

Diploma Thesis

Digitisation of the construction management in tunnelling

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Digitalisierung des Baubetriebs im Tunnelbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer

Diplom-Ingenieurin

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Miriam-Maria Stadlmann, BSc

Matr.Nr.: 01126435

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald Goger**

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. **Tobias Bisenberger**

Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement

Forschungsbereich Baubetrieb und Bauwirtschaft

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13/234-1, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2018

*Der Mensch kann nicht zu neuen Ufern
aufbrechen, wenn er nicht den Mut aufbringt,
die alten zu verlassen.*

André Gide

Danksagung

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

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Goger, dem Leiter des Forschungsbereiches für Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik an der Technischen Universität Wien, für die Möglichkeit bedanken am Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement in meinem gewählten Schwerpunkt Tunnelbau diese Diplomarbeit zu verfassen. Die Themenstellung der Arbeit hat mich sehr fasziniert und mir erlaubt, mich mit einer brandaktuellen Problematik in der Bauindustrie auseinander zu setzen. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Tobias Bisenberger für seine Betreuung im Rahmen dieser Arbeit bedanken.

Außerdem möchte ich allen meinen Studienkollegen für ihre Unterstützung und ihren Teamgeist während des gesamten Studiums danken. Ihre Hilfsbereitschaft und Kameradschaft hat mich befähigt, die Schwierigkeiten im Studiumsfortschritt zu überwinden. Sie sind alle zu sehr guten Freunden geworden und haben maßgeblich dazu beigetragen, dass unsere gemeinsame Studienzeit zu einem aufregenden und einzigartigen Abschnitt in meinem Leben wurde.

Der größte Dank gilt meiner Familie, die mich seit meiner Geburt unterstützt und leitet. Ich bedanke mich für ihre bedingungslose Zuneigung und ihren unermüdlichen Zuspruch. Ohne ihren Rückhalt wäre es mir nicht möglich gewesen, diese Ausbildung zu genießen. Ich möchte mich besonders bei meinen Eltern bedanken, die mich immer dazu ermutigt haben, meine eigenen Entscheidungen zu treffen und mir die Möglichkeit gegeben haben, meine Wünsche und Vorstellungen in die Tat umzusetzen.

Weiters besonders danken möchte ich meinem Großvater Heinz für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Vielen Dank für die vielen Stunden, die er sich Zeit genommen hat sowie seine Begeisterung und sein Engagement, die mich durchwegs beflügelt haben, die Arbeit zu optimieren und schlussendlich zu vollenden.

Kurzfassung

Schlagwörter: Digitalisierung, Tunnelbaubetrieb, Building Information Modeling, digitales Datenmanagement, digital gesteuerter Sprengzyklus, digitale Aufzeichnung von Vortriebsmaschinenparametern

Die Digitalisierung hat die Baubranche erfasst und verändert die bisherige Abwicklung von Bauprojekten auf grundlegende Art und Weise. Software-gestützte Prozesse begleiten und formen das neue Geschäftsmodell „Digitales Planen, Bauen und Betreiben“ über alle Projektphasen. Kernstück der digitalen Arbeitsmethode ist eine einheitliche web-basierte Datenplattform, die für alle Projektbeteiligten zugänglich ist und einen Informationsaustausch ohne Medienbrüche ermöglicht. Ein großer Mehrwert dieser integrativen Arbeitsmethode – oftmals auch als Building Information Modeling (BIM) bezeichnet – ist die hohe Kosten-, Termin- und Qualitätssicherheit auf Grund der Betrachtung des Bauwerks-Lebenszyklus von Anfang an. Die Verknüpfung geometrischer und graphischer Daten in einem dreidimensionalen Bauwerksmodell sowie die Interaktion mit anderen relevanten Projektdaten und Dimensionen (z.B. Zeit oder Kosten) lassen ein komplexes Informationsmodell entstehen. Die digitale, zeit- und ortsbasierte eindeutige Zuordnung der im Zuge des Baufortschritts anfallenden Informationen und Messwerte zu den entsprechenden geometrischen Beschreibungen aus der dreidimensionalen Modellierung generieren einen detaillierten Soll- und Ist-Zustand des Bauwerks. Der Einsatz von selbstlernenden Algorithmen in Metamodellen nutzt das Informationsmodell zur Optimierung der Ausführungsphase und zur Erstellung von Prognosen.

Der interdisziplinäre Ansatz des „Digitalen Planens, Bauens und Betriebens“ wird derzeit schrittweise in Forschungs- und Pilotprojekten im Tunnelbaubetrieb getestet und analysiert. Im zyklischen Vortrieb liegt besonderes Augenmerk auf dem Einsatz von 3D-Laserscanning für die Erstellung einer Ausbruchprognose und der Optimierung des Ausbruchprofils. Die Digitalisierung des kontinuierlichen Vortriebs nutzt die digitale Aufzeichnung und Analyse vortriebsrelevanter Betriebs- und Vermessungsdaten für die Optimierung des gerade zu durchfahrenden Tunnelabschnittes sowie die Prognose des kommenden Vortriebsabschnittes. Der Einsatz von BIM-Technologien in der Planungs- und Bauphase steht an seinen Anfängen und erfordert für eine effiziente Umsetzung in der Zukunft klar vorgegebene rechtliche und politische Rahmenbedingungen. Die mit der Digitalisierung einhergehende Terminologie sowie Rollen- und Leistungsbilder müssen klar definiert und in Form eines Forschungs- und Ausbildungsplans entwickelt und realisiert werden.

Die vorliegende Arbeit gibt einen Einblick in die Auswirkungen der Digitalisierung auf den Tunnelbaubetrieb. Der Vergleich zwischen der klassischen und der digitalen Tunnelbauabwicklung verdeutlicht die Chancen und Potenziale der Digitalisierung, zeigt jedoch auch die Schwierigkeiten in der Umsetzung und die neu zu bewältigenden Aufgaben. Im Ausblick werden Handlungsempfehlungen für eine erfolgreiche digitale Entwicklung des Tunnelbaubetriebs gegeben.

Abstract

Keywords: Digitisation, tunnelling construction management, Building Information Modeling, digital datamanagement, digital controlled blasting cycle, digital collection of drivage measurement data

The digitisation has captured the whole building industry. Its profound impact is fundamentally altering the execution of construction projects right now. Software-supported processes are guiding and shaping the new business model „Digital Planning, Building and Maintaining“ throughout all project phases. Centrepiece of this digitised working method is a standardised web-based database which is accessible for all project members and enhances a continuous information transaction. Due to the early approach of life-cycle-analysis the integrative working method – the term Building Information Modeling (BIM) is often used as substitute – guarantees a high degree of cost certainty, schedule reliability and quality assurance. The connection of geometric and graphic data in a three-dimensional building model as well as the interaction with other relevant project data and dimensions (for example time and costs) develops a complex information model. During the construction phase machine data, measurement data and a wide range of further information are integrated in the BIM model. The distinct location- and time-based attribution of the digitised collected data to the according geometric specifications of the model allows a continuous comparison of the intended and the actual situation. The application of self-learning algorithms in meta models utilises the information model to optimise the construction period and to make predictions.

The interdisciplinary approach of „Digital Planning, Building and Maintaining“ is currently step-by-step tested and analysed in research projects and pilot schemes in tunnelling operation. The application of 3D laser scanners in conventional tunnelling optimises the excavation profile and makes excavation forecasts. The digitisation of mechanised tunnelling benefits from the digital recording and analysis of all data relevant to the drivage like operating characteristics and measurement data. The data are used to optimise the operation of the current tunnelling sector and to make assumptions for the following excavation parts. The appliance of BIM-based methods during the planning and construction phase of tunnel projects is still at its beginning. The efficient implementation in the future requires precise legal and political frame conditions as well as a definition of the involved nomenclature, scope of work and role models. The achievement of this goals is actuated by the development and realisation of concrete research plans and training curricula.

The present paper gives a general overview of the impact of the digitisation on the tunnelling operation. The comparison between the classical and digital settlement of the tunnel project clarifies the chances and potentials of the digitisation but also illustrates the difficulties of the implementation and the new tasks which have to be managed in the future. The outlook gives recommendations for further actions to achieve a successful execution of digitised tunnelling projects in the future.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	5
Kurzfassung	7
Abstract	9
1 Einleitung	13
1.1 Motivation	13
1.2 Aufbau der Arbeit	14
1.3 Zielsetzung	15
1.4 Methodik	16
1.5 Terminologie	17
1.6 Abkürzungsverzeichnis	22
1.7 Geschichtlicher Abriss	24
2 Nomenklatur Tunnelbau	27
2.1 Vollausbuch	29
2.2 Ausbruch in Teilen	30
2.3 Geschichtliche Bauweisen	31
2.3.1 Belgische oder Unterfangungsbauweise	31
2.3.2 Deutsche oder Kernbauweise	33
2.3.3 Alte Österreichische oder Aufbruchbauweise	34
2.4 Zyklischer Vortrieb	36
2.4.1 Sprengvortrieb	36
2.4.2 Baggervortrieb	38
2.4.3 Mischvortrieb	39
2.4.4 Teilschnittmaschinenvortrieb	39
2.4.5 Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode NÖT	40
2.5 Kontinuierlicher Vortrieb	42
2.5.1 Tunnelbohrmaschinen	43
2.5.2 Schildvortriebe	45
3 Klassischer Baubetrieb – Tunnelbau	51
3.1 Geotechnische Planung	51
3.1.1 Gebirgsklassifikation	52
3.1.2 Geotechnische Planung beim zyklischen Vortrieb	55
3.1.3 Geotechnische Planung beim maschinellen Vortrieb	62
3.2 Vertragliche Regelungen	68
3.2.1 Vortriebsklassifizierung	70
3.2.2 Tunnelbauverträge in Österreich	73

3.3	Baubetrieb	74
3.3.1	Bauablaufplanung	75
3.3.2	Messtechnik	84
4	Digitalisierung in der Baubranche	87
4.1	Industrie 4.0	87
4.1.1	Digitale Transformation der Wertschöpfung	89
4.1.2	Chancen und Risiken	90
4.2	Digitales Planen, Bauen und Betreiben	92
4.2.1	Aspekte der Digitalisierung entlang der Wertschöpfung im Bauwesen . . .	93
4.2.2	Handlungsempfehlungen	94
4.2.3	BIM – Vom digitalen Zwilling zum realen Bauwerk	97
4.2.4	Terminologie BIM	99
4.2.5	Digitale Baustelle der Zukunft	104
5	Digitalisierung im Tunnelbau	107
5.1	BIM als integrative Arbeitsmethode	107
5.2	Digitalisierung des zyklischen Vortriebs	113
5.2.1	Mechanisierung des Sprengzyklus	114
5.2.2	Produktivitätssteigerung durch durchdachte Nachläufer-Logistiksysteme .	116
5.2.3	Dokumentation und Optimierung durch 3D-Laserscanning	118
5.3	Digitalisierung des kontinuierlichen Vortriebs	120
5.3.1	Vortriebsbegleitende Messtechnik im kontinuierlichen Tunnelbau	121
5.3.2	Überarbeitung der ÖNORM B2203-2	127
6	Diskussion	131
6.1	Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs	131
6.2	Herausforderungen in der Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau	139
7	Zusammenfassung	143
7.1	Beantwortung der Forschungsfragen	146
7.2	Ausblick	147
	Abbildungsverzeichnis	149
	Tabellenverzeichnis	153
	Literaturverzeichnis	155

Kapitel 1

Einleitung

Das folgende Kapitel dient der Einführung in die Diplomarbeit „Digitalisierung des Baubetriebs im Tunnelbau“. Zunächst werden die Motivation der Arbeit sowie das persönliche Interesse an diesem Thema kurz erläutert. Des Weiteren wird auf den Aufbau und die Zielsetzung der Diplomarbeit eingegangen. Einer kurzen Erläuterung der angewandten Methodik folgen im Abschnitt Terminologie die Definitionen einiger verwendeter Fachbegriffe sowie das Abkürzungsverzeichnis. Abschließend gibt der letzte Unterpunkt in Form eines geschichtlichen Abrisses einen groben Überblick über die historische Entwicklung des Tunnelbaus.

