelle mit hinterlegten Parametern ausgeführt (IP1,3). Für eine Implementierung von Kosten- und Terminplanung in das BIM-Modell werden unterschiedliche Programme benötigt, weshalb Open-BIM dazu notwendig ist (IP1). Während 4D Modelle mit integrierter Terminplanung zum Einsatz kommen, ist auf Kostenebene noch Entwicklungsbedarf, auch von BIM Standards, gegeben (IP1,2,3,4). Ein Interviewpartner arbeitet bereits mit 5D Modellen (IP5).

### 4.3 Open-BIM-Projektentwicklung

In der Praxis arbeitet jeder Fachplaner in seinem eigenen Modell, welches im Nachgang von BIM-Managern zusammengefügt wird (IP1,2,4,5). Als Grundlage für die geometrischen Rahmenbedingungen stehen manchmal Umgebungsmodelle zur Verfügung (IP1,5). Ein gemeinsames System für ein interoperables Arbeiten wird intern angewendet (IP3), aber unternehmensübergreifend nicht verwendet.

Die Weitergabe der Fachmodelle bedarf eines Datenaustausches, welcher über unterschiedliche Medien erfolgen kann. Früher genutzte physische Speicher wurden aufgrund der Leistungsfähigkeit der Netzwerke abgelöst (IP4). Gegenwärtig erfolgt der Datenaustausch entweder über versendete Dateien oder einer zentralen Datenumgebung. Der Versand von Modelldateien kann entweder per E-Mail oder über Download-links erfolgen (IP2), wobei keine dieser Varianten eine gute Dauerlösung darstellt (IP1). Eine zentrale Datenumgebung über Cloud Lösungen oder CDEs ist häufig im Einsatz und die angestrebte Variante für die Zukunft (IP1,3,4,5). Wesentliche Punkte bei einer zentralen Datenumgebung sind Zugriffsrechte und eine Protokollierung der Änderungen (IP1,3).

Beim Datenaustausch der jeweiligen BIM-Modell kann innerhalb einer Planungs-ARGE mit nativen Formaten gearbeitet werden (IP4). Für den Open-BIM-Austausch werden offene Formate benötigt, wobei IFC das am meisten verwendete ist (IP1,2,3,4,5). Weitere Formate wie BCF, IDS (IP5) und JSON (IP3) werden auch genutzt, dienen aber eher als Ergänzung zum IFC-Format.

Die Hürden beim Datenaustausch können unterschiedlichste Ursachen haben. Bei sehr großen Datenmengen im Bereich von einem Terabyte sind die Netzwerke nicht leistungsfähig genug und es muss wieder auf physische Speicher zurückgegriffen werden (IP2). Stammen die Fachmodelle aus unterschiedlichen Modellierungsprogrammen, so wird oftmals ein drittes Programm benötigt, um die Modelle zu kombinieren (IP1). Durch unterschiedliche Bezugskoordinaten liegen diese Fachmodelle teilweise weit auseinander oder Ungenauigkeiten führen dazu, dass keine Konsistenz im Modell herrscht (IP3,4). Werden Modelldaten laufend ausgetauscht ist auf die Aktualität der Daten zu achten (IP4). Beim Arbeiten mit nativen Formaten können unterschiedliche Programmversionen als Fehlerquelle auftreten (IP4). Neben den technischen Problemen ist jedoch oft die Schuld beim Anwender zu finden (IP3). Beispielsweise gibt es beim IFC-Export viele Einstellungen, welche vom Nutzer für einen fehlerfreien Datentransfer beherrscht werden müssen (IP5). Wesentliche Themen, um die Probleme zu minimieren, sind eine gute Projektorganisation und Standardisierungen (IP5).

## 4.4 Tunnelbauspezifisch BIM-Methodik

Die am häufigsten verwendeten Programme für eine BIM-Anwendung im Tunnelbau sind Autodesk Revit, Autodesk Civil 3D, McNeel Rhinoceros, ib-data ABK und Autodesk AutoCAD. Dabei handelt es sich überwiegend um Programme für die Bauwerksmodellierung (IP1,2,3,4,5). Letztgenanntes ist zwar im klassischen Sinn keine BIM-Anwendung, liefert jedoch oftmals die geometrischen Grundlagen (IP1). Weiters kommen auch Autodesk Inventor, RIB iTWO, Autodesk Dynamo, Nemetschek Solibri und Dalux häufig zum Einsatz (IP3,4,5). Die von den Gesprächspartnern verwendeten Programme sind für allgemeine Planungsaufgaben nutzbar (IP1,2,3,4,5). Falls Tunnelbau spezifische Funktionen zum Einsatz kommen, werden diese über Erweiterungen zu den bestehenden Programmen hinzugefügt.

Die Modellierung eines Tunnels bringt im Vergleich zu Hochbauprojekten ein paar spezifische Herausforderungen mit sich. Durch die Trassierung und der Querschnittsform hat man es im Tunnelbau meistens mit räumlich gekrümmten Kurven zu tun (IP1,3,4). Diese werden durch Polygone angenähert und dadurch viele Punkte erstellt die einen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Modells haben (IP5). Bei langen Tunneln ist die horizontale Ausdehnung des Modells sehr groß (IP3,5), weshalb Tunnelmodelle manchmal in Abschnitte unterteilt werden. Die Planerstellung aus einem BIM Modell führt bei Tunnelprojekten zu Problemen und man kann keinen Schnitt entlang der Tunnelachse ausgeben (IP1,2,4). Weitere spezifische Problemstellungen wie einarbeiten eines Überprofils (IP3), lassen den Bedarf an spezialisierter Software erkennen.

Diesen Bedarf kann man durch selbst programmierte Werkzeuge decken, welche über eine API in bestehende Software eingebunden werden. Beispielsweise wurde ein Aufsatz für Revit programmiert, der eine automatische Austeilung inklusive Berechnung der Drehrichtung von Universal-Tübbingern ermöglicht (IP1,2). Nachdem die Projektanforderungen sehr variierend sind, wird im Tunnelbau noch länger von speziell programmierten Werkzeugen Gebrauch gemacht werden (IP1,3).

Die Entwicklung der Baubranche hinsichtlich Digitalisierung ist rückständig verglichen mit der IT- oder Automobilbranche (IP4,3). Die IT-Branche hat den Vorteil, dass alles über das digitale Medium abläuft (IP5). Die Automobil-Industrie, welche wie die Baubranche ein produzierendes Gewerbe ist, hat den Vorteil der Serienproduktion, Bauwerke hingegen sind immer Unikate (IP5). Diese fehlende Standardisierung macht den Entwicklungsprozess aufwendiger und dadurch langsamer (IP3).

Die Entwicklung im Tunnelbau ist verglichen mit dem Hochbau ebenfalls rückständig (IP1,2,3,4,5). Da die BIM-Methode anfänglich im Hochbau eingesetzt wurde, fehlen im Tunnelbau noch Erfahrungswerte (IP2). Dieser Rückstand kann aber durch größere Entwicklungsschritte aufgeholt werden (IP1). Ein zusätzlicher Grund ist die Komplexität im Tunnelbau, da im Vergleich zum Hochbau, wo die Bautätigkeit meist im Luftraum stattfindet, immer der anstehende Boden berücksichtigt werden muss (IP3,5).

Die Interview Partner sind sich einig, dass sich die BIM-Methode in Zukunft weiter etablieren wird (IP1,2,3,4,5). Aus Gründen der Nachhaltigkeit, der Transparenz und dem demographisch bedingtem Fachkräftemangel ist eine digitalisierte Projektabwicklung erforderlich (IP2,5). Ziel muss ein Prozess sein, welcher sich über alle Phasen des Projekts zieht (IP3) und von allen Beteiligten gefordert wird, insbesondere vom Auftraggeber (IP2,5). Hinsichtlich Nachhaltigkeit wäre eine Verfügbarkeit des BIM-Modells auf der Baustelle (IP1), sowie der Entfall von physischen Planarchiven wünschenswert (IP2). Der Planungsprozess selbst benötigt mehr Standards und soll



simplifiziert werden (IP3,4). Eine automatische Planung anhand von wenigen Eingabeparametern wäre ein Ziel (IP4). Eine weitere Vision sind Hologrammbesprechungen mit VR-Brillen, welche virtuelle Baustellenbesichtigungen mit Soll-Ist Vergleich in Echtzeit ermöglichen (IP1). Aus zwischenmenschlicher Sicht ist zu erhoffen, dass aufgrund des kollaborativen Arbeitens auch ein stärkeres Miteinander entsteht (IP5).

Fünf Fachexperten aus der Praxis wurden in einer Interviewreihe über die Themenbereiche allgemeine BIM-Themen, die Open-BIM-Projektentwicklung und die tunnelbauspezifische BIM-Methodik befragt. Bei den Experten handelt es sich um Personen aus den Bereichen Auftraggeber, Planung, Ausführung und Infrastruktur-Betreiber mit mehrjähriger Erfahrung sowohl im Tunnelbau als auch mit BIM. Im Zuge der Befragung teilten die Interviewpartner ihre Meinung bezüglich finanziellem Aufwand, zukünftigem Potential und Sinnhaftigkeit einer BIM Planung in Abhängigkeit von der Projektgröße. Da ein Tunnelprojekt von unterschiedlichen Fachexperten bearbeitet wird, wurde auch kollaboratives Arbeiten thematisiert, wobei sowohl die Erfahrungen mit der Speicherung sowie dem Austausch von Daten in der Praxis besprochen wurden. Im Bereich der tunnelbauspezifischen BIM-Methodik wurden bei den verwendeten Programmen, die Hürden einer Modellierung von Tunneln und die spezifischen Herausforderungen bei Planungsleistungen abseits der Bauwerksmodellierung diskutiert.

Die Experten sehen das größte BIM-Potential für die Zukunft in unterschiedlichen Phasen eines Projektes. Weiters ist eine differenzierte Wahrnehmung bezüglich 4D und 5D Modellen zu erwähnen. Hingegen beim Entwicklungsstand von BIM im Tunnelbau herrscht unter den Experten Einigkeit. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Programmanalyse und der Auswertung der Experteninterviews werden im nachfolgenden Kapitel diskutiert und zusammengefasst.

# Kapitel 5

## Diskussion

Die Forschungsfragen werden sowohl anhand der Literaturrecherche als auch der Interviews beantwortet. Die neu gewonnenen Erkenntnisse sind von beiden Forschungsmethoden beeinflusst. Die Auswertung gliedert sich nach den Forschungsfragen. Dabei werden die Eignung für den Tunnelbau, die Eignung für Open-BIM und die Erweiterbarkeit separat behandelt. Innerhalb der Abschnitte wird noch eine Differenzierung anhand deren Anwendungsgebiet vorgenommen. Um eine subjektive Wertung innerhalb der Kategorien zu verhindern, werden die Programme nach Hersteller alphabetisch geordnet.

### 5.1 Eignung für den Tunnelbau

In dieser Arbeit ist die Programmauswahl auf jene mit einer Anwendbarkeit im Tunnelbau begrenzt. Dabei werden die Programme nach den Kategorien Allgemein, Spezifisch und Erweiterungen, unterschieden. Unter allgemeine Programme fallen jene, welche nur allgemeine Funktionen bereitstellen, diese aber für Teilbereiche eines Tunnelprojekts sinnvoll angewendet werden können. Beinhalten Programme spezielle Funktionen die explizit bei einer Tunnelplanung eingesetzt werden, so zählen sie zur Spalte namens Spezifisch. Erweiterungsprogramme, welche als zusätzliche tunnelbauspezifische Werkzeugpaletten zu einer bestehende BIM Software hinzugefügt werden können, scheinen in der Spalte namens Erweiterungen auf.

#### 5.1.1 Bauwerksmodellierung

AutoCAD ist im klassischen Sinn keine BIM Software, da sie aber häufig für die Erstellung der Grundlagen genutzt wird, findet eine Betrachtung statt. Konkrete Tunnelbau Funktionen sind dabei nicht integriert, aber durch die serienmäßig vorhandenen Befehle können alle benötigten Geometrien in 2D und 3D gezeichnet werden. Rhinoceros 3D ist ebenfalls ein allgemein ausgelegtes Modellierungsprogramm. Die übrigen Autodesk Produkte dieser Kategorie beinhalten zusätzliche Funktionen, um spezielle Aufgaben des Tunnelbaus abzudecken. Alles in allem werden die genannten Programme erfolgreich im Tunnelbau eingesetzt. Probleme treten jedoch noch bei der Modellierung von gebogenen und gekrümmten Geometrien und deren Verschneidung auf. Auch die Fugen zwischen Tübbingen können nicht sauber modelliert werden. Weiters muss die große Horizontalausdehnung von Tunnelmodellen im Vergleich zum Hochbau genannt werden. Nachdem die technische Einrichtung selten eine Verfügbarkeit des 3D Modells auf der Baustelle ermöglicht, ist der Wissenstransport nach wie vor über Pläne gängig. Spezifische Darstellungsformen, wie ein Längenschnitt entlang der Tunnelachse, sind aber nicht möglich.

#### 5.1.2 Kosten- und Terminplanung

Die Programme dieser Kategorie sind alle für allgemeine Projektabläufe konzipiert und stellen keine spezifischen Funktionen für die Tunnelplanung zur Verfügung. Die Aufgaben für Kosten-

**Tab. 5.1:** Eignung der Programme für den Tunnelbau der Kategorie Bauwerksmodellierung

Hersteller	Allgemein	Spezifisch	Erweiterungen
Autodesk AutoCAD	X		
Autodesk Civil 3D		X	
Autodesk InfraWorks 360		X	
Autodesk Revit		X	
McNeel Rhinoceros 3D	X		

und Terminplanung im Tunnelbau sind teilweise nicht von den Standards abgedeckt, können aber manuell ergänzt werden. Die Anwendbarkeit ist auf alle Fälle gegeben, wobei der Arbeitsablauf noch nicht so automatisiert funktioniert, verglichen mit dem Hochbau. Die Terminplanung wird häufig mit dem BIM-Modell verknüpft, wohingegen die Kostenplanung noch einen größeren Entwicklungsbedarf hat.

**Tab. 5.2:** Eignung der Programme für den Tunnelbau der Kategorie Kosten- und Terminplanung

Hersteller	Allgemein	Spezifisch	Erweiterungen
ib-data ABK8	X		
Microsoft Projekt	X		
Nevaris Auer Success	X		
RIB iTWO	X		

### 5.1.3 Koordination und Viewer

In der Kategorie Koordination und Viewer sind Programme aufgelistet, welche auf bereits generierte BIM-Modelle zugreifen. Da der Aufgabenbereich dieser Programme allgemeine Funktionen für die Koordinierung bestehender BIM-Modelle umfasst, kann man ohne spezifische Tunnelbau Werkzeuge eine Anwendbarkeit für Tunnelprojekte feststellen. Die Fachmodelle können unabhängig von ihren Inhalten zu einem Gesamtmodell zusammengefügt werden.

**Tab. 5.3:** Eignung der Programme für den Tunnelbau der Kategorie Koordination und Viewer

Hersteller	Allgemein	Spezifisch	Erweiterungen
Autodesk BIM 360	X		
Autodesk Navisworks	X		
Datacomp BIM Vision	X		
Kubus BIMcollab Cloude	X		
Kubus BIMcollab Zoom	X		
Nemetschek Solibri	X		

### 5.1.4 Geologie und Geotechnik

Bei den Anwendungen für die geologische und geotechnische Planung haben viele Programme auch einen Tunnelbau spezifischen Funktionsumfang integriert. Es ist anzunehmen, dass diese Programme für geotechnisch anspruchsvolle Situationen benötigt werden, welche oftmals im Tunnelbau vorkommen. Eine Modellierung des Baugrunds anhand von unterschiedlichen Daten aus Bodenaufschlüssen übernimmt eine zentrale Rolle und stellt die Umgebung des Tunnels dar.

Die zwei Programme, welche nur allgemeine Funktionen beinhalten, sind nur teilweise für den Tunnelbau geeignet und werden auch im Sinn einer BIM-Planung nicht verwendet. Sie werden deshalb in der Tabelle 5.4 abgegrenzt dargestellt.