1.1 Motivation

Der Tunnelbau vereinigt Theorie und Praxis zu einer eigenen Ingenieurbaukunst. Bei Wichtung der vielen Einflüsse steht je nach dem Stand der eigenen Kenntnisse einmal die Praxis, das andere Mal mehr die Theorie im Vordergrund. Der Ingenieur-tunnelbau wird heute weitgehend von Bauingenieuren betrieben, doch sollte sich jeder bewusst sein, dass Statik- und Massivbaukenntnisse allein nicht ausreichen. Geologie, Geomechanik, Maschinenteknik und insbesondere Bauverfahrenstechnik gehören gleichwertig dazu (Bernhard Maidl [34]).

Der Tunnelbau fasziniert und fordert den Bauingenieur ¹ nach wie vor durch seine Komplexität und Interdisziplinarität. Seine Einzigartigkeit wird durch die Wechselbeziehung zwischen Gebirge, Konstruktion und Bauvorgang geschaffen und fordert während der Bauausführung agile und an die wechselhaften geologischen Bedingungen adaptierbare Bauverfahren und Sicherungsmaßnahmen [34].

Das digitale Zeitalter, in dem wir uns gerade befinden, prägt und wandelt unsere Wirtschaft, unser Wissen und unsere zwischenmenschlichen Interaktionen. Die Digitalisierung verändert Vorgänge und Handlungsweisen durch die Verwendung digitaler Technologien im Alltag und am Arbeitsplatz. Die digitale Transformation unserer Gesellschaft und Wirtschaft ist so universal spürbar, dass von der 4. Industriellen Revolution gesprochen wird. Der Einsatz von Digitaltechnik beispielsweise in der Produktion ermöglicht eine kundenorientierte, individuelle und flexible Produktentwicklung, -herstellung und -vermarktung [19].

¹Genderhinweis: Die Autorin legt großen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wurde jedoch oftmals entweder die maskuline oder feminine Form gewählt. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des jeweils anderen Geschlechts.

Die Digitalisierung hat auch die Bauwirtschaft erfasst und wird sie in der Gesamtheit ihrer Prozesse beeinflussen. Der Einsatz neuer Technologien schafft autonom arbeitende, sich selbst organisierende Systeme, welche die Abwicklung von Bauprojekten auf grundlegende Art und Weise verändern. Building Information Modeling (BIM) spielt dabei eine wichtige Rolle. BIM revolutioniert derzeit die Welt des Planens und Bauens von Bauprojekten und verkörpert eine neue Arbeitsmethode, die den gesamten Lebenszyklus eines Bauprojektes betrachtet [35, 59].

Die Bauverfahrenstechnik im Tunnelbau hat in den letzten Jahrzehnten durch einen zunehmenden Mechanisierungsgrad eine enorme Produktivitätssteigerung erfahren. Die Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau steht derzeit erst an ihren Anfängen und wird in den kommenden Jahren die Abwicklung von Tunnelbauprojekten revolutionieren. Die Realisation eines digitalisierten Lebenszyklus-Modells des Projektes benötigt eine neue Betrachtungs- und Herangehensweise aller Projektbeteiligten über den gesamten Prozess von Planen, Bauen und Betreiben. Das Potenzial des digitalen Baubetriebs im Tunnelbau wird derzeit in Form von Versuchen und Pilotprojekten erforscht. Der Nutzen digitaler Arbeitsmethoden soll schrittweise in großen Bauprojekten der Bevölkerung zugänglich gemacht werden. Die Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau benötigt eine gut durchdachte realisierbare Strategie, welche Grundlagen und Handlungsempfehlungen enthält [31].

1.2 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Nomenklatur des Tunnelbaus. Es beschreibt die vorhandenen Ausbruchsarten (Voll- und Teilausbruch) und gibt einen Überblick über die bestehenden Ausbruchsmethoden. Die Gliederung des Kapitels unterteilt sich in geschichtliche Bauweisen, den zyklischen Vortrieb und den kontinuierlichen Vortrieb. Es werden die jeweiligen Vortriebsmethoden und deren Grundlagen und Wesen kurz erläutert.

Kapitel 3 befasst sich mit dem klassischen Baubetrieb des Tunnelbaus. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der geotechnischen Planung, den vertraglichen Regelungen des Tunnelbaus in Österreich und des allgemeinen Baubetriebs, der die Phasen Planung, Bauvorbereitung und Bauausführung beinhaltet. Abschließend wird in diesem Kapitel auf das Dokumentationswesen und die Messtechnik im Tunnelbau eingegangen.

Kapitel 4 weist den Einfluss der Digitalisierung in der Baubranche auf. Neben den Ansätzen zur Umsetzung der Digitalisierung werden deren Tragweite, Chancen und Risiken beschrieben. Im Abschnitt 4.2 wird auf das Zukunftsmodell des digitalen Planens, Bauens und Betriebens eingegangen. Handlungsempfehlungen geben eine Struktur für die mögliche Umsetzung der Digitalisierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette im Bauwesen. Des Weiteren wird die neue Arbeitsmethode Building Information Modeling (BIM) vorgestellt und eine mögliche Projektabwicklung einer digitalen Baustelle der Zukunft dargestellt. In Zusammenhang mit der Arbeitsmethode BIM neu geschaffenen Rollenbilder und Arbeitsanforderungen werden im Abschnitt 4.2.4 vorgestellt und definiert.

Kapitel 5 erläutert den Ansatz der Digitalisierung konkret im zyklischen und kontinuierlichen Tunnelbau. Abschnitt 5.2 fokussiert sich besonders auf die Optimierung des Sprengzyklus durch den Einsatz digitaler Technologien. Abschnitt 5.3 beschreibt die digitale Abwicklung des Bau-

betriebs im maschinellen Tunnelbau. Im Zentrum steht der Einsatz von BIM-Technologien, die das Tunnelbauprojekt zu einem echten Informationsmodell verwandeln und ein komplexes Datenmanagement erfordern. Dazu wird ein Prozesscontrolling-System vorgestellt, welches alle während des Vortriebs anfallende Daten in einem räumlich und zeitlich koordinierten Referenzsystem sammelt, ablegt und für die Optimierung des Vortriebs auswertet. Des Weiteren wird auf den web-basierten Zugriff und Austausch der Daten zwischen verschiedenen Projektbeteiligten eingegangen.

Kapitel 6 weist in Form einer Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs den Mehrwert der Digitalisierung auf. Des Weiteren werden die dadurch neu entstehenden Aufgaben sowie die Herausforderungen ihrer Umsetzung geschildert.

Kapitel 7 fasst die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammen und beantwortet die unter Punkt 1.3 definierten Forschungsfragen.

1.3 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Beschreibung der technologischen Entwicklungen des zyklischen und kontinuierlichen Vortriebs sowie deren Auswirkungen auf den Baubetrieb des Tunnelbaus. Im Zentrum der Analyse stehen die durch die Digitalisierung geschaffenen neuen Prozesse und deren Umsetzung in der Tunnelbauabwicklung. Dabei wird das Potential der neuen, interdisziplinären Arbeitsmethode Building Information Modeling (BIM) vorgestellt. Eine Gegenüberstellung des klassischen und des digitalen Baubetriebs im Tunnelbau soll letztendlich plakativ die Umsetzung und den Nutzen der Digitalisierung im Tunnelbau darstellen.

Der Arbeit werden folgende Forschungsfragen zu Grunde gelegt. Sie dienen dem Zweck, der umfangreichen Themenstellung in Form eines Leitfadens Struktur zu geben. Der Abschluss der Arbeit bringt die Beantwortung der Forschungsfragen.

1. Forschungsfrage

Welche Auswirkungen hat die Digitalisierung auf den Baubetrieb im Tunnelbau?

2. Forschungsfrage

Wie schaut eine von BIM geleitete Prozesskette einer modernen Tunnelbauabwicklung aus? In welchen Phasen und durch welche Parteien greift BIM in den Projektablauf ein?

3. Forschungsfrage

Welche Aufgaben zur optimalen Umsetzung der Digitalisierung in der Projektabwicklung erwarten die Projektbeteiligten?

1.4 Methodik

Die methodische Herangehensweise der Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in folgende Arbeitsschritte:

- 1) Festlegen der Forschungsfragen für die Zieldefinition
- 2) Ausarbeitung der Grundlagen für die klassische Tunnelbauabwicklung im zyklischen und im kontinuierlichen Vortrieb
 - Nomenklatur Tunnelbau
 - Geotechnische Planung und Vortriebsklassifizierung
 - Tunnelbauverträge in Österreich
 - Bauablaufplanung
 - * Bauzeitplanung
 - * Gerätedisposition
 - * Materialdisposition und -bewirtschaftung
 - * Personaldisposition
 - * Dokumentation
 - Messtechnik
- 3) Analyse der möglichen Umsetzung und damit einhergehenden Auswirkungen der Digitalisierung allgemein im Bauwesen und speziell im Tunnelbau
 - Private Literaturrecherche (Bücher, Schriftenreihen Plattform 4.0, Wissenschaftliche Veröffentlichungen zu Pilotprojekten etc.)
 - Bearbeitung zur Verfügung gestellter Unterlagen und Dokumente (z.B. Protokolle der Austrian Standards Gremien, Experteninterviews)
- 4) Zusammenfassung und Schlussfolgerung
 - Gegenüberstellung der klassischen und digitalen Tunnelbauabwicklung
 - Beantwortung der Forschungsfragen
 - Ausblick

1.5 Terminologie

Im Folgenden werden einige Fachbegriffe definiert, welche im Zuge der Arbeit einfließen.

Abschlagslänge

Die Abschlagslänge gibt beim Tunnelvortrieb die mittlere Tiefe eines Abschlags (Abschnittes) in Tunnellängsrichtung an. Sie hängt vom Ausbruchquerschnitt und von den Gebirgseigenschaften ab [20].

Ausbau

Der Ausbau beschreibt im Tunnelbau die Stützung der Hohlraumlaibung [52].

Baustelleneinrichtung

Die Baustelleneinrichtung bezeichnet die Planung und die Errichtung aller auf der Baustelle benötigten Einrichtungen für die wirtschaftliche Fertigung des Bauwerks wie beispielsweise Produktions- und Lagerstätten [70].

Freie Stützweite

Die freie Stützweite bezeichnet einen Kennwert der Gebirgsklassifikation nach *Lauffer*. Sie hängt von der Standzeit des Gebirges ab und definiert die richtungsmäßig unabhängige Stützweite des ungesicherten Tunnels, die bis zum Niederbruch des Gebirges konstruktiv möglich ist [34].

Gebirgsart

Die Gebirgsart bezeichnet jeweils Gebirge mit gleichartigen Eigenschaften [50].

Gebirgsverhalten

Das Gebirgsverhalten beschreibt die Reaktion des Gebirges auf den Ausbruch ohne Berücksichtigung von Stützung oder Querschnittsunterteilung [50].

Gebirgsverhaltenstyp

Gebirgsverhaltenstypen stellen übergeordnete Kategorien von ähnlichen Gebirgsverhalten in Bezug auf Verformungscharakteristika und Versagensmechanismen dar [50].

Gripper

Gripper sind eine radial angeordnete Spannvorrichtung, die zur Übertragung der Vortriebskräfte dienen [8].

Kalotte

Die Kalotte ist der obere Teil der Ortsbrust beim Teilausbruch. Die Lage des Kalottenabschnittes

im Quer- und Längsschnitt kann der Abbildung 1.1 und 1.2 entnommen werden [20].

Kritischer Weg

Der kritische Weg bezeichnet in der Terminplanung in Form eines Netzplans den Weg, auf dem ausschließlich kritische Vorgänge aufeinanderfolgen. Kritische Vorgänge weisen keinerlei Pufferzeiten auf. Der kritische Weg bestimmt die Gesamtablaufzeit [6].

Mehrausbruch

Der Mehrausbruch ist der über das planmäßige Ausbruchsprofil hinausgehende Ausbruch [52].

Ortsbrust

Die Ortsbrust umfasst die Fläche, an welcher der Gebirgsabbau stattfindet [8].

Ortsbrustverhalten

Das Ortsbrustverhalten beschreibt das Verhalten der ungestützten Ortsbrust bezüglich der Verformungscharakteristika und Versagensmechanismen ohne Beeinflussung durch die Tunnelvortriebsmaschine [51].

Ringspalt

Der Raum zwischen umgebendem Gebirge und Außenfläche der Tübbingelemente wird als Ringspalt bezeichnet [51].

Schild

Das Schild ist der äußere, zylinderförmige Stahlmantel einer Tunnelbohrmaschine, welcher eine schützende Funktion gegen den vorherrschenden Untergrund erfüllt [8].

Schildschwanz

Der Schildschwanz ist der Bereich zwischen Schildende und Beginn der Ringspaltverfüllung [8].

Schildspalt

Der zwischen der Außenfläche des Schildes und dem umgebenden Gebirge freie Raum ist der Schildspalt. [51].

Schutterung

Die Aufnahme und der Abtransport des Ausbruchsmaterials bei der Herstellung von Bauwerken unter Tage wird als Schutterung bezeichnet [30].

Schwächezone

Schwächezonen bezeichnen geologische Störungen des Gebirges, welche auf Grund tektonisch

verursachter struktureller Veränderungen des Gesteinsverbandes entstehen. Beispiele sind Schichtungen und Schieferungen sowie Klüfte und Harnische [56].

Separation

Die Separation bezeichnet die Trennung von Flüssigkeit und Feststoff bei der hydraulischen Förderung [9].

Sohle

Die Sohle ist der untere Teil der Ortsbrust beim Teilausbruch. Die Lage des Sohlenabschnittes im Quer- und Längsschnitt kann der Abbildung 1.1 und 1.2 entnommen werden [20].

Standfestigkeit

Die Stabilität des Gebirges unter Berücksichtigung des Bauverfahrens wird durch die Standfestigkeit beschrieben [9].

Standzeit des Gebirges

Die Zeit, in der das Gebirge ungestützt erwartungsgemäß standfest ist, wird als Standzeit des Gebirges bezeichnet [9].

Strosse

Die Strosse ist der Bereich der Ortsbrust zwischen Kalotte und Sohle beim Teilausbruch. Die Lage des Strossenabschnittes im Quer- und Längsschnitt kann der Abbildung 1.1 und 1.2 entnommen werden [20].

Stützmittel (Sicherungsmittel)

Beim Vortrieb von Tunneln in Gebirgen mit unzureichender Standzeit ist der Einbau von Sicherungsmitteln zur Unterstützung und Verbesserung der Eigentragfähigkeit des Gebirges notwendig. Im Tunnelbau werden unter anderem folgende Stützmittel zur Sicherung verwendet: Spritzbeton, Stahlbögen, Gitterträger, Anker, Spieße und Verzugsbleche sowie Kanaldielen [34].

Systemverhalten

Das Systemverhalten beschreibt das Verhalten des System aus Gebirge und gewählten Baumaßnahmen, unterteilt in die Abschnitte Ausbruchsbereich, gesicherter Bereich und Endzustand [50].

Teilschnittmaschine

Die Teilschnittmaschine ist ein multifunktionales Gerät zum Lösen des Gebirges, zur Aufnahme des Ausbruchsmaterials und zu dessen Förderung zu den Schuttergeräten [30]. Diese Vortriebsmethode wird im Kapitel 2.4.4 behandelt.

Tunnelbautechnischer Rahmenplan

Die Darstellung der maßgebenden Parameter der geotechnischen Planung sowie der Anwendungskriterien für die Zuordnung von Ausbruch und Stützmaßnahmen fasst der tunnelbautechnische Rahmenplan zusammen [50].

Tunnelbohrmaschine

Tunnelbohrmaschinen sind Tunnelvortriebsmaschinen, die zur Errichtung von Tunneln in standfesten Festgesteinen eingesetzt werden [9].

Tunnelvortriebsmaschine

Tunnelvortriebsmaschinen umfassen Maschinen, welche zum Bau von Tunneln eingesetzt werden. Sie werden nach der Systematik in Abbildung 2.9 in Tunnelbohrmaschinen, Doppelschildmaschinen, Schildmaschinen und Kombinationsmaschinen unterteilt [9].

Tübbing

Ein Betonfertigteil für die Tunnelauskleidung (Außenschale) wird als Tübbing bezeichnet [8].

Vordersatz

Der Vordersatz bezeichnet die aus dem geologischen Längenschnitt für jede aufgefahrene Gebirgsart zu erwartende Länge der Tunneltrasse [30].

Vortrieb

Unter Vortrieb werden die Leistungen zur Errichtung eines unterirdischen Hohlraumbauwerks verstanden. Sie setzen sich im besonderen aus den Arbeitsschritten Lösen, Laden und Abtransport sowie Stützmitteleinbau auseinander [52].

Vortriebsklassifizierung

Die Vortriebsklassifizierung bezeichnet die notwendige Untergliederung des Gebirges entlang der Vortriebsachse des Tunnelbauwerks nach bestimmten Kriterien, welche auf Basis von geomechanischen und -technischen sowie baugeologischen Untersuchungen festgelegt werden. Sie dient der Wahl des Vortriebsverfahrens sowie der Sicherungsmaßnahmen und der Ermittlung einer leistungsgerechten Vergütung [61]. Die Methode wird im Kapitel 3.2.1 behandelt.

Vortriebspresen

Unter Vortriebspresen werden Hydraulikzylinder verstanden, deren Widerlager die bereits eingebaute Tunnelauskleidung sind, auf welche die Vortriebskräfte übertragen werden [8].

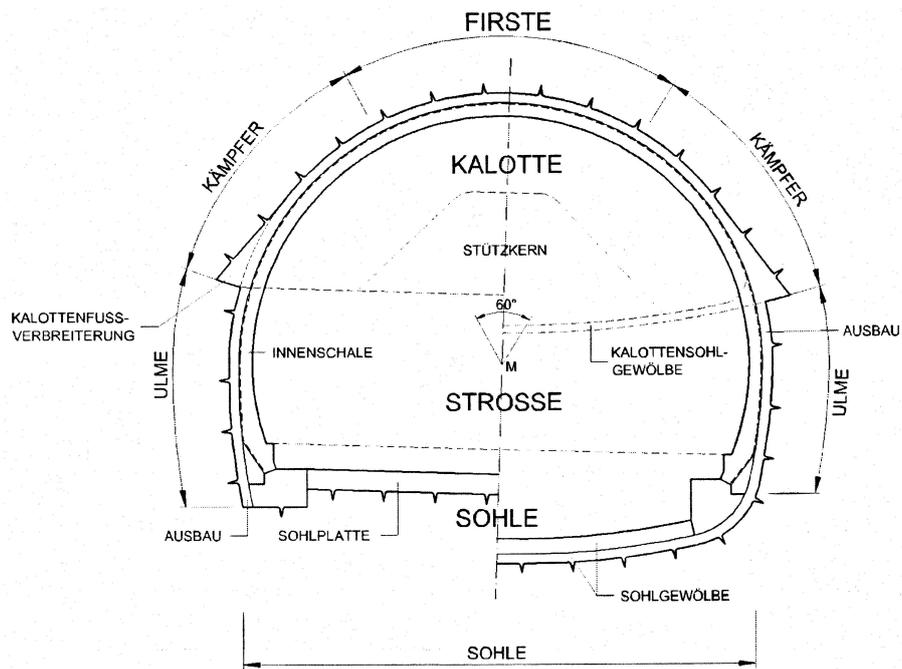


Abb. 1.1: Begriffsdefinitionen des Tunnelbaus im Quer- und Längsschnitt [20]