**Tab. 5.4:** Eignung der Programme für den Tunnelbau der Kategorie Geologie und Geotechnik

Hersteller	Allgemein	Spezifisch	Erweiterungen
Geoconsult TUGIS		X	
Geodata Eupalinos		X	
Geodata Kronos		X	
Rocscience RS2		X	
Seequent Leapfrog Works		X	
Itasca Consulting Group FLAC/UDEC/3DEC	X		
RIB RTwalls	X		

### 5.1.5 Programmiererweiterungen

Die Programmiererweiterungen sind teilweise auf den Tunnelbau spezialisiert, bieten aber auch allgemeine Funktionen an, welche zu einer effizienten Planung führen. Für die Automatisierung von sich wiederholenden Prozessen stehen mit Autodesk Dynamo und McNeel Grasshopper zwei Programme zur Verfügung, die eine graphische Programmierung ermöglichen. Die Funktionen der Tunnelbau spezifischen Erweiterungen beziehen sich auf die Modellierung. Nachdem die Programme als geeignete Aufsätze für eine Tunnelplanung gewählt wurden, lassen sie sich alle effektiv in einem Planungsprozess verwenden.

**Tab. 5.5:** Eignung der Programme für den Tunnelbau der Kategorie Programmiererweiterungen

Hersteller	Allgemein	Spezifisch	Erweiterungen
Autodesk Dynamo	X		
Autodesk Geotechnical Modeler für Civil 3D			X
Fides Infrastructure Toolbox			X
McNeel Grasshopper	X		
Mensch und Maschine BIM Booster	X		
Sofistik Bridge Modeler			X
Sofistik Reinforcement Detailing	X		

### 5.1.6 Sonstige Programme

Diese Programme sind nicht auf den Tunnelbau spezialisiert, jedoch können Aufgaben, welche im Zuge eines Tunnelbau Projekts anfallen, gelöst werden. Über Erweiterungen können Tunnelbau spezifische Funktionen teilweise integriert werden, aber serienmäßig sind keine vorhanden. Bei den Programmen, welche für die Punktwolkenverarbeitung vorgesehen sind, werden keine spezifischen Funktionen benötigt, da die Aufgaben bauwerksunabhängig sind.

Zusammenfassend zeigt sich, dass im Zuge eines Tunnelprojekts zahlreiche Programme mit allgemeinen Funktionen verwendet werden und spezialisierte Software selten ist. Da die Tun-

nelplanung ein vergleichsweise kleiner Teil der Baubranche ist, und somit die Nachfrage nach spezialisierten Programmen quantitativ gering ist, treiben die Software Hersteller die Entwicklung in anderen Teilbereichen stärker voran. Neben der fehlenden spezifizierten Werkzeuge für eine Tunnelmodellierung können die gängigen Programme spezifischen Problemstellungen aus dem Tunnelbau nicht effizient bearbeiten. Ein Beispiel sind die geometrischen Formen, wo räumlich gekrümmte Kurven, sowohl bei der Trassierung als auch im Querschnittsprofil vorkommend, modelliert werden müssen. In Bereich Ausschreibung und Vergabe fehlen teilweise noch Positionen, die in Zukunft standardisiert werden sollen.

**Tab. 5.6:** Eignung der Programme für den Tunnelbau der Kategorie Sonstige Programme

Hersteller	Allgemein	Spezifisch	Erweiterungen
Autodesk ReCap Pro	X		
CloudeCompare	X		
Dassault Systèmes Abaqus	X		
Epic Games Twinmotion	X		

## 5.2 Eignung für Open-BIM

Eine Open-BIM-Umgebung kann über verschiedene Wege hergestellt werden, wobei sich dieser Abschnitt auf den Austausch von Dateien in unterschiedlichen Formaten bezieht. Neben dem am weitesten verbreiteten offenen Format, IFC, werden auch gängige offene und proprietäre Formate für den Vergleich herangezogen. Die Grenze zwischen offenen und proprietären Dateiformaten verschwimmt in der Praxis, da native Formate von sehr weit verbreiteten Programmen oftmals auch problemlos ausgetauscht werden können. Für die Auswertung wurden die kompatiblen Dateiformate, welche am häufigsten je Kategorie auftreten in der Vergleichstabelle erfasst. Teilweise können über Plug-ins noch zusätzliche Austauschformate bereitgestellt werden, jedoch bezieht sich diese Aufstellung nur auf die serienmäßig integrierten. Die proprietären Formate werden in den Tabellen grau hinterlegt dargestellt.

### 5.2.1 Bauwerksmodellierung

In der Kategorie mit den Programmen für die Erstellung von CAD-Zeichnungen und 3D-Modellen ist die Open-BIM-Tauglichkeit am weitesten fortgeschritten. Da in den Modellierungsprogrammen die Basis des 3D Modells entsteht, ist der Datenaustausch hier von zentraler Bedeutung. Es besteht die Möglichkeit die BIM-Methode auch ohne 3D Modell anzuwenden, in der Praxis wird es jedoch meistens als Bezugsobjekt verwendet. Nachdem die Formate .dwg, .dxf und .dgn in allen hier aufgelisteten Programmen vorkommen, und eine IFC Schnittstelle in einigen Programmen vorhanden ist, kann von einer hohen Open-BIM-Tauglichkeit der Programme untereinander ausgegangen werden.

### 5.2.2 Kosten- und Terminplanung

In der Kategorie Kosten- und Terminplanung wird die Open-BIM-Tauglichkeit von den Herstellern stark fokussiert. Während bei Microsoft Project das Thema nicht so relevant scheint, wird in den Programmen für AVA eine Interoperabilität angestrebt. Über das IFC Format können die geometrischen Modelle importiert und dann mit einem LV verknüpft werden. Diese Programme richten sich bezüglich einheitlicher Datenstruktur und Austauschmöglichkeiten nach der ÖNorm

**Tab. 5.7:** Open-BIM Tauglichkeit von den Programmen der Kategorie Bauwerksmodellierung

Hersteller	.ifc	.dwg	.dwf	.sat	.dgn	.3ds	.3dm	.fbx
Autodesk AutoCAD	-	X	X	X	X	X	X	-
Autodesk Civil 3D	X	X	X	X	X	X	X	-
Autodesk InfraWorks 360	X	X	X	-	X	X	-	X
Autodesk Revit	X	X	X	X	X	-	X	X
McNeel Rhinoceros 3D	-	X	X	X	X	X	X	X

X...kompatibel, – ... nicht kompatibel, □ offenes Format, ■ proprietäres Format

A2063. Die Kompatibilität mit Microsoft Excel ist in allen Programmen vorhanden, ist aber teilweise nur für die Darstellung der Daten nutzbar und nicht für ein assoziatives Arbeiten. Die Open-BIM-Schnittstellen sind integriert aber speziell für den Untertagebau fehlen noch Standards. Obwohl sich die Kompatibilität der Software für Terminplanung eingeschränkt darstellt, wird die zeitliche Komponente, laut Experten, häufiger als die finanzielle in das BIM-Modell integriert.

**Tab. 5.8:** Open-BIM Tauglichkeit von den Programmen der Kategorie Kosten- und Terminplanung

Hersteller	.ifc	.dwg	.xml	.xls	ÖNorm A2063	GAEB
ib-data ABK8	x	-	-	x	x	-
Microsoft Projekt	-	-	x	x	-	-
Nevaris Auer Success	x	-	-	x	x	x
RIB iTWO	x	x	x	x	x	x

X...kompatibel, – ... nicht kompatibel, □ offenes Format, ■ proprietäres Format

### 5.2.3 Koordination und Viewer

Das gängigste Dateiformat für den Open-BIM Datenaustausch, IFC, ist in allen Anwendungen außer Kubus BIMcollab Cloude vorhanden. In dieser Software ist jedoch aufgrund der Funktionsweise auch kein Austausch von Modelldaten nötig, sondern es werden nur die Informationen der Kommunikation über das BCF Format transportiert. Die Koordinationsprogramme haben zur Aufgabe, Fachmodelle aus verschiedener Software zu kombinieren. Obwohl Nemetschek Solibri nicht die meisten Dateiformate unterstützt, wird es in der Praxis häufig verwendet.

### 5.2.4 Geologie und Geotechnik

Die Programme der Kategorie Geologie und Geotechnik sind hinsichtlich Open-BIM-Tauglichkeit noch nicht so stark entwickelt. Das IFC Format ist nur in einer Software integriert und einzig das .dwf Format findet sich in allen BIM-Anwendungen wieder. Die Programme von Itasca und RTwalls sind im engeren Sinn für eine BIM-Planung nicht geeignet. Viele Schnittstellen der

**Tab. 5.9:** Open-BIM-Tauglichkeit von den Programmen der Kategorie Koordination und Viewer

Hersteller	.ifc	.bcf	.dwg	.dwf	.sat	.pdf
Autodesk BIM 360	X	-	X	x	x	x
Autodesk Navisworks	X	-	X	x	x	-
Datacomp BIM Vision	X	-	-	-	-	-
Kubus BIMcollab Cloude	-	X	-	-	-	x
Kubus BIMcollab Zoom	X	-	-	-	-	-
Nemetschek Solibri	X	-	X	-	-	x

X...kompatibel, - ... nicht kompatibel, □ offenes Format, ■ proprietäres Format

Programme sind auf die Kommunikation mit geotechnischen Messgeräten ausgelegt und weniger auf die Datenweitergabe.

**Tab. 5.10:** Open-BIM Tauglichkeit von den Programmen der Kategorie Geologie und Geotechnik

Hersteller	.ifc	.dwf	.dwg	.obj	.csv	.pdf
Geoconsult TUGIS	x	x	-	x	-	-
Geodata Eupalinos	-	x	x	-	x	-
Geodata Kronos	-	x	x	-	x	x
Rocscience RS2	-	x	-	-	-	-
Seequent Leapfrog Works	x	x	x	x	x	x
Itasca Consulting Group FLAC/UDEC/3DEC	-	-	-	-	-	-
RIB RTwalls	-	-	-	-	-	x

X...kompatibel, - ... nicht kompatibel, □ offenes Format, ■ proprietäres Format

### 5.2.5 Programmiererweiterungen

Hier werden keine Austauschformate miteinander verglichen, da die Programmiererweiterungen keine eigenen Funktionen für den Datenaustausch haben. Sie hängen immer vom Basisprogramm ab, in welches sie implementiert werden. Die Open-BIM-Tauglichkeit ist hier nicht zu bewerten, da die Erweiterungen keinen zusätzlichen Funktionsumfang für ein kollaboratives Arbeiten bereitstellen.

### 5.2.6 Sonstige Programme

Nachdem Dassault Systèmes Abaqus keine BIM Anwendung im engeren Sinn ist, wird dieses Programm für die Bewertung der Open-BIM-Tauglichkeit bei Seite gelassen. Die übrigen Programme haben untereinander sehr viele kompatible Schnittstellen und über Erweiterungen kann auch mit den anderen BIM Programmen ein Datenaustausch erfolgen. IFC Schnittstellen sind aber keine integriert und auch über Erweiterungen nicht verwendbar.

Die Open-BIM-Tauglichkeit hängt nicht nur von der Anzahl der unterstützten Dateiformate ab. Wesentlich ist dabei die Kompatibilität des IFC-Formats, da es das häufigste offene Format ist und auch in Zukunft eine zentrale Rolle spielen wird. Die anderen Dateiformate ermöglichen

**Tab. 5.11:** Open-BIM Tauglichkeit von den Programmen der Kategorie Sonstige Programme

Hersteller	.dxf	.fbx	.obj	.pts	.txt	.e57
Autodesk ReCap Pro	-	x	x	x	x	x
CloudeCompare	x	x	x	x	x	x
Epic Games Twinmotion	x	x	x	x	x	x
Dassault Systèmes Abaqus	-	-	x	-	-	-

X...kompatibel, - ... nicht kompatibel, □ offenes Format, ■ proprietäres Format

gegenwärtig eine Datenweitergabe über Umwege, welche in der aktuellen Arbeitsmethode relevant, jedoch nicht das zukünftige Ziel der Open-BIM-Method ist. Die Planung in einem Modell, welches für alle Projektteilnehmer zugänglich ist, findet noch nicht statt, sondern es werden immer Fachmodelle weitergegeben. Solange diese Vorgangsweise gelebt wird, muss sich der Datenaustausch erleichtern. In den Programmen, wo eine IFC-Schnittstelle vorhanden ist, kann der problemlose Datenaustausch nicht immer gegeben sein, da auch das IFC-Format unterschiedliche Versionen hat. Weiters sind in der IFC-Struktur gewisse Standards hinterlegt, welche im Speziellen für den Tunnelbau noch nicht ausreichend entwickelt sind. In Österreich ist die Open-BIM Entwicklung im Vergleich zum internationalen Raum rückständig.

## 5.3 Erweiterbarkeit

Die Erweiterbarkeit der ausgewählten Software Produkte wird den Teilbereichen Funktionen, Datenaustausch und Verknüpfung zugeordnet.

Im Teilbereich Funktionen wird auf die Erweiterungsmöglichkeiten bezüglich Modellierung eingegangen. Mittels Programmierschnittstelle können neue Werkzeugpaletten, entweder aus vorgefertigten Sammlungen oder selbst programmiert, dem Programm hinzugefügt werden. Die Erweiterungen selbst können allgemeine oder Tunnelbau spezifische Funktionen umfassen.

Eine Erweiterbarkeit hinsichtlich kompatibler Dateiformate ist in der Spalte Datenaustausch veranschaulicht. Wird das IFC-Format bereits unterstützt, oder kann über eine Erweiterung eine IFC Datei erstellt werden, so wird dies als IFC in der Tabelle eingetragen. Erweiterungen hinsichtlich Kompatibilität anderer Formate werden dann vernachlässigt, da das IFC-Format für die Open-BIM-Method priorisiert wird. Da sich diese Arbeit im speziellen mit dem Thema Datenaustausch beschäftigt, werden Plug-ins für diese Funktionen separat behandelt, obwohl sie sich wie oben angeführte Werkzeugpaletten implementieren lassen.

In der Spalte Zugriff wird dargestellt, ob die Möglichkeit eines Zugriffs auf die Datenbank und Befehlsstrukturen über eine API besteht. Ist dies der Fall, kann ein Informationsaustausch mit anderen Programmen hergestellt werden.

### 5.3.1 Bauwerksmodellierung

AutoCAD kann hinsichtlich Plug-ins mit allgemeinen Funktionen den spezifischen Anforderungen angepasst werden. Obwohl AutoCAD im engeren Sinn nicht als BIM Anwendung definiert ist, kann über die erweiterbare IFC Schnittstelle ein Datenaustausch mit solchen stattfinden. Die API ermöglicht Entwicklern einen Zugriff auf die Datenbank, auf das Grafiksystem und die Befehle. In der Kategorie Bauwerksmodellierung werden die Programme mit zusätzlichen Modellierungswerkzeugen, welche aus vorgefertigten Bibliotheken stammen, ergänzt. Die Möglichkeiten des



Datenaustauschs sind hier schon serienmäßig sehr fortgeschritten, weshalb nur wenige Erweiterungen nötig sind.

**Tab. 5.12:** Erweiterbarkeit der Programme aus der Kategorie Bauwerksmodellierung

Hersteller	Funktionen	Datenaustausch	Zugriff
Autodesk AutoCAD	Allgemein	IFC	Ja
Autodesk Civil 3D	Allgemein	IFC	Nein
Autodesk InfraWorks 360	Tunnelbau	IFC*	Nein
Autodesk Revit	Allgemein	IFC	Ja
McNeel Rhinoceros 3D	Allgemein	IFC	Ja

\*InfraWorks 360 hat bereits eine IFC Schnittstelle standardmäßig integriert, jedoch kann mithilfe von Plug-ins eine zusätzliche Version verwendet werden.

### 5.3.2 Kosten- und Terminplanung

In der Kategorie Kosten- und Terminplanung ist eine Erweiterbarkeit eingeschränkt gegeben. Während ABK8 und iTWO über keine API Schnittstellen verfügen, kann Microsoft Project mit allgemeinen Funktionen erweitert werden. Eine direkte Verknüpfung kann man nur mit Programmen aus der Microsoft Umgebung herstellen. In Auer Success ist ein Zugriff über eine API auf andere Systeme möglich und die Informationen können mit einer Erweiterung als BCF Format exportiert werden. Zusammengefasst kann man die Erweiterbarkeit dieser Programme als vereinzelt und eingeschränkt möglich bezeichnen.

**Tab. 5.13:** Erweiterbarkeit der Programme aus der Kategorie Kosten- und Terminplanung

Hersteller	Funktionen	Datenaustausch	Zugriff
ib-data ABK8	-	-	-
Microsoft Projekt	Allgemein	-	proprietär
Nevaris Auer Success	-	BCF	Ja
RIB iTWO	-	-	-

### 5.3.3 Koordination und Viewer

Autodesk BIM 360 kann über den Autodesk App Store oder eigens programmierte Plug-ins mit allgemeinen Funktionen erweitert werden. Für den Datenaustausch sind bereits sehr viele offene Formate standardmäßig integriert, weshalb nur sehr spezifische Erweiterungen für proprietäre Formate vorliegen.