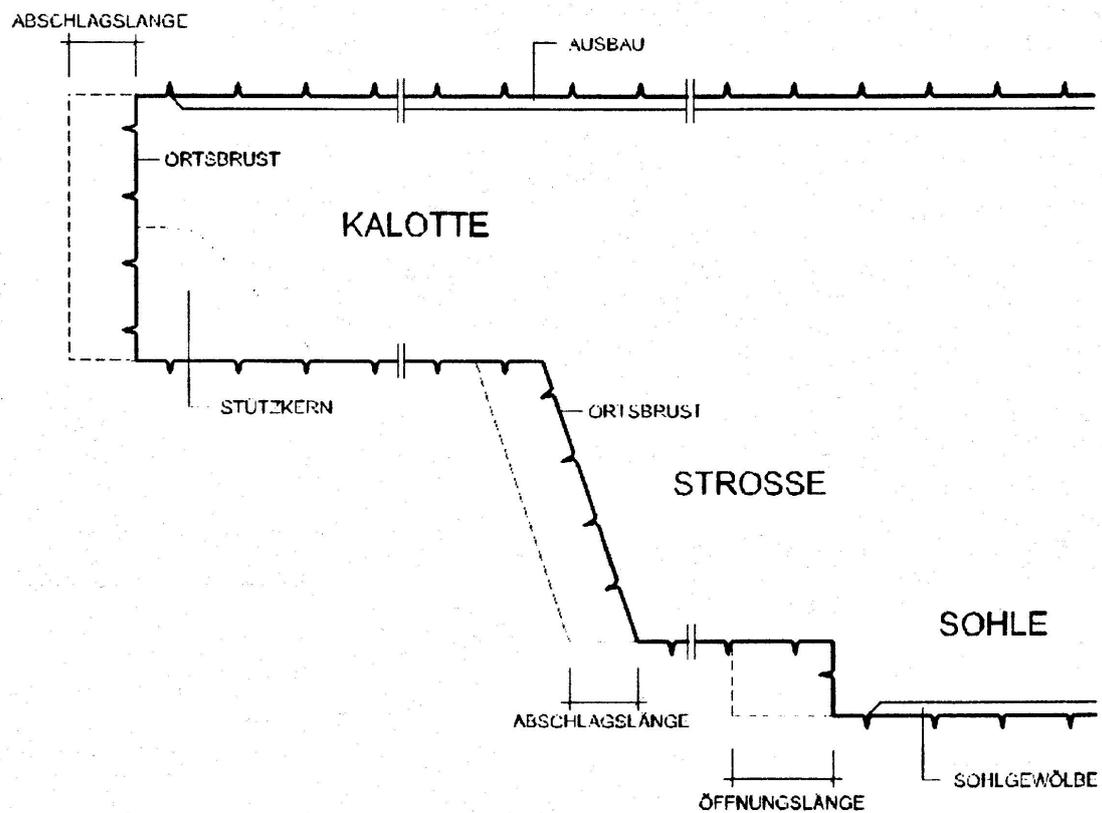


Abb. 1.2: Begriffsdefinitionen des Tunnelbaus im Quer- und Längsschnitt [20]

1.6 Abkürzungsverzeichnis

- Allgemeine Abkürzungen
 - bzw. - beziehungsweise
 - d. h. - das heißt
 - et al. - und andere
 - etc. - et cetera
 - m - Meter
 - n. Chr. - nach Christi Geburt
 - m^2 - Quadratmeter
 - v. Chr. - vor Christi Geburt
 - z.B. - zum Beispiel
- Begriffsbestimmungen
 - ABGB: Allgemeines bürgerliches Gesetzbuch
 - AG: Auftraggeber
 - AIA: Auftraggeber-Informationsanforderung
 - AN: Auftragnehmer
 - AR: Augmented Reality
 - AVVA: Ausschreibung, Vergabe, Vertrag, Abrechnung
 - BAP: BIM-Projektentwicklungsplan
 - BBT: Brenner Basistunnel
 - BCF: BIM Collaboration Format
 - BI: Business Intelligence
 - BIA: Betreiber-Informationsanforderungen
 - bsDD: buildingSMART Data Dictionary

-
- B-VG: Bundes-Verfassungsgesetz
 - CAI: Cerchar-Abrasivitäts-Index
 - CDE: Common Data Environment
 - CPS: Cyber-physikalisches System
 - EKS: Erkundungsstollen
 - ETBM: Erweiterungs-Tunnelbohrmaschine
 - FIM: Facility Information Management
 - GUID: Globally Unique Identifier
 - GV: Gebirgsverhalten
 - GVT: Gebirgsverhaltenstyp
 - IdD: Internet der Dinge
 - IFC: Industry Foundation Classes
 - IoT: Internet of Things
 - IT: Informationstechnologie
 - JSON: JavaScript Object Notation
 - KNN: Künstliche neuronale Netze
 - LB: Leistungsbeschreibung
 - LoD: Level of Detail
 - LV: Leistungsverzeichnis
 - MIDP: Master Information Delivery Plan
 - MSR: Mess-Steuerungs-Regeltechnik
 - MVD: Model View Definition
 - NATM: New Austrian Tunneling Methode
 - NÖT: Neue Österreichische Tunnelbaumethode
 - OBV: Ortsbrustverhalten

- OHB-BIM: Organisationshandbuch-BIM
- ÖGG: Österreichische Gesellschaft für Geomechanik
- REST: Representational State Transfer
- RFID: Radiofrequenzidentifikation
- RNN: Rekurrente neuronale Netze
- SM: Schildmaschine
- SV: Systemverhalten
- TBM: Tunnelbohrmaschine
- TBM-S: Tunnelbohrmaschine mit Schild
- TCS - Tunnel Control System
- TGA: Technische Gebäudeausrüstung
- TIM: Tunnelinformationsmodell
- TSM: Teilschnittmaschine
- TVM: Tunnelvortriebsmaschine
- UGB: Unternehmensgesetzbuch
- VR: Virtual Reality
- VTU: Vortriebsunterbrechung

1.7 Geschichtlicher Abriss

Der Schutz vor Witterung, wilden Tieren und Feinden erweckte erstmals den Drang des Menschen in das Erdinnere vorzudringen. Archäologische Ausgrabungen bestätigen, dass bereits der Steinzeitmensch seinen wichtigsten Rohstoff, den Feuerstein, durch bergmännische Methoden gewann. Der Untertagebau, welcher die Herstellung unterirdischer Hohlraumbauwerke im anstehenden Gebirge umfasst, ist stark mit der Entwicklung der Kulturvölker verknüpft. Bereits in den Jahrtausenden v. Chr. errichteten die Menschen Hohlgänge, untertägige Kulträume und Bewässerungsgräben. Tabelle 1.1 gibt einen groben Überblick über die wichtigsten Untertagebauwerke von der Jungsteinzeit über die Hochkulturen bis zum Mittelalter [34, 65].

Tab. 1.1: Tunnelbauwerke von der Jungsteinzeit bis zum Mittelalter [34, 65]

Zeitraum	Untertagebauwerk
2500 v. Chr.	Errichtung eines 1.000 m langen Tunnels unter dem Euphrat (Babylon) vom Königspalast zum Baal-Tempel unter der Herrschaft von Königin Semiramis
1200 v. Chr.	Errichtung von Stollen für die Wasserversorgung der griechischen antiken Stadt Mykene
1000 v. Chr.	Verbindung der Gihon-Quelle mit dem Siloah-Teich innerhalb der Stadt Jerusalem zur Gewährleistung der Frischwasserversorgung im Falle einer Belagerung
605 - 562 v. Chr.	Errichtung eines gewölbten Verkehrstunnels unter dem Euphrat zur Verbindung des Königspalasts des babylonischen König Nebukadnezar mit dem Tempel des Sonnengottes
600 v. Chr.	Errichtung eines 1600 m langen Trinkwasserstollen auf der griechischen Insel Samos
700 - 550 v. Chr.	Errichtung unterirdischer Stollensysteme für die Wasserversorgung und Kanalisation in den etruskischen Städten (nördliches Mittelitalien)
36. v. Chr.	Bau der ersten Straßentunnel bei Cumae und zwischen Neapel und Puteoli (Pozzuoli) durch Felsrücken, die bis zum Meer reichen (unter dem römischen Kaiser Octavian - heute noch benutzbar)
Ab ca. 200 n. Chr.	Errichtung der Katakomben in Rom
Im Mittelalter	Errichtung von Stollen zum Schutz von Wehranlagen, als Fluchtwege und Geheimgänge sowie von Bergwerken zur Salz- und Metallgewinnung

Der heutige Tunnelbau hat sich aus dem Bergbau entwickelt. Die Abbau- und Gerätetechnik sowie die Sicherungsmaßnahmen des Hohlraums haben auch heute noch ihre Grundprinzipien aus dem Bergbau. Zwischen beiden besteht eine technologische Wechselbeziehung, sodass viele Begriffe und praktische Erfahrungen beider Disziplinen im Austausch zueinander stehen. Der Untertagebau ist erst in der modernen Zeit zu einer Ingenieurdisziplin geworden. Tabelle 1.2 weist die Unterschiede zwischen dem Ingenieur-tunnelbau und dem Bergbau auf [13, 34].

Die gesellschaftliche Entwicklung hat zu einem enormen Anwachsen des Verkehrs- und Transportaufkommens geführt. Der Bau vieler Eisenbahntunnel im Anfang des 19. Jahrhunderts wird als der Beginn der Blütezeit des Verkehrstunnelbaus bezeichnet. Tunnel ermöglichen den Personen- und Gütertransport durch gewisse Hindernisse (Gebirge, Wasserläufe, bebaute Siedlungen) hindurch und erschließen somit vormals getrennte Gebiete. Tunnelbauwerke dienen somit dem Zusammenwachsen der Menschheit und schaffen durch die Verknüpfung nationaler Verkehrsnetze zu einem transkontinentalen Netz einen gemeinsamen Wirtschaftsraum.

Der Bauingenieur zählt neben dem Eisenbahnbau auch die Errichtung von Stollen und Kavernen beim Bau von Wasserkraftanlagen zu seinen Untertageaufgaben [34, 43].

Tab. 1.2: Unterschiede zwischen dem Ingenieurtunnelbau und dem Bergbau [13]

Ingenieurtunnelbau	Bergbau
<ul style="list-style-type: none"> • Alte Ingenieurskunst • Errichtung von Verkehrswegen und Lagerstätten • Gewährleistung der Dauerhaftigkeit (ca. 100 Jahre) in der Planung und Errichtung berücksichtigt • Oberflächennaher Vortrieb • Vermeidung von Setzungen • Ausbildungsschwerpunkte in Stahl- und Betonbau sowie der Konstruktion von Bauwerken 	<ul style="list-style-type: none"> • Reicht bis in die Steinzeit zurück • Gewinnung von Rohstoffen • Alleinige Berücksichtigung des Abbauzeitraums (Schächte und Strecken existieren nur wenige Jahrzehnte) • Abbau in großen Tiefen • Akzeptanz höherer Setzungen • Ausbildungsschwerpunkte in Geotechnik, Machbarkeit und Betrieb

Kapitel 2

Nomenklatur Tunnelbau

Tunnel sind langgestreckte, horizontal oder nur wenig geneigt verlaufende, unterirdische Hohlräume mit Ausbruchsquerschnitten von in der Regel über 25 m². Sie besitzen jeweils zwei Öffnungen zur Tagesoberfläche und werden vor allem für den Straßen- und Eisenbahnverkehr genutzt (Gerhard Girmscheid [34]).