In Navisworks können über die API allgemeine Funktionen und zusätzliche Export Funktionen hinzugefügt werden. Hinsichtlich Zugriff auf die Datenstruktur ist über die .NET-API eine Betrachtung von Informationen in einer anderen Anwendung möglich.

BIM Vision ist in seiner Basisversion nur als Viewer nützlich, jedoch ermöglichen die Erweiterungen eine Vielzahl an Funktionen. Der Zugang über die API ist auch für andere Programme möglich. Da BIMcollab Cloude nur für die Kommunikation im BIM Modell ausgelegt ist gibt es keine erweiterbaren Exportformate. Bei BIMcollab Zoom wird eine Verbindung zu BIMcollab Cloude hergestellt und dementsprechend sind dessen Erweiterungen relevant. Die API von Solibri ermöglicht nur sehr spezifische Erweiterungen und Zugriffe. Im Konkreten kann über die API

eine Verbindung zu ArchiCAD hergestellt und Regeln für die Kollisionsprüfung selbst definiert werden.

**Tab. 5.14:** Erweiterbarkeit der Programme aus der Kategorie Koordination und Viewer

Hersteller	Funktionen	Datenaustausch	Zugriff
Autodesk BIM 360	Allgemein	proprietär	Ja
Autodesk Navisworks	Allgemein	IFC	Ja
Datacomp BIM Vision	Allgemein	IFC	Ja
Kubus BIMcollab Cloude	Allgemein	-	Ja
Kubus BIMcollab Zoom	-	-	Ja
Nemetschek Solibri	Regeln	-	ArchiCAD

### 5.3.4 Geologie und Geotechnik

Die Programme der Kategorie Geologie und Geotechnik sind über eine Programmierschnittstelle weder hinsichtlich Plug-ins noch direkten Datenzugriff anderer Programme erweiterbar. RIB RTwalls und die Produkte von Itasca sind im engen Sinn keine BIM Programme.

### 5.3.5 Programmiererweiterungen

In der Kategorie Programmiererweiterungen ist die Analyse differenziert zu betrachten. Da diese Softwarelösungen über die API der Basisprogramme hinzugefügt werden, ist kein Zugriff auf die Erweiterungsprogramme zu thematisieren. In der Spalte Zugriff wird das jeweils vorgesehene beziehungsweise am häufigsten erweiterte Basisprogramm erwähnt. Wie in Tabelle 5.15 ersichtlich, handelt es sich dabei immer um Programme der Kategorie Bauwerksmodellierung.

In der Spalte Funktionen sind die Funktionen der Programmiererweiterungen aufgelistet und nicht zusätzliche Funktionen, um welche die Erweiterungen erweitert werden können. Möglichkeiten für zusätzliche kompatible Dateiformate können damit nicht geschaffen werden. Die Frage der Erweiterbarkeit ist hier nicht direkt zu beantworten, da die Beurteilung der Erweiterbarkeit von Erweiterungen nicht sinnvoll ist.

**Tab. 5.15:** Erweiterbarkeit der Programme aus der Kategorie Programmiererweiterungen

Hersteller	Funktionen	Zugriff
Autodesk Dynamo	Allgemein	Revit
Autodesk Geotechnical Modeler für Civil 3D	Tunnelbau	Civil 3D
Fides Infrastructure Toolbox	Tunnelbau	Revit
McNeel Grasshopper	Allgemein	Rhinoceros 3D
Mensch und Maschine BIM Booster	Allgemein	Revit
Sofistik Bridge Modeler	Tunnelbau	Revit
Sofistik Reinforcement Detailing	Allgemein	Revit

### 5.3.6 Sonstige Programme

Im diesem Abschnitt, in dem Programme aus unterschiedlichen Anwendungsgebieten aufgezählt sind, können keine Erweiterungen programmiert werden, welche die Projektdaten in ein neues,

offenes Format exportieren. Schnittstellen für Plug-ins, welche die Programme um allgemeine Funktionen erweitern, sind hingegen vorhanden. Bei Twinmotion gibt es sogar für den Tunnelbau spezialisierte Aufsätze. Ein direkter Zugriff von anderen Programmen über eine API ist teilweise möglich, wenn auch nicht immer herstellerunabhängig.

**Tab. 5.16:** Erweiterbarkeit der Programme aus der Kategorie Sonstige Programme

Hersteller	Funktionen	Zugriff
Autodesk ReCap Pro	-	proprietär
CloudeCompare	Allgemein	-
Dassault Systèmes Abaqus	Allgemein	Ja
Epic Games Twinmotion	Tunnelbau	Ja

Speziell im Tunnelbau muss man häufig auf Speziallösungen zurückgreifen, da die gängigen Softwarelösungen nicht auf den Tunnelbau spezialisiert sind. Die Erweiterungen können hierbei sowohl in Themen der Modellierung als auch bei der Verbesserung des Datenaustausches hilfreich sein. In der Anwendung ist auch die Praxistauglichkeit ein wichtiger Faktor, da die Nutzer meistens aus der Baubranche kommen und nicht programmieren können. In online Bibliotheken stehen vorgefertigte Plug-ins zur Verfügung. Für die Zukunft des kollaborativen Arbeitens spielen die Erweiterungen eine untergeordnete Rolle, jedoch bieten sie gegenwärtig eine gewisse Flexibilität an, um Defizite der Basisprogramme auszugleichen.

Die Auswertung der Literaturrecherche und der Interviews hat gezeigt, dass die Mehrheit der analysierten und in der Praxis verwendeten Programme nicht für den Tunnelbau spezialisiert sind, für diesen aber effizient verwendet werden können. Problematisch sind einerseits fehlende Werkzeugpaletten für beispielsweise Tunnelmodellierungen und andererseits abweichende Rahmenbedingungen im Vergleich zum Hochbau, wie beispielsweise die Horizontalausdehnung des Projekts. Die Open-BIM-Tauglichkeit soll über offene Formate, wobei das IFC-Format von zentraler Bedeutung ist, ermöglicht werden. Gegenwärtig spielen neben der IFC-Kompatibilität auch native Formate und Koordinationsprogramme eine Rolle hinsichtlich Interoperabilität. Da kollaboratives Arbeiten im selben Modell unternehmensübergreifend kaum stattfindet, werden in der Praxis eigene Fachmodelle erstellt, die zu einem Gesamtmodell zusammengefügt werden. Dafür wird ein Speicherort eingerichtet, der für alle Projektbeteiligten zugänglich ist. Defizite in der Modellierung als auch in der Kompatibilität können über Programmierschnittstellen teilweise kompensiert werden. Dabei ist das Vorhandensein einer Plug-in Datenbank für die Benutzerfreundlichkeit entscheidend. Mit den erhaltenen Forschungsergebnissen lassen sich die eingangs gestellten Forschungsfragen beantworten. Im Zuge der Bearbeitung des Themas aufgekommene Fragestellungen sowie die Gültigkeit der Ergebnisse wird anschließend dargelegt.

# Kapitel 6

## Fazit

Zum Abschluss dieser Arbeit werden die wichtigsten Ergebnisse und zugehörige Methoden resümiert. Mit den, im Zuge der Forschung, gewonnenen Erkenntnissen, werden die Forschungsfragen beantwortet. Während der Bearbeitung festgestellter Forschungsbedarf ist im Ausblick ersichtlich.

### 6.1 Zusammenfassung

Die fortschreitende Digitalisierung findet auch im Bauwesen unter dem Begriff Building Information Modeling statt. Ziel ist es, parallel zum realen Bauwerk einen digitalen Zwilling zu erstellen, welcher sämtliche Informationen transportiert. Bei der Projektierung eines Tunnels sind viele unterschiedliche Fachbereiche mit eingebunden, weshalb der Datentransfer eine wesentliche Rolle spielt. Der Software übergreifende Datenaustausch mit offenen Formaten fällt unter dem Begriff Open-BIM und wird in dieser Arbeit untersucht. Falls in den Standardversionen der Programme Funktionen fehlen, können diese über Erweiterungen hinzugefügt werden. In welchem Umfang dies je Programm möglich ist, wird ebenfalls thematisiert.

Um ein grundlegendes Verständnis für die Thematik zu schaffen, werden dem Leser die wesentlichen Thematiken kurz beschrieben. Da sich die Arbeit auf den Tunnelbau beschränkt, wird die geschichtliche Entwicklung kurz aufgegriffen. Aus ihr resultiert der heutige Stand der Technik, wobei die Methode des Konventionellen Tunnelbaus im Speziellen hervorgehoben wird. Um die Entwicklung der Open-BIM-Methode im Tunnelbau darzustellen, muss primär der allgemeine Stand der Digitalisierung erhoben werden. Die BIM-Methode wird in ihren Grundprinzipien und in der Anwendung im Tunnelbau angesprochen, wobei die Open-BIM-Methode von zentralem Interesse ist. Die kollaborative Arbeitsmethode ist dabei der Grundgedanke. Die Normenlandschaft in Österreich und wichtige Begriffe werden dargelegt. Für die Erweiterbarkeit von Softwaretools wird die technische Lösung anhand von Programmierschnittstellen erläutert.

Im Zuge einer Literaturrecherche wurden 33 Programme analysiert. Die Auswahl jener lag als Grundlage vor und entstammt einer umfassenden Umfrage und Recherche. Die analysierten Programme wurden nach Anwendungsgebiet in die Bereiche Bauwerksmodellierung, Kosten- und Terminplanung, Koordination und Viewer, Geologie und Geotechnik, Programmerweiterungen sowie sonstige Programme unterteilt. Die Programme wurden einzeln nach den Aspekten der Anwendung im Tunnelbau, der Open-BIM Tauglichkeit und der Erweiterbarkeit systematisch analysiert.

Ein Praxisbezug wurde anhand einer Interviewreihe von Fachexperten, welche als Auftraggeber, Planer, Ausführende oder Infrastruktur-Betreiber tätig sind, hergestellt. Die Aussagen entstammen einer qualitativen Inhaltsanalyse der transkribierten Tonaufnahmen. Den fünf Interview-Partnern wurden die gleichen Fragen zu den Themenblöcken allgemeine BIM-Themen,

Open-BIM-Projektentwicklung und tunnelbauspezifische BIM-Methodik gestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Literaturrecherche und den Interviews wurden anschließend diskutiert. Dabei wurden die Aussagen der Literaturrecherche bestätigt, andererseits kamen auch divergierende Meinungen zum Vorschein.

## 6.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Die konkreten Antworten auf die Forschungsfragen werden hier wiedergegeben:

### **Wie geeignet sind die ausgewählten Programme für eine Anwendung im Tunnelbau?**

Vorab muss festgehalten werden, dass je nach Anwendungsgebiet die Anforderungen an ein auf den Tunnelbau spezialisiertes Programm variieren. In den Bereichen der Bauwerksmodellierung und der Geologie und Geotechnik sind Softwarelösungen mit spezifischen Tunnelbau-Funktionen vorhanden. Generell kommt jedoch sehr viel Software mit allgemeinen Funktionen zum Einsatz. Rein auf den Tunnelbau ausgelegte Programme sind als Basisprogramm nicht vorhanden, hingegen gibt es Erweiterungen, die darauf spezialisiert sind.

Aufgrund der zahlreichen Anwendungsfelder, die im Zuge eines Tunnelprojekts auftreten, kann jedes Programm in Teilbereichen des Tunnelbaus sinnvoll eingesetzt werden. Der Ursprung der Entwicklung entstammt aber meist dem Hochbau und so sind Problem, wie beispielsweise gekrümmte Geometrien und Schnitte entlang der Tunnelachse, ungelöst.

### **Wie tauglich ist die Software für eine Open-BIM Nutzung?**

Definitionsgemäß wird im Zusammenhang mit Open-BIM der Datenaustausch über offene Formate durchgeführt. Obwohl es verschiedene offene Formate gibt, wird in der Praxis dem IFC-Format die höchste Priorität zugeordnet. Die IFC Kompatibilität ist ein wesentlicher Faktor für die Open-BIM-Tauglichkeit, jedoch aufgrund unterschiedlicher Standards und Versionen nicht das einzige Kriterium. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann nicht jede Software mit IFC-Dateien arbeiten und es werden für den Datenaustausch individuelle Lösungen angewandt.

Der Datenaustausch über native Formate findet auch statt. Es gibt spezielle Koordinierungssoftware, die viele gängige native Formate unterstützen, oder Planungspartner, die mit den gleichen Programmen arbeiten. In der Praxis hängt die Open-BIM-Tauglichkeit indirekt auch davon ab, welche Programme verbreitet und wie populär diese sind. International ist der Umgang mit BIM im Tunnelbau schon ausgereifter, wohingegen in Österreich erst Pilotprojekte durchgeführt werden.

### **In welchem Umfang können bestehende Programme von externen Programmierern und Anwendern erweitert werden?**

Die Erweiterbarkeit betrifft sowohl Modellierungsfunktionen als auch Möglichkeiten für den Datenaustausch oder direkte Verknüpfungen zwischen Programmen. Einerseits ist die Struktur der Software, nämlich welche Zugriffe auf die Daten möglich sind, entscheidend, andererseits ist die Praxistauglichkeit zu hinterfragen. Da die Anwender mehrheitlich von der bautechnischen Seite kommen und nicht Programmierer sind, ist das Vorhandensein von vorgefertigten Plug-ins wesentlich. Dadurch hängen die Individualisierungsmöglichkeiten stark vom Umfang der Plug-in Bibliotheken je Programm ab. Der Tunnelbau verlangt oft nach spezialisierten Lösungen, weshalb eigens programmierte Aufsätze häufig vorkommen.

Betrachtet man die Erweiterungsmöglichkeiten rein von der technischen Seite und lässt den Aufwand der Erstellung außer Acht, so können vielfältige Möglichkeiten geortet werden. Hinsichtlich Modellierungsfunktionen werden hauptsächlich allgemeine Erweiterungen, aber vereinzelt

auch tunnelbauspezifische angeboten. Die Kompatibilität von Formaten kann über Erweiterungen selten erhöht werden, jedoch ist über Programmierschnittstellen häufig ein Zugriff auf die Datenbanken möglich.

## 6.3 Limitationen

Die Gültigkeit der Forschungsergebnisse unterliegt einigen Limitationen betreffend der Interpretation der Ergebnisse und der angewandten Methodik. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine allgemeine Tendenz ab, jedoch kann es zu individuellen Abweichungen kommen. Im Zuge der Literaturrecherche sind nicht alle vorhandenen Werke, welche die Thematik behandeln, herangezogen worden. Weiters werden in der vorliegenden Arbeit nur 33 Programme aus unterschiedlichen Anwendungsgebieten analysiert, wobei die gängigen Programme abgedeckt sind, jedoch keine Abbildung der gesamten Software-Landschaft vorliegt. Da der geographische Ausgangspunkt des Autors Österreich ist, haben deutschsprachige Literatur und Programme einen stärkeren Einfluss auf die Arbeit.

Weiters wurden für die Experteninterviews Teilnehmer gewählt, welche in Österreich bei österreichischen Unternehmen arbeiten. Die Aussagen haben vor allem national, aber aufgrund ihrer Erfahrungen mit internationalen Bauprojekten punktuell auch international Gültigkeit. Durch die geringe Anzahl der Interview-Partner müssen die Aussagen als einzelne Meinungen gesehen und die Resultate können nicht generalisiert werden. Einen weiteren Einfluss haben die unterschiedlichen Positionen, welche die Fachexperten in den Unternehmen inne haben. Auch die Größe der Unternehmen der Interview-Partner variiert erheblich.

Die Interviews hatten in Summe eine sehr ähnliche Dauer, jedoch die Länge der Antworten je Frage unterschieden sich teilweise signifikant, wodurch eine Variation des Informationswertes vorliegt. Durch den unterschiedlichen Erfahrungsschatz und die unterschiedlichen Ausbildungen haben die Gesprächspartner einen sich voneinander unterscheidenden Zugang zur Thematik.

## 6.4 Ausblick

Während der Bearbeitung des Themas sind weiterführende Fragen aufgetreten, welche in einer anschließenden Forschung behandelt werden könnten. Diesbezüglich ergeben sich Fragestellungen, die ergänzend oder aufbauend im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit stehen. Nachdem die meisten verwendeten Programme nicht spezifisch für den Tunnelbau erstellt sind, kann die Frage nach einem Vergleich der Open-BIM-Tauglichkeit zwischen Hochbau und Tiefbau gestellt werden. Anschließend daran ergibt sich die Frage, ob die Möglichkeiten des Datentransfers von der Art des Bauprojekts abhängen.

Aus den Interviews ging hervor, dass im internationalen Raum der Tunnelbau teilweise schon digitalisierter ist. Ein Vergleich sowohl der gesetzlichen Vorschriften als auch der Anwendung in der Praxis im Zusammenhang mit der BIM im Tunnelbau wäre von Interesse. Dadurch kann der Entwicklungsstand global eingeordnet werden. Es ermöglicht den Beteiligten, sich anhand der gegenseitigen Erfahrungen zu orientieren und gemeinsam von Entwicklungen zu profitieren. Die gegenwärtige Digitalisierung im Bauwesen wird mit der BIM-Methode realisiert. Durch die Entwicklung der künstlichen Intelligenz könnten jedoch neue Planungsansätze entstehen. Es stellt sich die Frage, welches Potential die künstliche Intelligenz im Tunnelbau hat und ob die BIM-Methode dadurch abgelöst werden kann.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufgabenbereich der BIM Planung . . . . .	5
2.2	Einteilung der verschiedenen BIM-Methoden . . . . .	6
2.3	Zusammenhang zwischen Fachmodellen und Gesamtmodell . . . . .	7
2.4	BIM Dimensionen . . . . .	9
2.5	Zeitliche Entwicklung des IFC-Formats . . . . .	10
2.6	API Funktionsweise . . . . .	12
3.1	Tunnelmodell InfraWorks 360 . . . . .	17
3.2	Microsoft Project Gantt-Diagramm . . . . .	21
3.3	Tunnelmodell Navisworks Manage . . . . .	26
3.4	Tunnelmodell BIM Vision . . . . .	27
3.5	Kompatibilität BIMcollab Cloude . . . . .	29
3.6	Tunnelquerschnitt itasca 3DEC . . . . .	34
3.7	Spannungsanalyse einer Tunnelschale in RS2 . . . . .	36
3.8	Baugrundmodell Leapfrog Works . . . . .	37
3.9	Visuell programmiertes Dynamo Skript . . . . .	38
3.10	Schichtaufbau Geotechnical Modeller . . . . .	39
3.11	Tunnelmodell Fides Infrastructure Toolbox . . . . .	40
3.12	Graphische Algorithmus Programmierung in McNeel Grasshopper . . . . .	41
3.13	Twinmotion visualisierter Straßentunnel . . . . .	47

# Tabellenverzeichnis

3.1	Kompatible Datenformate in Autodesk AutoCAD . . . . .	16
3.2	Kompatible Datenformate in Autodesk Civil 3D . . . . .	16
3.3	Kompatible Datenformate in Autodesk InfraWorks 360 . . . . .	18
3.4	Kompatible Datenformate in Autodesk Revit . . . . .	19
3.5	Kompatible Datenformate in McNeel Rhinoceros 3D . . . . .	20
3.6	Kompatible Datenformate in ib-data ABK8 . . . . .	21
3.7	Kompatible Datenformate in Microsoft Projekt . . . . .	22
3.8	Kompatible Datenformate in Nevaris Auer Success . . . . .	23
3.9	Kompatible Datenformate in RIB iTWO . . . . .	24
3.10	Kompatible Datenformate in Autodesk BIM 360 . . . . .	25
3.11	Kompatible Datenformate in Autodesk Navisworks . . . . .	27
3.12	Kompatible Datenformate in Datacomp BIM Vision . . . . .	28
3.13	Kompatible Datenformate in Kubus BIMcollab Cloude . . . . .	29
3.14	Kompatible Datenformate in Kubus BIMcollab Zoom . . . . .	30
3.15	Kompatible Datenformate in Nemetschek Solibri . . . . .	31
3.16	Kompatible Datenformate in Geoconsult TUGIS . . . . .	32
3.17	Kompatible Datenformate in Geodata Eupalinos . . . . .	33
3.18	Kompatible Datenformate in Geodata Kronos . . . . .	33
3.19	Kompatible Datenformate in Rocscience RS2 . . . . .	36
3.20	Kompatible Datenformate in Sequent Leapfrog Works . . . . .	37
3.21	Kompatible Datenformate in Autodesk ReCap Pro . . . . .	44
3.22	Kompatible Datenformate in CloudeCompare . . . . .	45
3.23	Kompatible Datenformate in Dassault Systèmes Abaqus . . . . .	46
3.24	Kompatible Datenformate in Epic Games Twinmotion . . . . .	47
4.1	Befragte Fachexperten der Interviewreihe . . . . .	48
5.1	Eignung für den Tunnelbau in der Kategorie Bauwerksmodellierung . . . . .	54
5.2	Eignung für den Tunnelbau in der Kategorie Kosten- und Terminplanung . . . . .	54
5.3	Eignung für den Tunnelbau in der Kategorie Koordination und Viewer . . . . .	54
5.4	Eignung für den Tunnelbau in der Kategorie Geologie und Geotechnik . . . . .	55
5.5	Eignung für den Tunnelbau in der Kategorie Programmiererweiterungen . . . . .	55
5.6	Eignung für den Tunnelbau in der Kategorie Sonstige Programme . . . . .	56
5.7	Open-BIM Tauglichkeit in der Kategorie Bauwerksmodellierung . . . . .	57
5.8	Open-BIM Tauglichkeit in der Kategorie Kosten- und Terminplanung . . . . .	57
5.9	Open-BIM Tauglichkeit in der Kategorie Koordination und Viewer . . . . .	58
5.10	Open-BIM Tauglichkeit in der Kategorie Geologie und Geotechnik . . . . .	58
5.11	Open-BIM Tauglichkeit in der Kategorie Sonstige Programme . . . . .	59
5.12	Erweiterbarkeit der Programme aus der Kategorie Bauwerksmodellierung . . . . .	60
5.13	Erweiterbarkeit der Programme aus der Kategorie Kosten- und Terminplanung . . . . .	60
5.14	Erweiterbarkeit der Programme aus der Kategorie Koordination und Viewer . . . . .	61
5.15	Erweiterbarkeit der Programme aus der Kategorie Programmiererweiterungen . . . . .	61



5.16 Erweiterbarkeit der Programme aus der Kategorie Sonstige Programme . . . . .	62
---	----

# Literatur

- [1] D. Adam. *Skript — Fels- und Tunnelbau*. 2016. URL: [https://www.igb.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-grundbau/Diverse/Lehre/Fels-Tunnelbau/03.\\_Tunnelbau\\_im\\_Festgestein\\_und\\_Lockergestein\\_\\_2016\\_.pdf](https://www.igb.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-grundbau/Diverse/Lehre/Fels-Tunnelbau/03._Tunnelbau_im_Festgestein_und_Lockergestein__2016_.pdf) (Zugriff am 05.06.2023).
- [2] P. Adam. „BIM im Infrastrukturbau / Baubetriebliche Modellierung“. de. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, Feb. 2020.
- [3] S. Alzeer. „Meistere dein Issue Management“. de. In: *VDI-Bautechnik Jahresausgabe* (2018).
- [4] D. Arbeitskreis. „Empfehlung Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten“. In: Aug. 2022. URL: [https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec5/2022-08\\_DAUB\\_BIT\\_Modellanforderungen\\_T2\\_Informationmanagement\\_Rec\\_DE.pdf](https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec5/2022-08_DAUB_BIT_Modellanforderungen_T2_Informationmanagement_Rec_DE.pdf) (Zugriff am 05.06.2023).
- [5] ASI. *Building Information Modeling (BIM)*. 2023. URL: <https://www.austrian-standards.at/de/themengebiete/bau-immobilien/building-information-modeling/alles-zu-bim> (Zugriff am 04.06.2023).
- [6] ASI. *ÖNORM B 2203-2, Untertagebauarbeiten Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb*. März 2023.
- [7] H. Astour und H. Strotmann. *Lehrbuch Grundlagen der BIM-Arbeitsmethode: Fragen, Übungen, Fallbeispiele*. Wiesbaden: Springer, 2022. URL: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-658-37239-2> (Zugriff am 13.04.2023).
- [8] Autodesk. *AutoCAD 2021 Hilfe Export*. 2021. URL: <https://help.autodesk.com/view/ACD/2021/DEU/?guid=GUID-A72DB257-3410-4792-B548-6B9FC1DED72B> (Zugriff am 26.03.2023).
- [9] Autodesk. *AutoCAD Platform Technologies — Autodesk Developer Network*. 2023. URL: <https://www.autodesk.com/developer-network/platform-technologies/autocad> (Zugriff am 03.04.2023).
- [10] Autodesk. *AutoCAD: 2D- und 3D-CAD-Software*. 2023. URL: <https://www.autodesk.de/products/autocad/overview> (Zugriff am 25.02.2023).
- [11] Autodesk. *Autodesk Civil 3D Hilfe — Collaboration for Civil 3D*. 2023. URL: <https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2023/DEU/?guid=GUID-365B4577-CE4B-475A-AA40-BDAB0C13066E> (Zugriff am 03.04.2023).
- [12] Autodesk. *Autodesk Civil 3D Hilfe APIs*. 2023. URL: <https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2023/DEU/?guid=GUID-1FC5774A-14EB-48CC-8A0A-FA983E8B9703> (Zugriff am 03.04.2023).
- [13] Autodesk. *Autodesk Knowledge Network InfraWorks — Informationen zu Tunnelentwürfen*. 2023. URL: <https://knowledge.autodesk.com/de/support/infraworks/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/DEU/InfraWorks-BridgeDesign/files/GUID-AC291BFC-224D-48BF-88B5-240006F65959-htm.html> (Zugriff am 11.02.2023).

- [14] Autodesk. *Autodesk ReCap Help — Publish and Share Data*. 2023. URL: [https://help.autodesk.com/view/RECAP/ENU/?guid=Reality\\_Capture\\_Publish\\_and\\_Share\\_Data\\_html](https://help.autodesk.com/view/RECAP/ENU/?guid=Reality_Capture_Publish_and_Share_Data_html) (Zugriff am 11.02.2023).
- [15] Autodesk. *BIM 360 API*. 2023. URL: <https://aps.autodesk.com/en/docs/bim360/v1/overview/introduction/> (Zugriff am 04.04.2023).
- [16] Autodesk. *BIM 360 Help — What Is Autodesk® BIM 360?* 2023. URL: <https://help.autodesk.com/view/BIM360D/ENU/?guid=GUID-A4AF6DE0-3BE4-4CF4-9C84-C780A870D5E2> (Zugriff am 26.02.2023).
- [17] Autodesk. *BIM 360 Hilfe — Unterstützte Dateien*. 2023. URL: <https://help.autodesk.com/view/BIM360D/DEU/?guid=GUID-0E5E18BC-343A-47FC-B921-BDD1A40DA9F4> (Zugriff am 04.04.2023).
- [18] Autodesk. *Civil 3D 2022 — What is the Geotechnical Modeler?* Okt. 2022. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/civil-3d/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2022/ENU/Civil3D-GeoTech/files/Civil3D-GeoTech-What-Is-the-Geotechnical-Modeller-html.html> (Zugriff am 16.02.2023).
- [19] Autodesk. *Civil 3D Software — Preise ansehen & Civil 3D 2022 kaufen*. 2022. URL: <https://www.autodesk.de/products/civil-3d/overview> (Zugriff am 10.01.2023).
- [20] Autodesk. *Exportieren von Modelldaten — InfraWorks 360*. 2021. URL: <https://knowledge.autodesk.com/de/support/infracworks/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/DEU/InfraWorks-UserHelp/files/GUID-2195722A-37BD-4054-A7B2-FF7C24BD08B7-htm.html> (Zugriff am 11.02.2023).
- [21] Autodesk. *Gemeinsame Verwendung von Daten — Civil 3D 2023 — Autodesk Knowledge Network*. 2022. URL: <https://knowledge.autodesk.com/de/support/civil-3d/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2023/DEU/Civil3D-UserGuide/files/GUID-5A845EBC-E412-4533-ADE0-1564B81245C8-htm.html> (Zugriff am 12.01.2023).
- [22] Autodesk. *InfraWorks — Informationen zur Zusammenarbeit*. 2023. URL: <https://help.autodesk.com/view/INFMDR/DEU/?guid=GUID-341CC6DF-B492-4116-A2C4-6D35BFA2EB09> (Zugriff am 03.04.2023).
- [23] Autodesk. *InfraWorks: Modellieren Sie Gebäude- und Infrastrukturentwurfskonzepte im realen Kontext*. 2023. URL: <https://www.autodesk.de/products/infracworks/overview> (Zugriff am 11.02.2023).
- [24] Autodesk. *Introducing the InfraWorks 360 API — Autodesk University*. 2014. URL: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Introducing-InfraWorks-360-API-2014#handout> (Zugriff am 11.02.2023).
- [25] Autodesk. *Kompatible CAD-Anwendungen — Autodesk Navisworks 2023*. 2023. URL: <https://knowledge.autodesk.com/de/support/navisworks-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2023/DEU/Navisworks/files/GUID-12F0A4BF-CECD-4597-A916-983BD33ABABF-htm.html> (Zugriff am 11.02.2023).
- [26] Autodesk. *Navisworks — 3D-Modellprüfung, Koordination und Kollisionserkennung*. 2023. URL: <https://www.autodesk.de/products/navisworks/overview> (Zugriff am 11.02.2023).
- [27] Autodesk. *Navisworks Developer Center*. 2023. URL: <https://www.autodesk.com/developer-network/platform-technologies/navisworks> (Zugriff am 04.04.2023).

- [28] Autodesk. *Navisworks Hilfe — Kompatible CAD-Anwendungen*. 2023. URL: <https://help.autodesk.com/view/NAV/2023/DEU/?guid=GUID-12FOA4BF-CECD-4597-A916-983BD33ABABF> (Zugriff am 04. 04. 2023).
- [29] Autodesk. *ReCap Pro — Digitalisierung physischer Gegebenheiten*. 2023. URL: <https://www.autodesk.de/products/recap/overview> (Zugriff am 10. 02. 2023).
- [30] Autodesk. *Revit 2022 — What Can You Do with the Revit Platform API?* 2022. URL: [https://help.autodesk.com/view/RVT/2022/DEU/?guid=Revit\\_API\\_Revit\\_API\\_Developers\\_Guide\\_Introduction\\_Getting\\_Started\\_Welcome\\_to\\_the\\_Revit\\_Platform\\_API\\_What\\_Can\\_You\\_Do\\_with\\_the\\_Revit\\_Platform\\_API\\_html](https://help.autodesk.com/view/RVT/2022/DEU/?guid=Revit_API_Revit_API_Developers_Guide_Introduction_Getting_Started_Welcome_to_the_Revit_Platform_API_What_Can_You_Do_with_the_Revit_Platform_API_html) (Zugriff am 17. 12. 2022).
- [31] Autodesk. *Revit: BIM-Software für Planer, Bauunternehmer und ausführende Unternehmen*. 2023. URL: <https://www.autodesk.de/products/revit/overview> (Zugriff am 14. 12. 2022).
- [32] Autodesk. *Welche Formate können aus Revit exportiert werden?* Mai 2021. URL: <https://www.autodesk.de/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/DEU/Revit-Export-format.html> (Zugriff am 03. 04. 2023).
- [33] BIMcollab. *File types supported by BIMcollab ZOOM*. 2022. URL: <https://helpcenter.bimcollab.com/portal/en/kb/articles/file-types-supported-by-bimcollab-zoom> (Zugriff am 04. 04. 2023).
- [34] BIMcollab. *Modellvalidierung leicht gemacht - BIMcollab ZOOM*. 2023. URL: <https://www.bimcollab.com/de/products/bimcollab-zoom-b> (Zugriff am 08. 02. 2023).
- [35] BIMcollab. *Verwalten Sie BIM-Probleme auf die effizienteste Weise - BIMcollab Cloud*. 2023. URL: <https://www.bimcollab.com/de/products/bimcollab-cloud> (Zugriff am 06. 02. 2023).
- [36] BIMvision. *Über BIMvision*. 2023. URL: <https://bimvision.eu/de/uber-bimvison/> (Zugriff am 12. 02. 2023).
- [37] A. Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, Hrsg. *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer, 2021. URL: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-658-33361-4> (Zugriff am 03. 12. 2022).
- [38] K. Chmelina und K. Rabensteiner. „Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit auf Untertagebaustellen durch den Einsatz automatisierter Mess- und Alarmsysteme – Ausführungsbeispiele“. de. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 155.4 (Apr. 2010), S. 170–174. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-010-0556-9> (Zugriff am 01. 02. 2023).
- [39] K. Chmelina. *Funktionsumfang Open BIM - Geodata, persönliche Kommunikation*. Deutsch. März 2023.
- [40] J. Claussen, F. Dawid und D. Jankowski. *Aufnehmen, Abtippen, Analysieren: Wegweiser zur Durchführung von Interview und Transkription*. ger. 1. Auflage. Norderstedt, 2020. ISBN: 978-3-7504-7005-7.
- [41] S. Cudrigh-Maislinger, S. Hruschka, C. Niedermoser, N. Torggler und P. Steiner. „Karawanken Tunnel northern section, conception and execution of a BIM pilot project“. en-de. In: *Geomechanics and Tunneling* 13.2 (2020), S. 178–190. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/geot.201900072> (Zugriff am 28. 01. 2023).
- [42] ib-data. *ABK Bausoftware*. 2023. URL: <https://www.abk.at/> (Zugriff am 24. 02. 2023).
- [43] R. Diehl. *Funktionsumfang Open BIM, persönliche Kommunikation*. März 2023.