Der Tunnelbau hat sich historisch betrachtet aus dem Bergbau entwickelt. Er umfasst heutzutage beispielsweise die Bereiche des Verkehrs- und Versorgungsbaus, welche von Bauingenieuren abgewickelt und weiterentwickelt werden [34].

Die klassischen Tunnel sind hinsichtlich ihrer Verfahrenstechnik und Kühnheit mit den heutigen Tunnelbauten vergleichbar. Die felsmechanischen Grundsätze des Tunnelbaus waren bereits Ende des 19. Jahrhunderts bekannt, konnten jedoch auf Grund mangelhaften Verbunds zwischen den Ausbau- sowie Sicherungsmaterialien und dem Gebirge nicht vollständig umgesetzt werden. Die damals vorhandenen Sicherungsmaterialien waren vorwiegend Holz und Bruchsteinmauerwerk, später kamen Stahl und Beton hinzu. Auf Grund dieser beschränkten technischen Möglichkeiten erfuhr das Gebirge starke Auflockerungen. Erst der Einsatz von neuen Materialien wie Spritzbeton, Stahlfaserspritzbeton und die Anwendung hochwertiger Stähle sowie die Weiterentwicklung der Technologien in den Bereichen Bohren, Sprengen, Schüttern und Vermessen ermöglichten die praktische Umsetzung der bereits damals bekannten Grundsätze des Tunnelbaus. Diese Weiterentwicklungen ermöglichen eine Beschränkung der durch den Ausbruch des Gebirges verursachten Bewegungen [13, 34].

Die Verwendung der Sicherungsmethoden mittels Spritzbetons, Ankern und Bogenausbaus beim zyklischen Vortrieb zeichnet sich durch eine hohe Adaptationsfähigkeit hinsichtlich variierender Gebirgsklassen aus. Spritzbetonbauweise und NÖT (Neue Österreichische Tunnelbauweise) sind weitere Bezeichnungen für diese Bauweise. Des Weiteren brachte die Verwendung von Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) einen technologischen Fortschritt im kontinuierlichen Tunnelbau. TVM ermöglichen hochmechanisierte und teilrobotisierte Ausbruch-, Förder- und Ausbauverfahren. Abbildung 2.1 veranschaulicht die Unterteilung der Tunnelbauverfahren nach Ausbruchart, Ausbruchmethode und den Sicherungsmöglichkeiten [34].

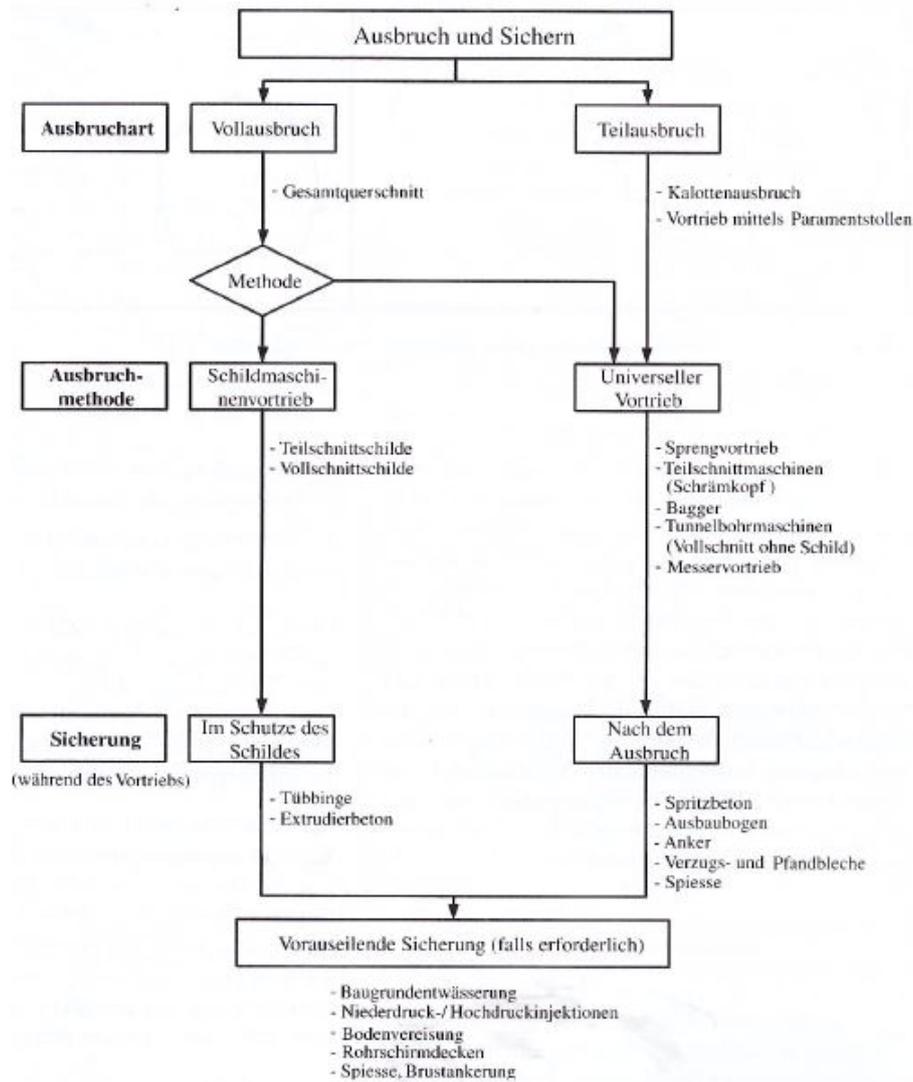


Abb. 2.1: Verfahren nach Ausbruchart, Ausbruchmethode und Sicherung [34]

Es wird zwischen Ausbrucharten im Vollausbuch und im Teilausbuch des Querschnitts unterschieden. Die Wahl der Methode wird maßgeblich durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Gebirgsverhalten (klassifiziert in der Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG)-Richtlinie, z.B. standfest, nachbrüchig),
- Hohlraumgröße und -form,
- Ausbruchmethode sowie Effizienz der verwendeten Maschinen und Installationen,
- Sicherungsmaßnahmen [34].

Im Folgenden werden die wichtigsten klassischen Bauweisen vorgestellt und näher erläutert. Die Systematisierung der im Tunnelbau angewandten Bauweisen beginnt mit dem Vollausbuch, da der Ausbruch des gesamten Querschnitts als das älteste Verfahren gilt. Nach einem Abriss

der geschichtlichen Bauweisen erfolgt die Definition der zyklischen sowie der kontinuierlichen Vortriebsmethode.

2.1 Vollausbuch

Der Vollausbuch bezeichnet den Ausbruch des Querschnitts auf seiner vollen Fläche und stellt die wirtschaftlichste Tunnelbauweise dar. Dabei muss das Tunnelbauwerk in seinem vollen Querschnitt ohne jegliche Störung des Hohlraums durch Innenabstützungen ausgebaut werden können. Dafür ist das Hohlraumbauwerk so lange offenzuhalten, bis die Sicherungsmaßnahmen und die Tunnelauskleidung eingebaut sind und somit das endgültige Gleichgewicht gewährleistet ist. Wichtige Grundlage für die Anwendung des Vollausbuchs ist das Wissen über das Verhalten und den Verlauf der Gebirgsdrücke. Diese bilden ihre volle Größe allmählich nach erfolgtem Ausbruch aus und weisen somit direkt nach Auffahren des Hohlraumes nicht ihr Maximum auf. Der rechtzeitige Einbau der Abstützung steht im direkten Zusammenhang mit der Größe des Gebirgsdrucks [43]. Diese Interaktion zwischen Ausbau und Gebirge wird in der sogenannten Gleichgewichtslinie, dargestellt in Abbildung 2.2, abgebildet. Die Grafik stellt den Zusammenhang zwischen der Gebirgskennlinie (Fenner-Pacher-Kurve) und der Ausbaukennlinie dar. Durch die Entspannung infolge des Tunnelvortriebs stellt sich entlang der Tunnellaubung eine zum Hohlraum hin gerichtete Verformung ein. Die Gebirgskennlinie bezeichnet das Verhalten des Gebirges nach dem Ausbruch und ergibt sich aus der Verformung des Ausbruchrandes in Abhängigkeit vom Gebirgsdruck. Man spricht von einem standfesten Gebirge bei Auftreten eines langfristigen Gleichgewichts des Gebirges ohne Ausbauwiderstand, anderenfalls von einem druckhaften Gebirge. Die Ausbaukennlinie definiert die verwendeten Sicherungsmittel. Sowohl die Ausbau- als auch die Gebirgskennlinie sind in das in der Abbildung 2.2 ersichtliche Diagramm eingezeichnet. Der Schnittpunkt der beiden Linien kennzeichnet das Gleichgewicht zwischen Gebirge und Ausbau. Gibt es keinen Schnittpunkt, ist die gewählte Sicherungsmethode nicht ausreichend [20, 56]

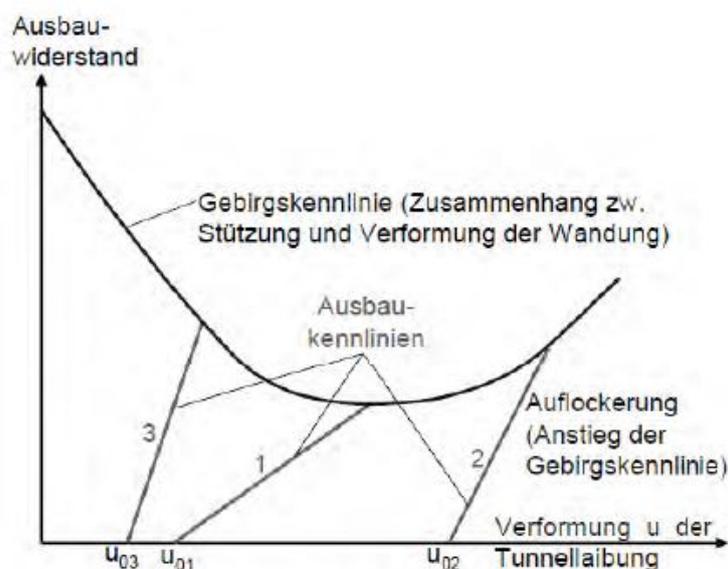


Abb. 2.2: Zusammenhang zwischen Verformung und Ausbauwiderstand mittels Gebirgs- und Ausbaukennlinie [20]

Kennlinie 1 in der Abbildung 2.2 veranschaulicht einen weichen Ausbau mit einem minimal erforderlichen Ausbauwiderstand. Kennlinie 2 bildet einen steifen Ausbau ab, der spät eingebaut wurde und somit große Verformungen bei einem großem erforderlichen Ausbauwiderstand bewirkt. Kennlinie 3 stellt einen frühzeitig eingebauten steifen Ausbau dar, der geringe Verformungen bei vergleichsweise hohem erforderlichen Ausbauwiderstand zur Folge hat [20].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entscheidung für die Ausbruchsart des Vollausbruches maßgeblich durch folgende Faktoren beeinflusst wird:

- Die Standzeit des vorherrschenden Gebirges in Abhängigkeit von der Querschnittsgröße und -form.
- Der Zeitbedarf vom Einbau bis zum Erreichen der Tragfähigkeit des Ausbaus in Abhängigkeit von der Standzeit des Gebirges. Bei Gebirge mit langer Standzeit kann gegebenenfalls auf eine Sicherung verzichtet werden, wobei ein Kopfschutz für die Gewährleistung der Sicherheit von Mannschaft und der Geräte immer notwendig ist.
- Dimension, Raumbedarf und Leistungsfähigkeit der gewählten Maschinen (z.B. Bohrwagen oder -bühnen, Bagger, Teilschnittmaschinen) sowie Einrichtungen zum Schüttern und Fördern. Dabei spielt die Querschnittsgröße eine Rolle, da zu kleine Hohlraumgrößen zu einer Behinderung der Mannschaft und Geräten führt und somit die Kosten trotz geringeren Ausbruchs und minimierter Sicherungsmaßnahmen steigen [13, 34].