- [44] Duden. *Plug-in — Duden*. de. 2023. URL: [https://www.duden.de/rechtschreibung/Plug\\_in](https://www.duden.de/rechtschreibung/Plug_in) (Zugriff am 05.06.2023).
- [45] N. Eder. „3D BIM Ausschreibungsmodell“. Deutsch. Masterarbeit. Leoben: University of Leoben, 2022. URL: [https://pure.unileoben.ac.at/portal/en/publications/3d-bim-ausschreibungsmodell\(d5c7bff3-950f-4075-b3a5-3d2d60add40e\).html](https://pure.unileoben.ac.at/portal/en/publications/3d-bim-ausschreibungsmodell(d5c7bff3-950f-4075-b3a5-3d2d60add40e).html) (Zugriff am 14.12.2022).
- [46] H. Ehrbar. „BIM bei der Deutschen Bahn“. de. In: (2016). URL: [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igt/tunneling-dam/kolloquien/2016/Ehrbar\\_BIM\\_bei\\_der\\_Deutschen\\_Bahn\\_Herausforderungen\\_fur\\_den\\_digitalisierten\\_Infrastrukturbau\\_uber-\\_und\\_untertag\\_Version\\_2.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igt/tunneling-dam/kolloquien/2016/Ehrbar_BIM_bei_der_Deutschen_Bahn_Herausforderungen_fur_den_digitalisierten_Infrastrukturbau_uber-_und_untertag_Version_2.pdf) (Zugriff am 02.03.2023).
- [47] M. Elstner. „Use cases of Extended Reality in the construction industry“. en. Masterarbeit. Schweden: LAB University of Applied Sciences, 2020. URL: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/291750/Elstner\\_Michael.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/291750/Elstner_Michael.pdf?sequence=2&isAllowed=y) (Zugriff am 16.03.2023).
- [48] M. Z. Emad, M. U. Khan, M. A. Raza, S. A. Saki, M. Aijaz und M. U. Tahir. „Optimum Design of Half Tunnels for Transportation in the Himalayas“. en. In: *Transportation Infrastructure Geotechnology* 9.1 (Feb. 2022), S. 101–116. URL: <https://doi.org/10.1007/s40515-021-00162-x> (Zugriff am 10.03.2023).
- [49] Epic-Games. *Motorway Tunnel in Environments - UE Marketplace*. 2021. URL: <https://www.unrealengine.com/marketplace/en-US/product/motorway-tunnel> (Zugriff am 16.03.2023).
- [50] Epic-Games. *Twinmotion Plugins Supports Files*. 2023. URL: <https://www.twinmotion.com/en-US/plugins> (Zugriff am 16.03.2023).
- [51] C. Exinger, G. Mülitzer, R. Felsner, J. Lemmerer, R. Matt und E. Griesser. „BIM pilot project Granitztal tunnel chain – Development of data structures for tunnel structure and track superstructure“. en. In: *Geomechanics and Tunneling* 11.4 (2018). eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/geot.201800022>, S. 348–356. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/geot.201800022> (Zugriff am 28.01.2023).
- [52] Fides. *FIDES DV-Partner - FIDES Infrastructure Toolbox*. 2023. URL: <https://www.fides-dvp.de/bim/loesungen/ingenieurbau/fides-infrastructure-toolbox/> (Zugriff am 12.02.2023).
- [53] W. Frenz, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft*. de. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-58474-3> (Zugriff am 02.12.2022).
- [54] T. W. Frick. *Von Industrie 1.0 bis 4.0 - Industrie im Wandel der Zeit*. de. Juli 2022. URL: <https://industrie-wegweiser.de/von-industrie-1-0-bis-4-0-industrie-im-wandel-der-zeit/> (Zugriff am 03.12.2022).
- [55] G. Fröch, W. Gächter, A. Tautschnig und G. Specht. „Merkmalsserver im Open-BIM-Prozess“. de. In: *Bautechnik* 96.4 (2019), S. 338–347. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bate.201800092> (Zugriff am 03.12.2022).
- [56] R. Galler, E. Schneider, P. Bonapace, B. Moritz und M. Eder. „The New Guideline NATM – The Austrian Practice of Conventional Tunnelling“. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 154.10 (Okt. 2009), S. 441–449. (Zugriff am 05.06.2023).

- [57] Geodata. *Geodata - Eupalinos*. 2022. URL: <https://www.geodata.com/produkte/eupalinos/> (Zugriff am 01.02.2023).
- [58] Geodata. *Kronos - Datenintegrationsplattform für den Tunnelbau*. 2018. URL: <https://www.geodata.com/produkte/kronos/> (Zugriff am 01.02.2023).
- [59] V. Georgoula. „Development of an Autodesk Revit Addin for the Parametric Modeling of Bridge Abutments for BIM in Infrastructure“. en. Masterarbeit. München: Technische Universität München, März 2019. URL: [https://publications.cms.bgu.tum.de/theses/2019\\_Georgoula\\_Vilgertshofer.pdf](https://publications.cms.bgu.tum.de/theses/2019_Georgoula_Vilgertshofer.pdf) (Zugriff am 31.01.2023).
- [60] D. Girardeu-Monteau. *CloudCompare*. 2022. URL: <https://www.danielgm.net/cc/> (Zugriff am 08.02.2023).
- [61] D. Girardeu-Monteau. *CloudCompare - Supported file formats*. 2021. URL: [https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/FILE\\_I/O](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/FILE_I/O) (Zugriff am 08.04.2023).
- [62] G. Goger. *Skript — Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau*. Wien: Technisches Universität Wien, 2022.
- [63] itasca Group. *Program Guide — 3DEC 7.0 documentation*. 2023. URL: <https://docs.itascacg.com/3dec700/common/docproject/source/manual/scripting/python/doc/itasca.html?node4369> (Zugriff am 07.04.2023).
- [64] itasca Group. *Software Products - 3DEC*. 2023. URL: <https://www.itascacg.com/software/3DEC> (Zugriff am 21.02.2023).
- [65] M. Häcker. „BIM Collaboration Format - Theorie und Praxis“. Deutsch. Diss. Reutlingen: Hochschule Reutlingen, Mai 2022. URL: <https://d-nb.info/1258712148/34#page=143> (Zugriff am 05.04.2023).
- [66] T. Hakoda, S. Nishiyama, T. Omori, T. Okumura, M. Narusawa und N. Yabuki. „Integration of 3D models of structures and geological composition as an underground infrastructure model“. en. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 703.1 (März 2021), S. 012027. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/703/1/012027> (Zugriff am 05.03.2023).
- [67] B. Han und F. Leite. „Generic extended reality and integrated development for visualization applications in architecture, engineering, and construction“. en. In: *Automation in Construction* 140 (Aug. 2022), S. 12. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580522002023> (Zugriff am 16.03.2023).
- [68] J. Ka Yi Chiu, T. F. Hansen und T. Wetlesen. „Norwegian tunnel excavation: Increasing digitalisation in all operations“. In: *Geomechanics and Tunneling* 15.2 (2022), S. 182–189. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/geot.202100072> (Zugriff am 03.06.2023).
- [69] N. Kadhim, A. D. Mhmood und A. H. Abd-Ulabbas. „The creation of 3D building models using laser-scanning data for BIM modelling“. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1105.1 (Juni 2021), S. 012101. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1105/1/012101> (Zugriff am 10.02.2023).
- [70] M. Löffler. „Evaluierung von 3D-BIM-Software für den Tunnelbau“. Diss. University of Leoben, 2017. URL: [https://pure.unileoben.ac.at/portal/en/publications/evaluierung-von-3dbimsoftware-fur-den-tunnelbau\(6ca31e96-2812-46f6-a046-fa0c53e72be2\).html](https://pure.unileoben.ac.at/portal/en/publications/evaluierung-von-3dbimsoftware-fur-den-tunnelbau(6ca31e96-2812-46f6-a046-fa0c53e72be2).html) (Zugriff am 14.12.2022).
- [71] F. Lourenzi. „BCFViewer – BIM Collaboration Format tool development“. In: *33. Forum Bauinformatik* (2022). (Zugriff am 08.02.2023).

- [72] L. Luginger. „BIM-gestützte Simulation und Validierung einer Bauablaufplanung“. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, Jan. 2018. URL: [https://publications.cms.bgu.tum.de/theses/2018\\_Luginger\\_Bachelorthesis.pdf](https://publications.cms.bgu.tum.de/theses/2018_Luginger_Bachelorthesis.pdf) (Zugriff am 02.03.2023).
- [73] M. Lukas. „TUGIS - Fallbeispiel der digitalen Erfassung von geologischen und geotechnischen Informationen zur Integrationsverbesserung“. Masterarbeit. Leoben: Montan Universität Leoben, Okt. 2022.
- [74] S. Ma. „Entwicklung einer ereignisdiskreten Simulation auf Basis von BIM“. Masterarbeit. München: Technischen Universität München, 2021. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/1620120> (Zugriff am 08.02.2023).
- [75] P.-M. Mayer, S. Frodl und F. Hegemann. „BIM als Prozess im Tunnelbau“. In: *Geomechanics and Tunnelling* 9.6 (2016), S. 684–695. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/geot.201600051> (Zugriff am 04.03.2023).
- [76] P. Mayring. *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*. ger. 12., überarbeitete Auflage. Weinheim Basel: Beltz, 2015.
- [77] A. Mazak-Huemer, G. Goger und A. Bender. „Die „Neue Österreichische Tunnelbaumethode“ im Lichte der Digitalisierung“. In: *Bauingenieur* Ausgabe 5 (Mai 2022), S. 131–140. (Zugriff am 20.07.2023).
- [78] A. Mazak-Huemer, R. Galler, R. Wenighofer, M. Vierhauser und C. Huemer. „BIM-basierte digitale Transformation im Untertagebau anhand von zwei anwendungsorientierten Forschungsprojekten“. de. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 165.12 (Dez. 2020), S. 658–665. (Zugriff am 22.07.2023).
- [79] McNeel. *Food4Rhino*. 2023. URL: <https://www.food4rhino.com/en/browse> (Zugriff am 05.03.2023).
- [80] R. McNeel. *Rhinoceros Eigenschaften*. 2023. URL: <https://www.rhino3d.com/features/> (Zugriff am 05.03.2023).
- [81] R. McNeel. *Rhinoceros Unterstützte Dateiformate*. 2023. URL: <https://www.rhino3d.com/features/file-formats/> (Zugriff am 03.04.2023).
- [82] O. Melnyk, J. Raab und F. Lulei. „ÖNORM B 2203-1 as a Supplement to FIDIC Emerald Book in Conventional Tunnel Construction“. In: *Buildings* 13.7 (2023). ISSN: 2075-5309. DOI: 10.3390/buildings13071837.
- [83] M. Mett, H. Kontrus und J. Steinkühler. „Ableitung geologischer Trennflächen aus Punktwolken - Erfahrungen aus dem Tunnelneubau“. In: (Feb. 2021).
- [84] Microsoft. *Projektmanagementsoftware — Microsoft Project*. 2023. URL: <https://www.microsoft.com/de-at/microsoft-365/project/project-management-software> (Zugriff am 02.03.2023).
- [85] H. Mödlhammer. „Numerical Methods for Tunneling using ABAQUS and Investigations of Long-TimeEffects of the Shotcrete Shell and its Impact on the Combined Support System“. Masterarbeit. University of Leoben, 2011. URL: [https://pure.unileoben.ac.at/portal/en/publications/numerical-methods-for-tunneling-using-abaqus-and-investigations-of-longtimeeffects-of-the-shotcrete-shell-and-its-impact-on-the-combined-support-system\(baa89b1b-034a-461e-8241-1a2a445b469c\).html?customType=theses](https://pure.unileoben.ac.at/portal/en/publications/numerical-methods-for-tunneling-using-abaqus-and-investigations-of-longtimeeffects-of-the-shotcrete-shell-and-its-impact-on-the-combined-support-system(baa89b1b-034a-461e-8241-1a2a445b469c).html?customType=theses) (Zugriff am 20.03.2023).

- [86] S. K. Mohanty, O. Sigl, F. Krenn und G. Höfer-Öllinger. „Unterirdische Rohölkavernen in Indien“. In: *Geomechanics and Tunnelling* 6.5 (2013), S. 509–518. URL: <https://online.library.wiley.com/doi/abs/10.1002/geot.201300040> (Zugriff am 31. 01. 2023).
- [87] L. Müller. „Grundgedanken und Grundsätze der ‘Neuen Österreichischen Tunnelbauweise‘“. In: *Felsmechanik Kolloquium Karlsruhe* (1978).
- [88] MuM. *Mensch und Maschine BIM Booster*. 2023. URL: <https://www.mum.de/produkte/bim-booster> (Zugriff am 24. 02. 2023).
- [89] NEVARIS. *Auer Success X - Bausoftware*. Dez. 2021. URL: <https://bausoftware.com/success/> (Zugriff am 03. 03. 2023).
- [90] Pauser, Silberknoll, Galler, Wenighofer und Mazak-Huemer. „Endbericht — Interdisziplinäres BIM-basiertes Planungs-, Bau- und Betriebsprozessmanagement im Tunnelbau“. Deutsch. In: (Aug. 2021). (Zugriff am 13. 01. 2023).
- [91] S. Pernet. *Programmfunktionen Nevaris Auer Success, persönliche Kommunikation*. Feb. 2023.
- [92] N. Pfersche. „Prozessdarstellung der konventionellen Bauabrechnung im Baubetrieb mit BIM“. Deutsch. Masterarbeit. Wien: TU Wien, Feb. 2019. URL: <https://www.ub.tuwien.ac.at/dipl1/VL/62488.pdf> (Zugriff am 03. 03. 2023).
- [93] K. S. Ravshanovich. „Revit and Dynamo“. In: *Pindus Journal of Culture, Literature, and ELT* 2.1 (Jan. 2022), S. 57–63. URL: <https://literature.academicjournal.io/index.php/literature/article/view/215> (Zugriff am 03. 01. 2023).
- [94] J. Reichle. „Anwendungspotentiale von BIM im Bauprozessmanagement“. Masterarbeit. München: Technische Universität München, Apr. 2018.
- [95] RIB.Group. *RIB-iTWO für AVA, Planung, Kostenmanagement Modellbasierte Projektsteuerung*. 2022. URL: [https://www.rib-software.com/fileadmin/user\\_upload/service-support/downloads/itwo/RIB-iTWO-Planen-WEB\\_2022.pdf](https://www.rib-software.com/fileadmin/user_upload/service-support/downloads/itwo/RIB-iTWO-Planen-WEB_2022.pdf) (Zugriff am 04. 03. 2023).
- [96] RIB.Group. *Verbauwände Expert — RTwalls Expert*. 2023. URL: <https://www.rib-software.com/loesungen/tragwerksplanung/bauteilnachweise-im-grundbau/rtwalls-expert-vollversion-verbauwaende> (Zugriff am 22. 03. 2023).
- [97] Rocscience. *RS2 — 2D Geotechnical Finite Element Analysis*. 2023. URL: <https://www.rocscience.com/software/rs2> (Zugriff am 10. 03. 2023).
- [98] Rocscience. *RS2 Documentation — Import and Export*. 2023. URL: <https://www.rocscience.com/help/rs2/documentation/rs2-model/import-export/export/export-dxf> (Zugriff am 06. 04. 2023).
- [99] M. Romanovich, M. Kuzmenkova, V. Breskich und K. Kulakov. „Using the laser scanning method in the reconstruction of metro stations“. In: *Transportation Research Procedia*. International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 54 (Jan. 2021), S. 819–826. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146521003136> (Zugriff am 11. 02. 2023).
- [100] J. Sanjay Laxman. „Parametric Structural Modelling for Tunnels in Hard rock (to aid Decision-making during Early Phase of the Project)“. Masterarbeit. Berlin: Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Okt. 2020. URL: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/354084/Conrem\\_Master\\_Thesis\\_Sanjay\\_Joshi.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/354084/Conrem_Master_Thesis_Sanjay_Joshi.pdf?sequence=2&isAllowed=y) (Zugriff am 05. 03. 2023).



- [101] S. Schliski. „BIM-Based Code Compliance Checking of the Musterbauordnung“. Masterarbeit. München: Technische Universität München, Juli 2021. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/1621703> (Zugriff am 28. 01. 2023).
- [102] M. Schlundt, T. Bender, N. Bock, M. Härtig, M. Krämer, M. May, M. Mosig und M. Opić. „BIM im Immobilienbetrieb: Anwendung, Implementierung, Digitalisierungstrends und Fallstudien“. In: Hrsg. von M. May, M. Krämer und M. Schlundt. Springer Fachmedien, 2022. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-36266-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-658-36266-9_5) (Zugriff am 04. 06. 2023).
- [103] C. Schönfelder. *Muße – Garant für unternehmerischen Erfolg*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-17524-5> (Zugriff am 03. 12. 2022).
- [104] Seequent. *Leapfrog Works*. 2022. URL: <https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-works/> (Zugriff am 03. 06. 2023).
- [105] Seequent. *Leapfrog Works Supported Data Types & Formats*. 2022. URL: <https://www.seequent.com/help-support/supported-data-types-formats/leapfrog-works/> (Zugriff am 03. 06. 2023).
- [106] Sofistik. *Sofistik Bridge + Infrastructure Modeler*. 2023. URL: <https://www.sofistik.de/produkte/bim-cad/analytical-model-generator> (Zugriff am 29. 01. 2023).
- [107] Solibri-Germany. *Solibri — Unterstützte Dateiformate*. Dez. 2020. URL: <https://www.solibri.com/de/lernen/02-modelle-unterstuetzte-dateiformate> (Zugriff am 04. 04. 2023).
- [108] Solibri-Germany. *Solibri Office*. 2023. URL: <https://www.solibri.com/de/solibri-office> (Zugriff am 28. 01. 2023).
- [109] M.-M. Stadlmann. „Digitalisierung des Baubetriebs im Tunnelbau“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2018.
- [110] S. Steiner. „BIM Projektplanung im Tunnelbau“. de. Masterarbeit. Innsbruck: Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Sep. 2018.
- [111] H. Strotmann. „RIB iTWO — IFC- bzw. CPI-Daten laden“. In: *AVA – modellbasiert mit iTWO: unter Verwendung eines Revitmodells*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018, S. 21–27. (Zugriff am 04. 03. 2023).
- [112] D. Systèmes. *Abaqus Unified FEA*. 2023. URL: <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/abaqus/> (Zugriff am 20. 03. 2023).
- [113] G. Talarico. *Revit API Docs*. 2021. URL: <https://www.revitapidocs.com/> (Zugriff am 17. 12. 2022).
- [114] Twinmotion. *Getting Your Content Into Twinmotion — Twinmotion Documentation*. 2023. URL: <https://www.twinmotion.com/en-US/docs/UsingTwinmotion/GettingYourContentIntoTwinmotion> (Zugriff am 16. 03. 2023).
- [115] Twinmotion. *Installing the Datasmith Plugin for Revit*. 2023. URL: <https://www.twinmotion.com/en-US/docs/UsingTwinmotion/GettingYourContentIntoTwinmotion/DatasmithPlugins/UsingTheDatasmithPluginsWithRevit/installing-datasmith-for-revit> (Zugriff am 16. 03. 2023).
- [116] M. G. Viering und G. F. Bremer. „Innovatives Projektmanagement – 10 Erfolgsfaktoren zur Erreichung der Projektziele“. In: *Auf dem Weg zu einer nachhaltigen, effizienten und profitablen Wertschöpfung von Gebäuden: Grundlagen – neue Technologien, Innovationen und Digitalisierung – Best Practices*. Hrsg. von C. Jacob und S. Kukovec. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2022, S. 175–200. (Zugriff am 02. 03. 2023).

- [117] R. Wenighofer, N. Eder, V. Speckmoser, M. Villeneuve, L. Winkler und R. Galler. „Adaptive and parameterised 3D BIM model for the tunnel tender and excavation phase“. In: *Geomechanics and Tunnelling* 15.3 (2022), S. 272–278. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/geot.202100075> (Zugriff am 24. 02. 2023).
- [118] L. Wilfing und C. Boley. „Digitalisierung und BIM in der Geotechnik – Möglichkeiten und Herausforderungen“. In: *Bautechnik* 99.9 (2022), S. 698–705. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bate.202200060> (Zugriff am 03. 06. 2023).
- [119] L. Winkler, O. Melnyk und G. Goger. „Prerequisites for BIM-based invoicing in NATM projects“. en. In: *Geomechanics and Tunnelling* 15.3 (Juni 2022), S. 279–283. ISSN: 1865-7362, 1865-7389. DOI: 10.1002/geot.202100067. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/geot.202100067> (Zugriff am 01. 08. 2023).
- [120] M. Zaid, M. R. Sadique und M. M. Alam. „Blast Resistant Analysis of Rock Tunnel Using Abaqus: Effect of Weathering“. In: *Geotechnical and Geological Engineering* 40.2 (Feb. 2022), S. 809–832. URL: <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01927-4> (Zugriff am 20. 03. 2023).

# Anhang

## Transkript Interviews

### Interview Teilnehmer\*innen

#### Allgemeine Informationen zu den Experten bezüglich ihrer Erfahrung, der Position im Unternehmen und der Art der Projekte.

**Interview-Partnerin 1** Ich bin seit 5 Jahren BIM Managerin bei einem Planungsbüro und arbeite im Allgemeinen seit sieben Jahren mit BIM. Die von mir bearbeiteten Projekte waren bisher immer im Tiefbau, unter anderem zwei große Tunnelprojekte mit zehn und 13 Kilometern Länge.

**Interview-Partner 2** Ich habe neben dem Bauingenieurstudium zu arbeiten begonnen und bin mittlerweile seit 16 Jahren bei einem Planungsbüro beschäftigt. In den letzten fünf Jahren habe ich zwei große Tunnelprojekte als Projektleiter für die statisch konstruktive Planung in Doha abgewickelt.

**Interview-Partner 3** Ich bin seit 2004 in der Welt des Tunnelbaus tätig und arbeite seit sechs Jahren bei einer ausführenden Baufirma ebenfalls in diesem Bereich. Als Bereichsleiter des Innendienstes sind meine Aufgabenbereiche Akquisitionen, Arbeitsvorbereitung, Controlling und Marktrecherche. International wickeln wir in der Direktion auch Projekte im skandinavischen Raum und Projekte in Kanada sowie England ab, wobei dort die BIM Entwicklung schon fortgeschrittener ist. Planungsaufgaben und operative Ausführung werden dort in der Firma vereint. Ich konkret arbeite an der BIM Entwicklung, wobei wir BIM eher aus Eigeninteresse durchführen.

**Interview-Partner 4** Meine Position ist Teamleiter für das Team Modelling bei uns im Unternehmen, wo ich seit 26 Jahren arbeite. Neben der klassischen Planerstellung ist unsere Abteilung auch für die Erstellung von BIM Modellen zuständig. In meiner Laufbahn war ich auch bei vielen internationalen Projekten, beispielsweise in Singapur, Stuttgart und Sydney im Einsatz und habe dabei den ganzen Lebenszyklus eines Tunnelbauwerks kennengelernt. Die Projekte in meinem Bereich sind allgemein Hohlraumbau, wobei mit Eisenbahn- und Straßentunnel, U-Bahn Tunnel, Kanalprojekte und Kraftwerksprojekte die gesamte Bandbreite abgedeckt ist.

**Interview-Partner 5** Ich habe Bauwirtschaftsingenieurwesen studiert und acht Jahre als Bauleiter für ein deutsches Unternehmen, welches hauptsächlich für die deutsche Bahn baut, gearbeitet. Dort habe ich kleinere und mittlere Verkehrsstationen realisiert, unter anderem Maßnahmen zur Modernisierung mit Leistungen im Tiefbau und konstruktiven Ingenieurbau. 2015 bin ich das erste Mal mit der BIM Methodik in Berührung gekommen und wurde anschließend als Beauftragter im damaligen Unternehmen dafür eingeteilt. 2018 haben wir ein Pilot Projekt gestartet, indem wir ein Projekt, welches vom baulichen Umfang sehr übersichtlich war, nachmodelliert haben. Aufgrund des gestiegenen Interesses habe ich danach noch ein MBA-Studium an der TU

Wien absolviert und mich parallel hinsichtlich Building Smart Inhalte schulen und zertifizieren lassen. Im aktuellen Unternehmen bin ich seit Jänner 2023 als Experte für BIM Management tätig. Meine Aufgabe ist es, die strategische Implementierung der BIM-Methodik im gesamten Unternehmen voranzutreiben. In der konkreten Modellierung selbst bin ich nicht tätig.

## Allgemeine BIM-Themen

### In welchen Projektphasen sehen Sie das größte Potential der BIM Planung?

**Interview-Partnerin 1** Über den BIM Execution Plan werden die Inhalte und die Arbeitsmethoden des BIM Modells definiert. In welchen Projektphasen der Fokus liegt, ist je Projekt und Auftraggeber individuell, wobei eine klare Abtrennung zwischen den Phasen nicht gegeben ist.

**Interview-Partner 2** Grundsätzlich sehe ich das Potential in jeder Phase des Projekts, jedoch ist es vom Bauherren abhängig. Bauherren wollen den BIM Standard in ihre Projekte implementieren, jedoch ist die Bereitschaft, den planerischen Mehraufwand finanziell abzugelten, noch nicht immer vorhanden. Bei dem konkreten Projekt waren wir aber im Auftrag der ausführenden Baufirma und nicht vom Bauherren selbst engagiert. Wenn der Planer vom Bauherren direkt beauftragt wird, ist eine andere Herangehensweise hinsichtlich Kostenbereitschaft für die BIM Planung bemerkbar. Die ausführenden Firmen wollen nur die nötigsten BIM Bestandteile, um die Gesamtkosten auf ein Minimum zu reduzieren. Das Potential für die einzelnen Planungsphasen hängt nicht nur von der technischen Entwicklung ab. Ein wesentlicher Faktor ist die Kostenübernahme durch den Bauherrn und die geplante Verwendung des BIM Modells.

**Interview-Partner 3** Ich sehe seitens der Auftraggeber das größte Potential in der Planungsphase. Vorbereitungen hinsichtlich Informationen zu Statik und Geotechnik sind in der frühen Planungsphase relevant. Hinsichtlich Lebenszykluskosten und Baubetrieb sehe ich in BIM ein geringeres Potential. Die Betriebskosten eines Bauwerks kann ich in der Planungsphase direkt beeinflussen. Nur in der Planung selbst hat BIM einen echten Vorteil und auch Potential.

**Interview-Partner 4** Bei der AVA ist die Umsetzung mit BIM noch schwierig, da die Koppelungen im Tiefbau Sektor noch nicht funktionieren. Im Bereich der Statik habe ich gute Erfahrungen, da auch ein Austausch des 3D Modells mit dem Statiker erfolgt. Bei der elektrotechnischen Planung macht BIM auf einfachster Ebene, wie zum Beispiel Leitungsführungen, Sinn. In der Phase der Arbeitsvorbereitung ist sicher Potential vorhanden, weil die Materialien exakter bestellt werden können. Nachdem ein Projekt 95-97% der Gesamtzeit in Betrieb ist, sollten BIM Modelle auch für diesen geeignet sein.

**Interview-Partner 5** Meiner Meinung nach liegt das größte Potential definitiv im Betrieb. Betrachtet man die gesamte Lebensdauer eines Bauwerks, entfällt der größte Teil davon auf den Betrieb und somit entstehen dort auch die größten Folgekosten. Da ich bei einem Infrastruktur Betreiber beschäftigt bin, ist der Fokus auf Instandhaltung und Betrieb gerichtet. Die Struktur des BIM Modells muss schon in der Erstellungsphase auf die Bedürfnisse des zukünftigen Betreibers angepasst sein.

### Bringt der, im Vergleich zur konventionellen Planung, größere Planungsaufwand heute schon eine Kostenersparnis hinsichtlich der gesamten Projektkosten?

**Interview-Partnerin 1** Am Anfang ist es immer eine Hürde, die Modellierung auf ein gewisses Niveau zu heben. In einer frühen Projektphase bringt das BIM Modell mehr Aufwand als Nutzen

mit sich, aber über die gesamte Lebensdauer eines Bauwerks rentiert sich die BIM Planung aus finanzieller Sicht.

**Interview-Partner 2** Es ist fraglich, ob es auf rein finanzieller Ebene eine Ersparnis mit sich bringt, jedoch ist das Projekt durch das BIM Modell für alle Beteiligten anschaulicher. Wenn sich die Baufirma von Anfang an einbringt, können im Bauablauf sehr viele Missverständnisse, welche meist Kosten verursachen, verhindert werden. Der finanzielle Nutzen des Modells ist sehr vom Projekt abhängig, wobei im Tunnelbau ein reibungsfreier Bauablauf die BIM Planungskosten schätzungsweise wieder einspielen kann. Eine konkrete Kosten-Nutzen Analyse ist mir jedoch noch nicht untergekommen.

**Interview-Partner 3** Meiner Meinung nach ist das BIM Modell nicht mehr Arbeitsaufwand verglichen mit der konventionellen Planung. Wenn man die BIM Planung von Beginn an richtig macht, ist es sogar weniger Aufwand. Ein 2D Plan muss auch gezeichnet und bei Änderungen müssen zusammenhängende Pläne geändert werden. Ein Projekt, das bereits konventionell geplant wurde, und man erst in einer späteren Projektphase ein BIM Modell erstellt, verursacht natürlich Mehrkosten.

**Interview-Partner 4** Es gibt einen größeren Planungsaufwand in einer früheren Phase, dieser wird aber durch weniger Abstimmungsprobleme in einer späteren Phase kompensiert. Man muss Detailprobleme schon in Phase der Einreichplanung berücksichtigen, was es aber in Summe für alle effizienter macht. Wir arbeiten zur Zeit parallel mit 2D und 3D Planung, da ich aber den Wissensstand aus der 3D Planung auch für die 2D Planung heranziehen kann, rentiert sich das BIM Modell für uns auf jeden Fall.

**Interview-Partner 5** Das hängt stark von der Größe des planenden Unternehmens ab. Ein Unternehmen, welches erst die Kompetenzen hinsichtlich BIM aufbauen muss, hat definitiv einen Mehraufwand, welcher sich durch kürzere Planungs- oder Bauzeiten nicht egalieren lässt. Hingegen sind Unternehmen mit Erfahrung in diesem Bereich, welche das Modell von Anfang an verwenden, frühzeitiger in der Lage, eine Kostenersparnis zu erzielen. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass das Potential einer Kostenersparnis in der Planungsphase von der Erfahrung der Anwender abhängt, jedoch hochgerechnet auf die gesamte Nutzungsdauer eines Bauwerks sich die BIM Methodik immer amortisieren wird.

### **Ist die BIM Planung aufgrund der zunehmenden Komplexität von Bauwerken ein Muss oder ein zusätzlicher Service?**

**Interview-Partnerin 1** In Zukunft wird bei der Vergabe von großen Projekten das Arbeiten mit BIM von Auftraggeberseite eine Bedingung sein. Ohne der Verwendung des BIM Standards wird man keine großen Projekte bekommen. Es stellt sich daher die Frage von der technischen Seite nicht. Durch die immer komplexeren Bauwerke wird das Fehlerpotential größer und die Kommunikation komplizierter, wobei BIM Modelle Abhilfe schaffen können.

**Interview-Partner 2** Vor 20 Jahren wurden genauso Tunnel und hoch komplexe Brücken in AutoCAD geplant, daher funktioniert es grundsätzlich auch ohne BIM Planung. Ob es ein Muss ist, sei dahingestellt, die Zukunft sehe ich trotzdem in BIM. Wir im Büro verfolgen beispielsweise auch 3D Bewehrung, um bei hoch komplexen Projekten die Reihenfolge der Verlegung vorzugeben. Alleine mit den Plänen hätte die Baufirma die Bewehrung nicht verlegen können. Ein zusätzlicher

Nutzen für Bauherren ist der Wegfall eines Planarchivs. Da alle Projekt in 3D abgelegt sind, liegen für spätere Sanierungs- und Umbaumaßnahmen alle Informationen gebündelt vor. Für das Projekt in Doha wurde die gesamte Statik aus Wien berechnet und über das Modell kommuniziert. Die Vorgänge sind viel nachvollziehbarer und man erkennt Probleme früher. Detailprobleme, die man beispielsweise in AutoCAD übergehen kann, muss man in viel früheren Planungsphasen betrachten.