Die Vorteile des Vollausbruches liegen in der gebirgsschonenden Abbauweise, da keine mehrmaligen Spannungsumlagerungen stattfinden. Des Weiteren ermöglicht der freie Arbeitsraum einen mechanischen Abbau mittels eines hochmechanisierten Linienbaubetriebs (Abbau-, Sicherungs-, Schutter- sowie Fördertechnik und Ausbau). Diese Art von Fließfertigung ermöglicht kürzere Bauzeiten. Nachteilig wirkt sich die mangelnde Anpassungsfähigkeit des Verfahrens an unerwartete schlechte Gebirgsverhältnisse und bei Wasseranfall aus. Verglichen mit den Teilausbruchsarten erfordert der Vollausbruch einen höheren baubetrieblichen Aufwand [13, 34].

2.2 Ausbruch in Teilen

Der klassische Tunnelbau mit abschnittweisem Ausbruch des Querschnitts wurde früher aus arbeitstechnischen Gründen bei großen Querschnitten angewandt. Dies beruht auf der Tatsache, dass beim Auffahren von Hohlraumbauwerken mit kleinerem Querschnitt das Gefahrenpotenzial sinkt und mit einem längeren Standhalten der natürlichen Überwölbung zu rechnen ist. Die Beherrschbarkeit des Baustoffes Gebirge wird somit erhöht. Durch die Reduzierung der Abschlagslängen, der stufenweisen Abtreppung der Ortsbrust und der Aufteilung des Querschnitts in Teilausbrüche erfolgt eine Verbesserung der Standsicherheit der freien Länge bei Gebirge mit geringer Standfestigkeit. Der Ausbruch in Teilen erfordert einen Zug auf Zug aufeinanderfolgenden Einbau der vorübergehenden Sicherungsmaßnahmen und ein ständiges Umsteifen der Pölung. Neben einem ansteigenden Mehraufwand der Arbeit, der Zeit und des Materials verursacht jeder weiterer Umsteifungsvorgang Gebirgsauflockerungen mit fortschreitendem Druckanstieg. Die Anwendung des Ausbruchs in Teilen erfolgt heutzutage nur beim Spreng- und maschinellen Vortrieb mittels Teilschnittmaschinen, Schrämbaggern etc. Der wirtschaftlichste Maschineneinsatz

im Verhältnis zu der Standzeit des Gebirges bildet die Grundlage für die Aufteilung in mögliche Teilausbrüche [34, 43].

Die Entscheidung über einen Ausbruch in Teilen wird vor allem von folgenden drei Punkten beeinflusst:

- Das Auffahren des Gesamtquerschnitts ist innerhalb der Standzeit des Gebirges nicht möglich.
- Der Zeitbedarf zum Sichern des gesamten Querschnitts ist größer als die Standzeit des Gebirges.
- Die Größe und Leistungsfähigkeit der Vortriebseinrichtungen und Ausbruchgeräte sowie Schuttereinrichtungen sind unzureichend für die Erfassung des gesamten Querschnitts [13].

2.3 Geschichtliche Bauweisen

Es entwickelten sich in der Vergangenheit in verschiedenen Teilen Europas unterschiedliche bergmännische Tunnelbauverfahren. Die alten traditionellen Bauweisen unterscheiden sich in ihrem Verfahrensablauf hinsichtlich der Öffnung des Hohlraumes sowie der Konstruktion der Sicherung und des Ausbaus. Oftmals erfolgte eine vorübergehende Sicherung durch Holzzimmerungen, welche im Verlauf des Vortriebes durch ein gemauertes Gewölbe ersetzt wurde. Dieses Gewölbe bildete den endgültigen Ausbau [20].

Im Folgenden werden die wichtigsten geschichtlichen Bauweisen vorgestellt. Die Abgrenzung zwischen den einzelnen Verfahren erfolgt über die gebräuchliche Bezeichnung nach Ländern kombiniert mit dem jeweiligen wichtigsten Verfahrensprinzip [13].

2.3.1 Belgische oder Unterfangungsbauweise

Grundsatz: Zunächst vor allem die Firste sichern! [20]

Die Belgische oder Unterfangungsbauweise fand 1828 ihre erstmalige Anwendung beim Bau des Charleroytunnels (Kanal von Charleroy nach Brüssel) und erhielt dabei ihren Namen. Sie basiert auf dem bergmännischen Grundsatz, zunächst die Firste zu sichern. Für die Erstellung des Firstgewölbes beginnt der Ausbruch mit der Kalotte. Die anschließende Konstruktion der Sicherung (früher Gewölbe als endgültige Sicherung) erfolgt von den Kämpfern ausgehend. Unter dem Schutz des fertiggestellten Gewölbes wird der Bereich der Ulmen abschnittsweise und einseitig durch Einschlitzen freigelegt. Durch die anschließende Aufmauerung eines Widerlagers in den Schlitz wird das Kalottengewölbe unterfangen. Dieser Arbeitsschritt gibt der Bauweise den Namen Unterfangungsbauweise. Die Unterfangung der Kalottenschale geschieht erst nach dem Abbau der Strosse [20, 65]. Abbildung 2.3 stellt die Ausbruch- und Ausbauabfolge der Belgischen Bauweise dar.

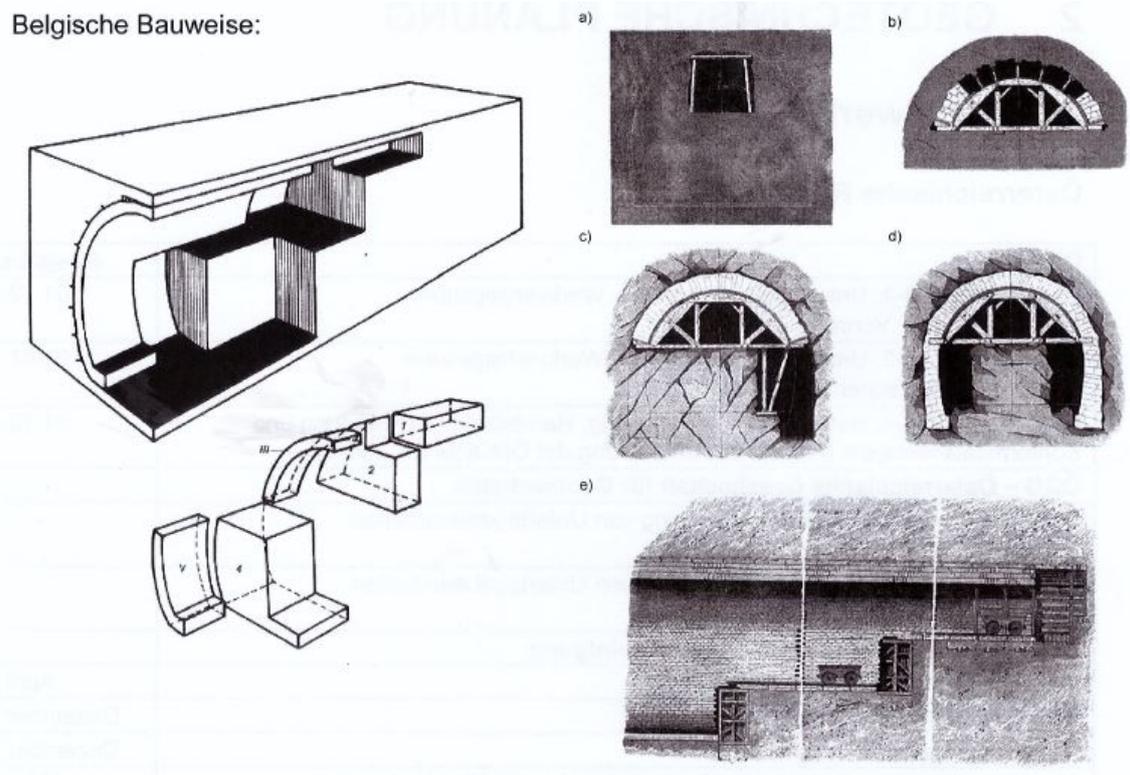


Abb. 2.3: Belgische Bauweise: Perspektivische Darstellung der Ausbruch- und Ausbaufolge (links) sowie Phasen des Bauvorgangs a)-d) und Darstellung eines Längsschnittes (e) [30]

Die Vorteile der Belgischen Bauweise liegen in der Verhinderung von Auflockerungen auf Grund der frühzeitigen Sicherung der Firste sowie der möglichen Anpassung an wechselnde Gebirgsverhältnisse. Des Weiteren handelt es sich um eine kontinuierliche Bauweise, welche eine Fließfertigung und Taktplanung ermöglicht. Nachteilig wirken sich die hohen Auflagerpressungen im Kämpferbereich aus. Durch sie entsteht eine hohe Setzungsempfindlichkeit beim Unterfangen, die insbesondere bei rolligen und plastischen Gebirgen ins Gewicht fällt. Außerdem reagiert die Bauweise sehr empfindlich gegen Seitendruck und besteht die Beschädigungsgefahr der Kalotte bei Ausbruch der Strossen im Sprengverfahren. Zuletzt ist die negative Auswirkung des späten Sohlschlusses zu nennen [13].

2.3.2 Deutsche oder Kernbauweise

Grundsatz: Die Herstellung der Widerlager steht vor allen anderen Bauvorgängen!
[20]

Die Deutsche Bauweise wurde ursprünglich in Frankreich beim Bau der Tunnel Tronquoy im Jahre 1803 und Pouilly im Jahr 1824 entwickelt. Die Bauweise fand später für verschiedene andere Projekte mit schwierigen Gebirgsverhältnissen Anwendung. Sie beruht auf den Erkenntnissen des Bergbaus und vermeidet durch das Auffahren vieler kleiner Stollen den Ausbruch eines großen unbeherrschbaren Querschnitts [30].

Die Kernbauweise zerlegt das Tunnelprofil in einzelne Teile, die nacheinander in Längsrichtung stollenartig vorgetrieben werden. Die Herstellung der Widerlager durch den Vortrieb von zwei Sohlstollen stellt den ersten Arbeitsschritt dar. Nach Aufmauerung der endgültigen Sicherung innerhalb der Sohlstollen erfolgt der Vortrieb zwei weiterer Stollen in Kämpferhöhe. Nach und nach erfolgt der Ausbruch und Ausbau neben- und übereinander gebauter Stollen. Die Reihenfolge der Teilvortriebe verfolgt dabei das Ziel eines stufenartigen Aufbaus des Mauerwerks, welcher zuletzt die Entstehung des Gewölbes ermöglicht. Der mittlere Kern bleibt bis zum Erreichen der vollständigen Tragwirkung des Gewölbes erhalten. Erst wenn die Abstützung des temporären Stützgewölbes auf den Kern nicht mehr benötigt wird, kann mit dem Abbau des Kerns begonnen werden. Ein gegebenenfalls erforderliches Sohlgewölbe kann nach Entfernung des Kerns eingezogen werden [20, 65]. Abbildung 2.4 zeigt die Ausbruch- und Ausbauabfolge der Deutschen Bauweise.

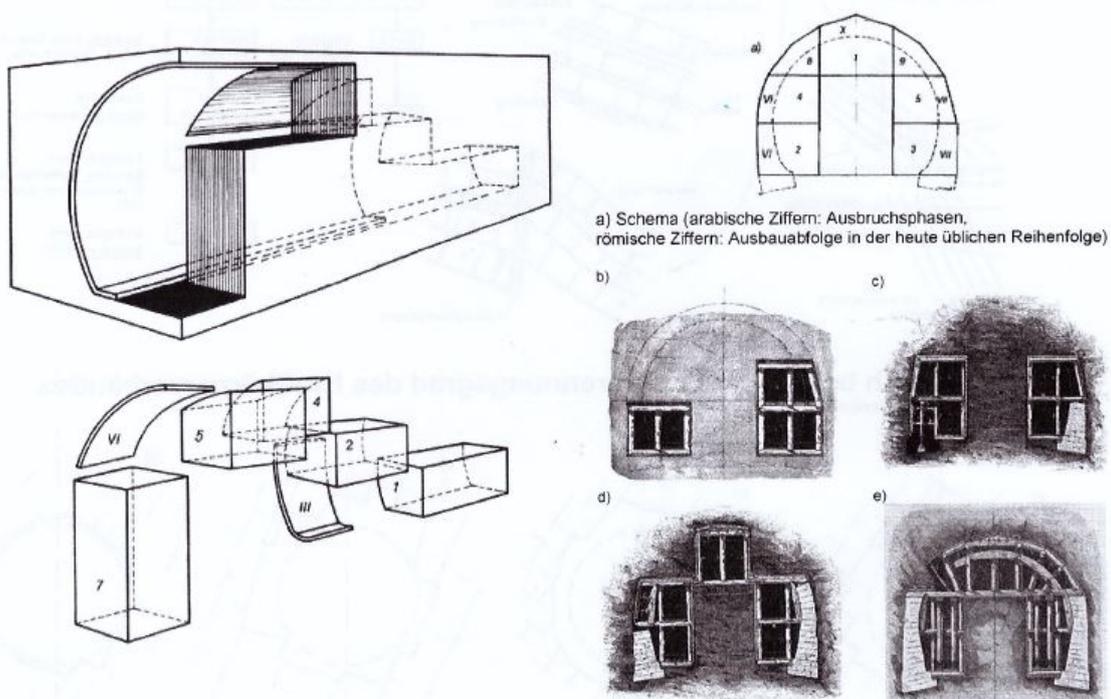


Abb. 2.4: Deutsche Bauweise: Perspektivische Darstellung der Ausbruch- und Ausbauabfolge (links) sowie Phasen des Bauvorgangs b)-e) und Darstellung eines Längsschnittes (e) [30]

Die Deutsche Bauweise weist eine Reihe an Vorteilen auf. Die Abstütmöglichkeit zum und auf dem Kern verringert die Setzungen und reduziert die Seitendruckanfälligkeit der Bauweise. Die Abstützung des Brustbereichs durch den Kern bewirkt eine Reduktion des Materials durch die Einsparung des Brustverbaus. Die Ausbildung des festen Widerlagers und die darauffolgende Aufsetzung des Kalottengewölbes gewährleistet im Allgemeinen ein setzungsarmes Ausbruchverfahren. Des Weiteren kann der Sohlstollen als Erkundungsstollen für die Gebirgsklassifikation genutzt werden. Außerdem kann er für die Wasserentlastung für die weiteren Ausbrüche genutzt werden.

Nachteilig wirken sich der große Zeitaufwand, das teure Auffahren der Teilquerschnitte sowie das teure Einbringen der Sicherung und der späte Sohlschluss aus. Das Überschneiden der sich bildenden Schutzhüllen im Gebirge führt zu Verspannungen und Gebirgsauflockerung. Die häufigen Umlagerungen auf Grund der vielfältigen Unterfangungen erhöhen generell das Risiko und die Setzungen [13].

2.3.3 Alte Österreichische oder Aufbruchbauweise

Grundsatz: Kleinräumiges Auffahren des Tunnels nach altem bergmännischem Grundsatz! [20]

Die Alte Österreichische Bauweise wurde erstmals beim Bau des Tunnels Oberau an der Eisenbahnlinie Leipzig-Dresden im Jahre 1837 angewandt. In Österreich erfolgte der Einsatz der Bauweise beim Bau des Gumpoldskirchner Tunnels im Jahre 1839 sowie beim Bau des Alpentunnels nach 1848. Es existieren eine Vielzahl an unterschiedlichen Ausbruchsabfolgen für die Aufbruchbauweise sowie einige Weiterentwicklungen der Bauweise bis in die heutige Zeit. Man unterscheidet innerhalb der Österreichischen Bauweise folgende Entwicklungsstufen der Verfahren im Sprachgebrauch:

- Alte Österreichische Bauweise
- Neuere Österreichische Bauweise
- Neue Österreichische Bauweise (NÖT)
- Neueste Österreichische Bauweise (mit Deformationsschlitzten)

Die beiden zuletzt genannten Bauweisen zählen zu den modernen Verfahren [13]. Die Methode der NÖT wird in dieser Arbeit im Kapitel 2.4.5 besprochen.

Charakteristisch für die Alte Österreichische Bauweise ist der scheibenförmige Ausbruch des gesamten Querschnitts, welcher von den Firsten bis zu der Sohle in wenigen oder vielen Teilquerschnitten erfolgt. Die Methode berücksichtigt abschnittsweise, zumindest vorübergehende Sicherungen der Teilausbrüche, welche oftmals durch nachträgliches Abfangen geschehen, bis das gesamte Profil ausgebrochen und gesichert ist. Der Einbau der endgültigen Sicherung geschieht von unten vom Sohlwiderlager nach oben zur Firste. Das Sohlgewölbe wird meistens gar nicht oder erst später eingezogen. Die vielen Variationen in der Betriebsweise verfolgen den Zweck, möglichst viele Angriffsorte freizulegen, sodass die Bauzeit durch einen erhöhten Personaleinsatz verkürzt

Alte Österreichische Tunnelbauweise:

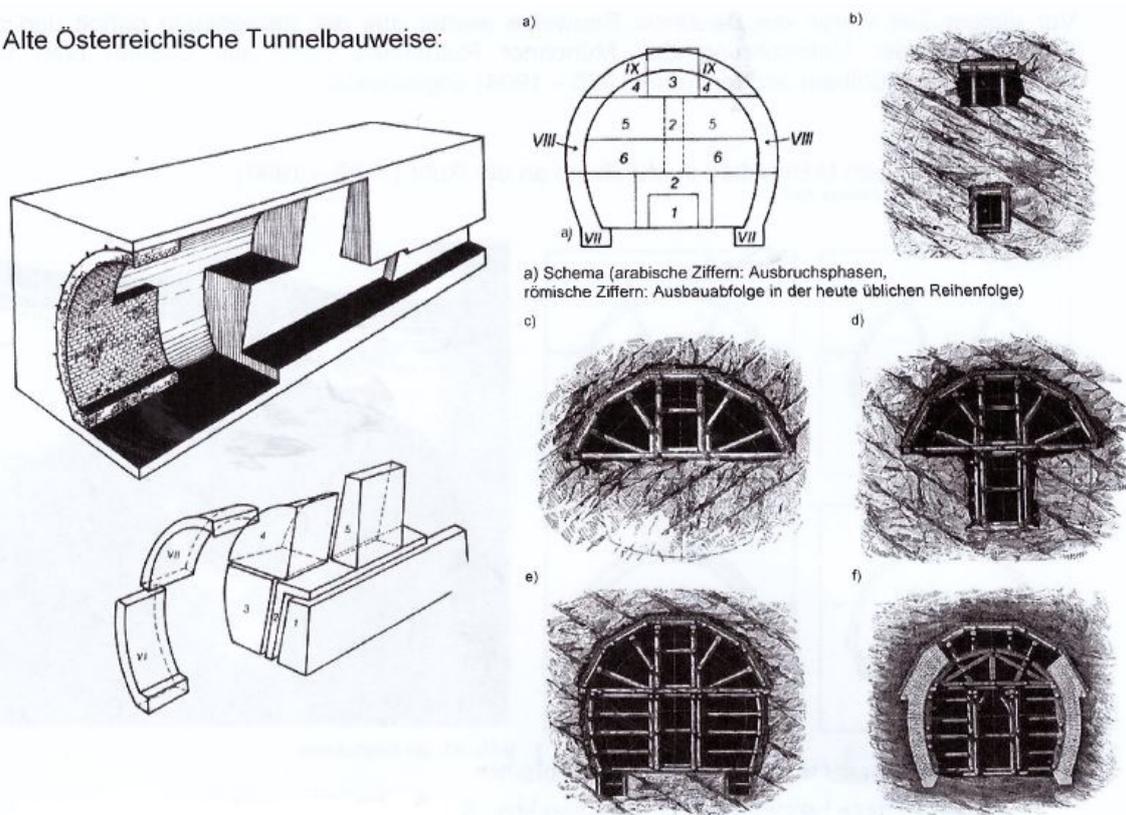


Abb. 2.5: Alte Österreichische Bauweise: Perspektivische Darstellung der Ausbruch- und Ausbauabfolge mit vorauseilenden Sohlstollen (Richtstollen), Sohlstollenerweiterung und Firtschlitz (links) sowie a) Ausbruchsschema und b)-f) Phasen des Bauvorgangs [30]

wird. Die Weiterentwicklung der Aufbruchbauweise zur Neueren Österreichische Bauweise geschah durch Einbau von wesentlichen Sicherungselementen aus Eisen [65].

Abbildung 2.5 stellt die Ausbruch- und Ausbauabfolge der Alten Österreichischen Bauweise dar.