**Interview-Partner 3** Nein, als Muss sehe ich die BIM Planung nicht, jedoch ist sie umso sinnvoller je komplexer die Projekte werden, auch für Kollisionsprüfungen. Ein simpler Tunnel mit einem konsequenten Standard würde aber aus technischer Sicht keine BIM Planung benötigen. Im internationalen Umfeld geht es ohne 3D Modell schon in der Ausschreibungsphase nicht.

**Interview-Partner 4** Man sollte die BIM Planung nicht auf alle Bauwerke anwenden, aber in komplizierten Bereichen macht sie auf jeden Fall Sinn und ist dem Auftraggeber anzuraten. Der zusätzliche Service liegt sehr stark im Bereich Betrieb und Erhaltung und muss vom Auftraggeber frühzeitig erkannt werden. Bei vereinzelt schwierigen Details ist die BIM Planung ein Muss, um Missverständnisse und Kollisionen zu vermeiden.

**Interview-Partner 5** Ich sehe neben der steigenden Komplexität von Bauwerken auch den steigenden Mangel an Fachkräften als wesentlichen Faktor. Da es zukünftig durch den demografischen Wandel weniger Personen in den Unternehmen geben wird, welche beispielsweise statische Berechnungen durchführen können, muss in Zukunft die Effizienz steigen, um dem Workload gerecht zu werden. Ein Beispiel ist die regelbasierte Modellprüfung, welche einen Plan schneller als ein Mensch Prüfen kann und somit für mich eine sinnvolle Erweiterung darstellt. Ich sehe die fortschreitende Digitalisierung als einen wichtigen Schlüssel, um den steigenden Bedarf an Infrastruktur bewältigen zu können.

### **Ist eine BIM Planung für jedes Projekt sinnvoll, oder erst ab einer gewissen Bauwerksgröße bzw. Projektvolumen?**

**Interview-Partnerin 1** Im BIM Execution Plan ist der Detaillierungsgrad je nach Planungsphase definiert. Einfache Modelle können auch bei kleinen Projekten sinnvoll angewendet werden.

**Interview-Partner 2** Wir haben für eine Angebotsplanung für einen Tunnel in Tschechien ein primitives BIM Modell gemacht und es hatte auch schon in dieser Phase einen großen Nutzen, auch für die Baufirma. Das Problem ist, dass der zusätzliche Planungsaufwand auch etwas kostet, diese Kosten jedoch nicht immer weiterverrechenbar sind. Die Frage ist wie detailliert man die Planung macht, denn in frühen Planungsphasen können beispielsweise vereinfachte Modelle genutzt werden.

**Interview-Partner 3** Man wird nicht jedes Einfamilienhaus mit einer BIM Planung versehen. In der Sphäre von Projekten eines öffentlichen Auftraggebers mit einem Auftragswert größer als fünf Millionen Euro braucht es aber eine BIM Planung. Für öffentliche Infrastrukturprojekte, unabhängig von ihrer Größe, ist BIM sinnvoll.

**Interview-Partner 4** Bei beispielsweise einem langen Abwassertunnel sehe ich einen sinnvollen Anwendungsfall der BIM Planung für Knotenpunkte, wie Schächte mit Ausrüstungsgegenständen. An Stellen, wo viele Gewerke aufeinander treffen und erhöhter Abstimmungsbedarf vorliegt, ist

die BIM Planung nötig. Ich würde die Sinnhaftigkeit nicht anhand der Bauwerksgröße, sondern nach der Komplexität der Projekte einordnen.

**Interview-Partner 5** Im Generellen ergibt eine BIM Planung für jedes Bauwerk einen Mehrwert, aber nicht in jedem Umfang. In den AIA, also Auftraggeber-Informationen-Anforderungen, haben wir acht Anwendungsfälle definiert, welche je nach Objekt passend gewählt werden. Aus Sicht eines Infrastrukturbetreibers ist es ohnehin sinnvoll ein BIM Modell im Zuge eines Neubaus zu generieren, da ansonsten über Bestandserfassung mittels Laserscans die Daten aufgenommen werden müssen.

### **Wird die BIM Planung häufig als 3D Modell mit inkludierten Materialparametern genutzt oder werden Kosten und Terminplanung integriert und dadurch 4D und 5D Modelle erstellt?**

**Interview-Partnerin 1** Es hängt sehr vom Programm ab. Man kann in Revit sehr gut Materialien hinterlegen und Volumen auslesen, aber Termin- und Kostenplanung kann damit nicht durchgeführt werden. Dafür benötigt man andere Programme. Um ein 4D Modell inklusive Ablaufplanung zu erhalten, wird beispielsweise das Revit Modell mit dem Microsoft Projekt Terminplan in Navisworks verknüpft. Das ist eigentlich nur mit Open-BIM möglich, da man immer mehrere Programme benötigt. Die Terminplanung ist in der Praxis schon gängig, wobei Kosten seltener ins Modell integriert werden.

**Interview-Partner 2** Beim vorliegenden Projekt war ein 4D und 5D Modell von Seiten der Baufirma gewünscht, die Kostendarstellung wurde aber hauptsächlich für die eigene Abrechnung genutzt und nicht für den Bauherren.

**Interview-Partner 3** Im Tunnelbau in Österreich gibt es fast noch keine BIM Projekte außer diverse Pilot-Projekte. Meistens kommt ein 3D Modell mit Parametern zum Einsatz. Die BIM Standards für Kosten sind erst in der Entwicklung. Im Hochbau sind die Kosten- und Terminplanung schon im BIM Modell integriert.

**Interview-Partner 4** 4D und 5D Modelle haben wir bei uns im Büro nicht in Verwendung, aber Baufirmen haben unsere Modelle herangezogen, um eine Ablaufplanung daraus zu erstellen. In Zukunft wird die Terminplanung stärker integriert werden, hingegen die Kostenplanung sehe ich eher nur für interne Abrechnungen bei Baufirmen in Verwendung.

**Interview-Partner 5** Es werden definitiv viele 4D und 5D Modelle genutzt. Von der reinen 3D Darstellung hat man sich weiterentwickelt und ist mittlerweile viel mehr bei dem Punkt des Austausches von Informationen über das Modell angekommen.

### **Open BIM-Projektentwicklung**

#### **Wird in der Praxis tatsächlich ein BIM Modell zwischen den Fachplanern weitergegeben bzw. gleichzeitig darin gearbeitet, oder erstellt jeder sein eigenes?**

**Interview-Partnerin 1** Es kommt darauf an, ob Open- oder Closed-BIM verwendet wird. Ich denke im Tunnelbau ist Open-BIM ein Muss, weil die Aufgabenstellung nicht mit einem einzigen Programm lösbar ist. Die Linie zwischen Open- und Closed-BIM ist jedoch nicht immer so klar. Üblicherweise erhält man die Architektur als Grundlage von der Ausschreibung. Die BIM Koordinierung und das Management gibt Vorlagen und Abläufe vor, aber dann baut sich jeder

Projektbeteiligte sein Modell selbst. Die Einzelmodelle werden danach von einem BIM Manager zusammengeführt.

**Interview-Partner 2** Wir haben das letzte Projekt in Doha gemeinsam mit einer dänischen Firma geplant. In diesem Fall hat jeder sein eigenes Modell geplant und die Baufirma selbst hat die Modelle kombiniert. Gleichzeitiges Arbeiten in einem Modell über Systeme mit der Fähigkeit zur Interoperabilität ist bei uns nicht praktiziert worden.

**Interview-Partner 3** Über ein CDE (engl. Common Data Environment), egal ob von einem Drittanbieter oder von uns zur Verfügung gestellt, funktioniert der Datenaustausch am besten. Dabei gibt es aber noch viele Schnittstellen, die nicht definiert sind. Bei der Weitergabe der Modelle mittels IFC sind gewisse Verluste vorhanden. Die Zusammenarbeit in einem Modell findet intern schon statt.

**Interview-Partner 4** Man muss unterscheiden zwischen einer Planungs ARGE und einer Schnittstelle zwischen unterschiedlichen Fachplanern. In einer ARGE einigt man sich auf eine gemeinsame Software und gibt das native Dateiformat weiter. Dies geschieht auch über einen Sharepoint, wodurch keine Weitergabe erforderlich ist, sondern die Daten einfach für alle Verfügbar sind. Zwischen unterschiedlichen Fachplanern wird das Modell mittels IFC ausgetauscht.

**Interview-Partner 5** Für einen Planungsprozess steht am Anfang meist ein Umgebungsmodell zur Verfügung und daraus wird das Architektur- beziehungsweise Tragwerksmodell erstellt. Auf diesen geometrischen Grundlagen aufbauend, können die Fachplaner dann ihre spezifischen Modelle erstellen. Am Ende eines Projekts werden die einzelnen Fachmodelle von einer Gesamtkoordination wieder übereinandergelegt.

### Welche Form der Datenweitergabe wird am häufigsten verwendet?

**Interview-Partnerin 1** Am häufigsten wird eine online Plattform, oder Cloud Lösung verwendet, wo alles zentral gespeichert ist. Die BIM Modelle werden überwiegend im IFC Format abgelegt, da alle Programme darauf zugreifen können. Beim Projekt in Doha gab es keinen Server, und der Datenaustausch wurde per E-Mail gelöst, was aber problematisch war. Auch Internetdienste, die Datenaustausch ermöglichen, wie beispielsweise WeTransfer, sind keine gute Dauerlösung. Die automatische Protokollierung für eine zentrale Datenverwaltung ist wichtig um Änderungen nachvollziehen zu können. Ich denke in Zukunft wird eine Cloud Lösung für alle Projekte kommen.

**Interview-Partner 2** Beim letzten Projekt wurde viel mit Download Links verschickt.

**Interview-Partner 3** Die Datenweitergabe über eine CDE funktioniert am besten, wobei Zugriffsrechte und eine Dokumentation der Änderungen wichtig sind. Das Modell geben wir ungern als IFC Datei weiter. Wo fachübergreifende Planung statt findet, kann die Datenweitergabe als Datei funktionieren, hingegen bei einer integrierten Planung wird es schwieriger. Dort muss es eine Plattform für eine gemeinsame Datenumgebung geben.

**Interview-Partner 4** Über CDEs oder Sharepoints werden gegenwärtig die Daten für alle Projektbeteiligten verfügbar gemacht. Physische Speicher werden seit ungefähr 2020 nicht mehr verwendet, da die Netzwerke leistungsfähig genug geworden sind. Ein Datenaustausch mit mehreren Gigabyte funktioniert.



**Interview-Partner 5** Im Zentrum der Datenweitergabe steht die CDE, wobei es am Markt noch keine Software gibt, die alle Bereiche vollständig abdeckt. Ein Modell, welches den aktuellen Planungsstand wiedergibt, steht für alle Projektbeteiligten, zentral gespeichert, zur Verfügung. Das kann auch über einen Server oder eine Cloud Lösung realisiert werden.

### **Mit welchen Open-BIM Austauschformaten arbeiten Sie?**

**Interview-Partnerin 1** Das IFC Format ist am üblichsten, aber für spezielle Simulationen wurde das Modell von Revit nach Rhino überspielt und von dort in das Programm für die Flüssigkeitssimulation eingespielt. Da stößt IFC manchmal an seine Grenzen, aber in 70-90% der Fälle, wie Koordinierung, funktioniert IFC perfekt.

**Interview-Partner 2** IFC ist gängig, aber im Tunnelbau kommt es oft vor, dass man nach Speziallösungen suchen muss. Wünschenswert wäre ein universelles Dateiformat, welches für alle Programme verwendet werden kann. Derzeit funktioniert es noch nicht immer, aber es entwickelt sich stetig weiter.

**Interview-Partner 3** IFC.

**Interview-Partner 4** Open-BIM wird über das IFC Format ermöglicht, wobei im Standardfall die Version IFC 2x3 ausreicht.

**Interview-Partner 5** Das von Building Smart zertifizierte IFC-Format ist das gängigste, wobei wir auch das BCF-Format verwenden. Weiters beschäftigen wir uns mit dem IDS-Format, welches als Ergänzung zum IFC-Format verwendet werden soll.

### **Sind andere offene Austauschformate als IFC in Verwendung?**

**Interview-Partnerin 1** Nein.

**Interview-Partner 2** Ja aber keine konkreten, sondern je nach spezifischer Problemstellung. Im Tunnelbau muss man sich oft an Sonderlösungen herantasten.

**Interview-Partner 3** JSON kommt manchmal zur Anwendung.

**Interview-Partner 4** Nicht wirklich, teilweise kommt das Land-XML Format für Trassierungsdaten zum Einsatz.

**Interview-Partner 5** Wir halten uns hier stark an die gültigen Normen, sowie die Standards der Building Smart, damit die Open-BIM Methodik funktioniert.

### **Was sind die größten Hürden beim Datenaustausch?**

**Interview-Partnerin 1** Es gibt sehr viele individuelle Probleme. Die Lösung ist meistens die Verknüpfung unterschiedlicher Modelle in einem dritten Programm. Wenn die Daten nicht über einen Server sondern per Festplatte ausgetauscht werden, gehen manchmal Verknüpfungen verloren. Die größte Hürde ist der Austausch von großen Dateien.

**Interview-Partner 2** Das Hauptproblem ist die Dateigröße. Es ist nicht möglich gewesen, Daten mit einer Größe von rund einem Terabyte innerhalb von Österreich über das Internet auszutauschen. Als Lösung wurde dann eine Festplatte per Post verschickt. Große Datenmengen auszutauschen funktioniert noch immer nicht ohne physischen Speichern.

**Interview-Partner 3** Viele Kleinigkeiten, die große Auswirkungen haben, verhindern ein reibungsloses Funktionieren. Beim Zusammenführen unterschiedlicher Modelle liegen diese oft kilometerweit voneinander entfernt aufgrund unterschiedlicher Bezugskordinaten. Durch Ungenauigkeiten und Missgeschicke ist oft keine Konsistenz im Projekt vorhanden. Die Fehlerquelle ist dabei sehr oft der Mensch durch leicht vermeidbare Fehler. Bei einer As-Built-Dokumentation, zum Beispiel bei 3D-Scans, werden viele Gigabyte an Daten gesammelt, aber so aufbereitet, dass man sie übertragen kann.

**Interview-Partner 4** Ein Punkt ist die Aktualität der Daten, damit alle Nutzer auf dem gleichen Stand sind. Ein weiteres Problem sind nicht einheitliche Koordinatensysteme bei unterschiedlichen Modellen, wodurch beim Fusionieren von Modellen Abweichungen auftreten. Bei nativen Formaten sind manchmal unterschiedliche Programmversionen miteinander nicht kompatibel.

**Interview-Partner 5** Eine Datei des Formats .ifc ist schnell erstellt, jedoch können beim Exportieren viele Einstellungen gewählt werden, welche für eine vollständige Datenübertragung essenziell sind. Dieses Problem kann durch Standardisierung und gemeinsame Organisation behoben werden. Ein Datenverlust kann auch beim Überführen eines Projekts in die Betriebsphase aus einer CDE entstehen, wenn beispielsweise Verknüpfungen verloren gehen.

## Tunnelbauspezifisch

### Welche Programme verwenden Sie am häufigsten im gesamten Planungsablauf eines Tunnelprojekts?

**Interview-Partnerin 1** Revit, AutoCAD 3D, Civil 3D und Rhinoceros werden am häufigsten verwendet. Teilweise werden bestimmte Elemente in 2D zum Beispiel in AutoCAD vorgezeichnet und dann in Revit importiert. Auch wenn AutoCAD kein klassisches BIM Programm ist, liefert es oft die Grundlagen.

**Interview-Partner 2** Revit, Civil 3D und Rhinoceros sind die gängigsten Anwendungen bei uns.

**Interview-Partner 3** Autodesk Revit haben wir als Hauptprogramm in Verwendung. Bei sehr langen Tunnel Modellen stößt Revit an seine Grenzen und wir müssen das Modell in kleinere Teile aufteilen. Das Programm Autodesk Inventor verwenden wir ebenfalls, da es sehr parametrisiert und präzise arbeitet. In der Modellierungsphase werden damit Elemente als Grundlage für das Modell in Revit erstellt. Wir haben auch iTWO im Unternehmen in Verwendung.

**Interview-Partner 4** Wir verwenden AutoCAD in der klassischen Planproduktion und Autodesk Civil 3D, Autodesk Revit und ib-data ABK für die BIM Planung. AutoCAD hat den Vorteil, dass es weit verbreitet ist und reibungslos funktioniert. Ein Nachteil ist, dass ich kein IFC exportieren kann und ein Nachfolgeprogramm benötige, um daraus ein BIM Modell zu erstellen und den 3D Körper zu attribuieren. Civil 3D kann BIM hat aber den Nachteil, dass es wesentlich teurer als AutoCAD ist. Revit ist weniger weit verbreitet und man muss die Anwender darauf schulen.

Man kann BIM Modelle erstellen und mittels Dynamo Teilautomatisierungen durchführen. Für AVA haben wir ABK im Einsatz aber die BIM Koppelung funktioniert im Tiefbau nicht.

**Interview-Partner 5** Im Tunnelbau konkret bin ich nicht spezialisiert, aber auf die allgemeine Projektabwicklung mit der BIM Methode möchte ich eingehen. Ein klassisches Programm im Bereich der Autorensoftware ist Autodesk Revit, wobei ein einfaches Modell rasch erstellt werden kann, eine komplexere Modellierung jedoch dem Anwender viel abverlangt. Im Bereich der Prüfsoftware ist Solibri meiner Meinung nach marktführend. Im Bereich der Ausführung und Bausimulation ist Dalux weit vorne, weil diese auch ein Problem-Management auf der Baustelle haben.

**Sind viele rein auf den Tunnelbau spezialisierte Programme im Einsatz, oder werden allgemein verbreitete Programme mit Erweiterungen für den Tunnelbau genutzt?**

**Interview-Partnerin 1** Es werden eher allgemeine Programme verwendet, die auch im Tunnelbau eingesetzt werden können. Spezifische Programme für Tiefbauelemente sind für die Zukunft angedacht, aber noch nicht in Verwendung.

**Interview-Partner 2** Katar ist sehr vom britischen und amerikanischen System getrieben, die schon länger BIM praktizieren als Europa. Dadurch kommt sehr viel Input vom Bauherren selbst, wobei nur AutoCAD Standards aber keine BIM Standards vorliegen. Diese Standards werden in allgemeinen BIM Programmen verwendet.

**Interview-Partner 3** Wir haben keine rein auf den Tunnelbau spezialisierten Programme in Verwendung. Allgemeine Programme werden aber mit Aufsätzen, wie beispielsweise Autodesk Dynamo oder Sofistik Bridge Modeler erweitert.

**Interview-Partner 4** Die großen Software Hersteller müssen ihr Unternehmen wirtschaftlich erfolgreich führen und dafür den Großteil ihrer Kunden zufriedenstellen, welche aber im Hochbau und nicht im Tunnelbau beheimatet sind. Daher kommen nur Programme mit allgemeinen Funktionen zum Einsatz.

**Interview-Partner 5** Die von mir genannten Programme sind allgemein nutzbar.

**Gibt es bei der BIM Modellierung eines Tunnels spezielle Herausforderungen oder Probleme?**

**Interview-Partnerin 1** Wenn Neigungen zu klein sind, in der Größenordnung von 1:500, kann Revit das nicht bemaßen und daher geht die Information etwas verloren. Ein weiteres Problem ist, dass man keinen Längenschnitt entlang der Tunnelachse machen kann. Revit ist sehr auf eckige Sachen limitiert und sobald man gekrümmte Geometrien hat, stößt man an die Grenzen.

**Interview-Partner 2** Für einen NÖT Tunnel kann man die unterschiedlichen Ausbauklassen in AutoCAD sehr leicht darstellen, jedoch im BIM Modell kann die unterschiedliche Dicke der Innenschale nicht gut modelliert werden, da hier ansonsten drei Objekte übereinander liegen. Die Planausgabe der Tübbinge aus dem BIM Modell funktioniert auch nicht so gut, weshalb diese Planung bei unserem Projekt wieder mit AutoCAD gemacht wurde. Weiters kann man keinen Längenschnitt entlang einer gekrümmten Tunnelachse machen kann, obwohl die Problemstellung sehr banal klingt.

**Interview-Partner 3** Neben der Länge eines Tunnels ist bei kurvigen Trassierungen die Modellierung der Innenschale, hinsichtlich Blocklängen und Fugenausbildung, ein Thema. Ein weiteres Problem ist das Einarbeiten eines Überprofils, da klassische Softwarelösungen, welche aus dem Hochbau kommen, dafür keine Lösung anbieten.

**Interview-Partner 4** Eine spezielle Herausforderung ist die räumliche Krümmung der Kurven. Die Trasse folgt im Grundriss und in der Höhe gewissen Kurven und dann kommen noch Tübbinge hinzu die auch gekrümmte Elemente sind. Das führt die Software und die Planer oft an ihre Grenzen. Gewisse Probleme treten auf, wenn man aus Revit Modellen einen klassischen Plan erstellen möchte.

**Interview-Partner 5** Die gesamte Datengröße und dazugehörig die horizontale Ausdehnung eines Tunnelmodells ist im Vergleich zu einem gewöhnlichen Hochbauprojekt viel größer und führt manchmal zu Problemen. Eine weitere Herausforderung bringt der Tunnelbau durch seine gewölbten, runden Formen mit sich. Diese werden durch Polygone angenähert, wodurch viele Punkte generiert werden, die wiederum die Geschwindigkeit des Modells beeinflussen können. Bei Tunnelbauabschnitten müssen unter anderem Dehnungsfugen zwischen den Blöcken besonders betrachtet werden.

#### **Werden vom Unternehmen selbst programmierte Werkzeuge, welche über eine API auf die Software zugreifen, verwendet?**

**Interview-Partnerin 1** Für die Tunnelauskleidung wurden universale Tübbinge verwendet. Um damit einen geschlossenen Tunnel zu erhalten, wurde intern ein Aufsatz gebaut, der selbständig die Ausrichtung errechnet. Da für den Abwassertunnel die Abweichungen nur sehr gering sein dürfen, war das notwendig. Der Aufsatz wurde in Python geschrieben und als Makro in Revit eingespielt. Es ist zwar ein sehr spezielles Problem gewesen, aber ohne Programmierung wird es im Tunnelbau noch länger nicht gehen. Es sind im Tunnelbau immer sehr spezielle Anforderungen gegeben.

**Interview-Partner 2** Bei uns im Unternehmen wurde ein Aufsatz für die Verteilung von universalen Tübbingen programmiert. Dieser hatte zur Aufgabe, die exakte Drehrichtung der Ringe zu berechnen und diese im Revit Modell darzustellen.

**Interview-Partner 3** Wir nützen intern für die BIM Darstellung unsere eigene Software namens IRIS (Integrated Risk and Information System). As-Built-Dokumentationen und Bauteil Nachverfolgung lassen sich hiermit sehr gut realisieren. IRIS kann über eine API mit Revit kommunizieren. Im Tunnelbau werden viele Speziallösungen benötigt und es gibt auch für die reine Modellierung eigene Erweiterungen.

**Interview-Partner 4** Wir haben im Haus die eigene Software TUGIS für den Bereich der Geologie und Dokumentation wo ich ein IFC exportieren kann. Dieses Programm kann aber nicht über eine API angebunden werden.

**Interview-Partner 5** Wir haben eine eigene Programmierabteilung, jedoch sind noch keine spezifischen Werkzeuge für eine BIM Software programmiert worden. Dies ist aber für die Zukunft angedacht.

### **Gibt es Probleme beim Datenexport, da die selbst programmierten Werkzeuge keine Verknüpfung zu standardisierten Tunnelobjekten herstellen?**

**Interview-Partnerin 1** Nein, es gab keine Probleme, weil das programmierte Tool einfach eine Revit Familie positionierte, die wiederum mit den IFC Elementen verknüpft ist.

**Interview-Partner 2** Nein es gab keine Probleme.

**Interview-Partner 3** Nein, aber wir geben die Modelle auch nicht mit IFC weiter.

**Interview-Partner 4** Dieses Problem haben wir nicht.

**Interview-Partner 5** Damit haben wir keine Erfahrungen.

### **Aus einigen Literaturbeiträgen kann entnommen werden, dass die Digitalisierung in der Baubranche und dort unter anderem im Tunnelbau rückständig ist. Wie sehen Sie den Entwicklungsstand im Allgemeinen und verglichen mit anderen Bereichen der Baubranche?**

**Interview-Partnerin 1** In den IFC Standards für Hochbau kann man eigentlich alles finden, hingegen im Tiefbau noch nicht. Der Tunnelbau hatte einfach einen späteren Startzeitpunkt, aber dafür sind die Entwicklungsschritte größer und es geht schneller voran als wir denken.

**Interview-Partner 2** In anderen Bereichen wie dem Maschinenbau werden schon viel länger 3D Modelle verwendet. Die 3D Elemente von Maschinenbauobjekten, die wir als IFC bekommen, sind viel detaillierter als Objekte aus dem Bauwesen. Im Flugzeugbau und Autobau hat sich das Thema schon seit viel längerer Zeit etabliert, wohingegen die Baubranche noch etwas rückständig ist. In der Baubranche hat die Entwicklung im Hochbau begonnen, deshalb ist für den Tiefbau noch nicht so eine breite Grundlage vorhanden.

**Interview-Partner 3** International ist die Baubranche wahrscheinlich eine Dekade hinterher, wobei es in Österreich sogar noch schlimmer ist. Die Entwicklungschancen sind aber vorhanden und die Lösungen entwickeln sich sehr rasch.

Trotz eines digitalen Zwillinges, muss das Bauwerk noch immer mit manueller Arbeit errichtet werden. Die effiziente Weiterentwicklung hat in den letzten Jahrzehnten im Bauwesen stagniert. Ein Ursache sehe ich darin, dass die Planungs- und Vertragsstandards immer höher werden und der Dokumentationsaufwand zunimmt. Um diese gewünschten Standards zu halten und dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken, kann BIM ein Mittel sein um die Effizienz wieder zu steigern. Die Auftraggeber sind in Österreich gefordert, Projekte mit einer BIM Planung in Auftrag zu geben. Seitens öffentlicher Hand gibt es keinen Druck, BIM anzuwenden.

Beim Vergleich des Tunnelbaus innerhalb der Baubranche muss man unterscheiden zwischen Digitalisierung und BIM im Tunnelbau. Bei der reinen Digitalisierung ist der Tunnelbau vielleicht sogar voraus, was beispielsweise das Arbeiten mit TBM-Daten betrifft. Unser IRIS haben wir seit vielen Jahren in Verwendung. BIM ist im Hochbau viel standardisierbarer. Im Tunnelbau, wo wir räumlich arbeiten müssen, haben wir auch viele Variablen und man findet erst im Bauablauf die tatsächlichen geologischen Verhältnisse vor, wobei diese reaktive Komponente in der Digitalisierung fehlt. BIM Planung funktioniert gut wenn es Standards gibt.

**Interview-Partner 4** In den letzten fünf bis sechs Jahren hat die Entwicklung sehr große Fortschritte gemacht, aber verglichen mit der Automobilbranche haben wir im Bauwesen einen großen Rückstand. Durch einsetzen eines VDE (virtual Design Review) kommt man in Bereiche, wo man sich im 21. Jahrhundert angekommen fühlt, hin zur Industrie 4.0 fehlt aber noch einiges. Eine Herausforderung ist, dass man alle technologischen Entwicklungen mitbekommt. Der Tunnelbau Sektor ist relativ klein, weshalb die großen Entwicklungen nicht direkt darauf abzielen. Ein großer Treiber sind die Auftraggeber, wenn sie BIM Modelle in Auftrag geben, aber für den behördlichen Genehmigungsprozess braucht es wieder 2D Pläne.

**Interview-Partner 5** Die IT-Branche kann viel leichter digitalisiert werden, da alles über ein digitales Medium abläuft. Bei produzierenden Gewerke habe ich immer begrenztere Möglichkeiten, wobei die Baubranche nochmals eine Stufe komplexer ist, beispielsweise verglichen mit der Automobilbranche, aufgrund der Tatsache, dass alle Bauwerke Unikate sind. Die Digitalisierung im Planungsprozess hat auf jeden Fall noch Optimierungspotential, hingegen in der Ausführung selbst stecken die Verbesserungsmöglichkeiten nur im Detail. Der Tunnelbau selbst hängt im Vergleich zum Hochbau noch etwas hinterher, was aber dem Umstand geschuldet ist, dass ich einen Neubau im Hochbau fast immer auf grüner Wiese, also ohne großen Einfluss aus dem umliegenden Bestand und mit relativ wenig externen Einflüssen, errichte. Der Tunnelbau muss immer auf den anstehenden Untergrund abgestimmt sein.

#### **Welche Rolle spielt die BIM Planung in der Zukunft und wird sie sich auf lange Sicht etablieren? Welche Ideen und Wünsche haben Sie an die Zukunft der Tunnelplanung?**

**Interview-Partnerin 1** Im Tiefbau wird zwar ein BIM Modell erstellt, jedoch hilft man sich noch immer sehr oft mit AutoCAD. Ein Wunsch wäre mit BIM unlimitiert Planen zu können und auch die Modelle auf der Baustelle verfügbar zu machen. In Zukunft wäre es gut die zweidimensionale Planung abzulösen und jeder das 3D Modell nutzen kann. Dafür ist für alle beteiligten im Projekt ein gewisser Grad an Technologie und Software nötig. In Zukunft wird es auch Hologramm Besprechungen geben, wo wir alle VR-Brillen verwenden und im virtuellen Modell sind. Ein virtueller Soll-Ist Vergleich kann damit sehr anschaulich durchgeführt werden.

**Interview-Partner 2** 3D Modellierung ist einfach die Zukunft und sollte auch im Sinne des Bauherrn sein, vor allem bei Infrastrukturbetreibern. Auch im Zeithorizont über die ganze Lebensdauer eines Bauwerks ist BIM sehr wichtig, um physische Planarchive zu ersetzen. Meine Erwartung ist, dass die Baufirmen und Bauherren den Nutzen erkennen und sich den Kosten für die Modellierung aber bewusst werden. Es ist vom Aufwand nicht mit einer simplen 2D Planung zu vergleichen und somit rentiert sich das BIM Modell womöglich erst nach 50 Jahren. Das Umdenken muss im speziellen bei den Bauherren stattfinden, wobei es ein langer Prozess ist die Leute von den höheren Planungskosten zu überzeugen. Es ist viel Arbeit die alten Muster und Gewohnheiten der konventionellen Planung aufzubrechen, aber ein nötiger Schritt für die digitale Zukunft.

**Interview-Partner 3** Es bräuchte ordentliche Standards und eine konsequente Verfolgung des Ziels, BIM zu nutzen, seitens des Auftraggebers. Hinsichtlich BIM und Nachhaltigkeit sowie Transparenz gibt es viel Potential. Ziel wäre es dem Auftraggeber eine Planung vorzubereiten und über die Kalkulation, die Ausführung bis hin zur Übergabe und dem Betrieb des Bauwerks alle Entwicklungsschritte abzudecken.

**Interview-Partner 4** Ich denke, dass sich die BIM Planung in der Zukunft etablieren wird. Ob das in allen Bereichen wie einer TVM Planung sein kann hängt davon ab, wie leistungsfähig die Programme und die Hardware werden. Die Frage wird sein, wie komplex die Abläufe bezüglich Modellerstellung werden. Schön wäre wenn man ein paar Eingangswerte wie Radius, Schalenstärke und Segmentanzahl eingibt und dann plant die Software entlang einer Trasse den Tunnel selbst. Ein Problem könnte aber sein, dass ich sehr gut ausgebildetes Personal, leistungsstarke Hardware und teure Software benötige und trotzdem die Planung billiger werden soll. Ein Wunsch wäre, dass die Umsetzung einer BIM Planung simpel gehalten wird. Alles in Allem sehe ich eine gute Zukunft für die BIM Planung im Tunnelbau.

**Interview-Partner 5** Um eine effizientere Arbeitsweise zu erreichen, werden wir um die BIM Methode nicht herumkommen. Es braucht für eine Entlastung der Fachkräfte die digitale Transformation und damit verbundene Methoden, wie die vorliegende. In der Baubranche herrscht traditionell eher ein rauer Umgangston und es wird häufig gegeneinander gearbeitet. Durch die BIM Methode erhoffe ich mir eine Ausweitung des kollaborativen Arbeitens und durch Open-BIM ein verstärktes Miteinander statt Gegeneinander. Die Verantwortung, dass BIM in Zukunft häufiger angewendet wird, liegt stark beim Auftraggeber, da er die Planungsleistung kostenmäßig tragen muss. Im Zuge des Vergabeprozesses werden in Zukunft auch BIM Referenzprojekte gefordert sein, damit es diese gibt, muss aber ein Planer intrinsisch motiviert sein, die Kompetenzen aufzubauen. Erst dann hat es Sinn, dass ein Auftraggeber seine Anforderungen genau definiert. Zusammengefasst muss der erste Schritt von den Planern selbst getätigt werden, ab dann ist es aber Sache des Auftraggebers, die BIM Methode einzufordern.