Die Alte Österreichische Bauweise bietet eine Reihe an Vorteilen. Beispielsweise kann der Sondierstollen für Erkundungen der Gebirgsbeschaffenheit sowie als Entwässerungstollen genutzt werden. Die praktische Möglichkeit der Vermehrung der Angriffsorte führt zu einer Entzerrung der Arbeitsvorgänge und ermöglicht durch den erhöhten Einsatz von Personal eine verkürzte Bauzeit. Des Weiteren kann durch den scheibenweisen Abbau ein kompletter Ringausbau mit Sohlaussteifung erfolgen. Die Möglichkeit der Sohlaussteifung wurde jedoch selten umgesetzt. Die Aufbruchbauweise ist jedoch mit einigen Nachteilen verbunden. Der vermehrte Einsatz von Zimmerung und Lehrgerüsten führt zu beengten Arbeitsverhältnissen im Hohlraumbauwerk. Das mehrmalige Umsteifen führt zu einer Erhöhung der Setzungsempfindlichkeit und vermehrten Setzungen, welche außerdem durch die lange Standzeit des Gebirges auf einer nachgiebigen Zimmerung begünstigt werden. Der ständige Wechsel zwischen den Tätigkeiten des Ausbruchs und der Sicherung verlangsamt wesentlich die Vortriebsgeschwindigkeit und verhindert eine Fließfertigung [13, 65].

2.4 Zyklischer Vortrieb

Die Tunnelvortriebsmethoden werden in einen zyklischen und einen kontinuierlichen (maschinellen) Vortrieb unterschieden. Die Wahl der wirtschaftlichsten Vortriebsmethode steht in engem Zusammenhang mit den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen sowie dem Querschnitt, der Länge und dem Gefälle des Tunnels. Die Ausbruchsklassifizierung (siehe Kapitel 3.1) inklusive der dazugehörigen Sicherungsmaßnahmen und Parameter sind weitere Entscheidungsfaktoren für die Wahl der effizientesten Vortriebsmethode. Mit der Wahl der Vortriebsmethode geht die Bestimmung von Ausbruchart, Ausbruchssicherung, Entwässerungs-, Abdichtungs- und Stabilisierungsmethoden sowie Gerätewahl, Logistik der Linienbaustelle und den Kontrollmessungen einher. Alle Ausbruchsmethoden des Vortriebs werden hinsichtlich des Bauablaufs des Ausbruchs, des Schutterns und der Sicherung in Teilvorgänge gegliedert. Je Abschlag erfolgt ein Durchlauf der getakteten Teilvorgänge. Die gewählte Ausbruchsmethode verfolgt dabei folgende Ziele:

- effizienter Abbau des Gebirges,
- Verhinderung unerwünschter Entfestigung des Gebirges,
- erschütterungsarmer Vortrieb, insbesondere im Bereich bebauter Gebiete,
- wirtschaftlicher Einsatz der Ausbau- und Sicherungsmaßnahmen sowie
- umweltschonender und ressourceneffizienter Baubetrieb der Tunnelbaustelle [34].

Die Gliederung und der Ablauf des kontinuierlichen Vortriebs können Kapitel 2.5 entnommen werden. Zu den zyklischen Vortriebsverfahren zählen der Spreng-, Bagger- und Mischvortrieb sowie der Vortrieb mittels Teilschnittmaschine (TSM) und Messerschild. Der zyklische Vortrieb zeichnet sich im Wesentlichen dadurch aus, dass die einzelnen Arbeitsschritte des Ausbruchs, des Schutterns und der Sicherung zeitlich hintereinander und mit Hilfe von Einzelgeräten durchgeführt werden. Der Ablauf erfolgt, wie der Name erahnen lässt, zyklisch [27].

Im Folgenden werden die wesentlichsten Ausbruchsmethoden des zyklischen Vortriebs vorgestellt.

2.4.1 Sprengvortrieb

Der Sprengvortrieb vereinigt ingenieurgeologische Konzepte mit handwerklichen Arbeitsmethoden. Die Form und Größe des Hohlraumbauwerks können unterschiedliche Ausmaße annehmen und sogar innerhalb der Vortriebsstrecke variieren [34]. Der konventionelle Sprengvortrieb sieht den Einbau von Spritzbeton, Ankern und Ausbaubögen als Sicherungsmaßnahmen vor und stellt eine flexible Vortriebsmethode dar. Der Sprengvortrieb eignet sich somit besonders für schwierige und wechselhafte Gebirgsverhältnisse sowie bei unterschiedlich großen und komplexen Querschnittsgeometrien [12].

Die Methode findet besonders in Fels mit mittlerer bis hoher Festigkeit ihren Einsatz. Beim Antreffen von hohen Anteilen an abrasiven Mineralien ist das Lösen des Gesteins mittels Sprengen meist wirtschaftlicher als der Einsatz von TSM oder TBM [30].

Abbildung 2.6 veranschaulicht die Prozesskette einer Tunnelbaustelle bei einem Sprengvortrieb. Die Graphik zeigt schematisch den Einsatz der benötigten Geräte für die Teilvorgänge des Lösens, Schütterns und Stützmitteleinbaus.

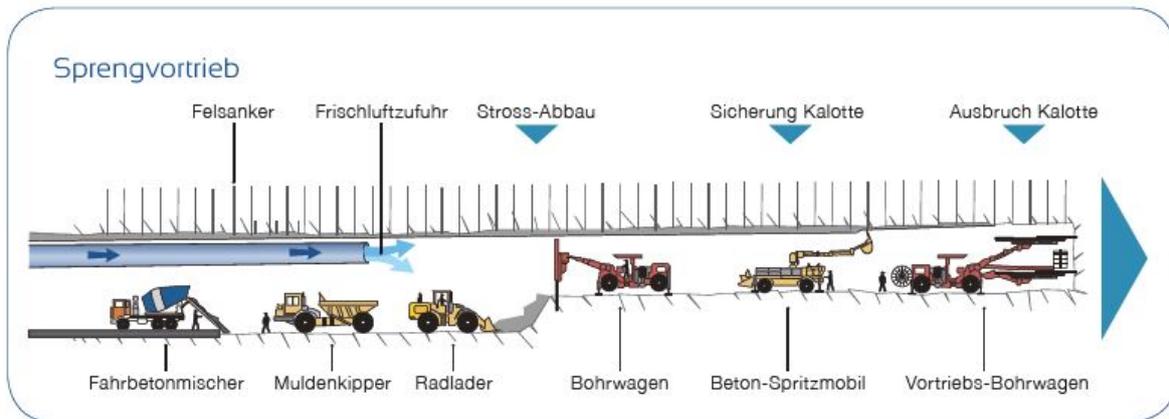


Abb. 2.6: Arbeitsablauf einer Tunnelbaustelle bei einem Sprengvortrieb [12]

Die Arbeitsschritte sind bei einem Sprengvortrieb klar definiert und bestehen aus:

- Bohren der Sprenglöcher,
- Laden der Sprenglöcher mit Sprengstoff,
- Sprengung des Gebirges,
- Lüften des Tunnelbauwerks,
- Schutterung des Ausbruchmaterials und
- Ausbruchsicherung mittels Spritzbeton, Ankern, Gitterbögen und Baustahlmatten.

Nach Durchlauf eines Sprengzyklus beginnt die Prozesskette von neuem [12].

Die einzelnen Arbeitsschritte eines Sprengzyklus sowie der gesamte Ablauf der bautechnischen Maßnahmen beim Sprengvortrieb müssen baubetrieblich optimiert aufeinander abgestimmt sein, um mittels Kosteneffizienz und optimaler Vortriebsleistung die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu gewährleisten.

Die Grundlage für einen effizienten Sprengvortrieb sind leistungsfähige Bohrgeräte mit Ladekorb zum Laden und Besetzen der Bohrlöcher sowie eine optimierte Bohrloch- und Sprengmittelplanung. Die Abschlagslängen, die Bohrlochzahl und die Lademengen werden unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse hinsichtlich der Geologie und Geometrie des Hohlraums dimensioniert. Versuchssprengungen dienen der Optimierung des Bohr-, Zünd- und Ladeschemas sowie der Zerkleinerung des Haufwerkes [34].

Heutzutage werden die Prinzipien des gebirgsschonenden und profilgenauen Sprengens angewandt. Dabei werden die Bohrlöcher in kurzen Abständen aneinandergereiht entlang des geplanten Profils angeordnet und nur schwach geladen. Der zwischen Patrone und Bohrlochwand entstehende Luftpolster gewährleistet ein Ablösen des Gesteins ohne Auswurf oder Zertrümmerung des umliegenden Gesteins. Vorteile der Methode liegen in der Verringerung der Sprengerschütterungen und der Auflockerungen des Gebirges um den Tunnelausbruch sowie in der Vermeidung von Mehrausbruch. Die parallele Anordnung der Kranzlöcher sowie die Verwendung von Millisekundenzündern tragen wesentlich zur Profilgenauigkeit bei [30, 34].

2.4.2 Baggervortrieb

Der Tunnelvortrieb mittels Baggers erfolgt im Gebirge geringer Festigkeit und im Lockergestein. Die für den Baggervortrieb eingesetzten Hydraulikbagger sind mit Tieflöffel, welche mit starken Reißzähnen bestückt sind, ausgestattet und liegen auf einem Raupenfahrwerk auf. Um den Vortrieb auch bei härteren Gesteinsdeformationen zu gewährleisten, können an dem Baggerarm anstelle des Tieflöffels für diesen Abschnitt Hydraulikhämmer oder -meißel montiert werden [55].

Für den Einsatz von Tunnelbaggern ist ein Mindestkalottenquerschnitt von etwa 20 m^2 notwendig. Abbildung 2.7 zeigt einen speziell für den Tunnelbau entwickelten Bagger, welcher eine seitliche Kippmöglichkeit der Arbeitsausrüstung um zweimal 45° besitzt.



Abb. 2.7: Tunnelbagger mit zweimal 45° um die Längsachse schwenkbarem Arm [55]

Weitere Anforderungen für speziell für den Tunnelbau entwickelte Bagger sind:

- eine große Reichweite,
- Anordnung der Hydraulikeinrichtungen im Löffelstiel zur Verhinderung von Beschädigungen,

- volle Schwenkbarkeit des Oberwagens in einem Tunnelquerschnitt bei einer Firsthöhe von 5,20 m ab der Fahrsohle und einer Breite von 5,50 m (z.B. eingleisiger U-Bahn-Querschnitt),
- verbesserte Sicht aus der Fahrerkabine bei Rückwärtsfahrt,
- Positionierung eines Planierschildes am Unterwagen um Material zusammenschieben zu können und
- Möglichkeit zur Montage eines Anbau-Hydraulikhammers oder -meißels [30].

2.4.3 Mischvortrieb

Bei wechselnden Gebirgsverhältnissen kann der sogenannte Mischvortrieb zum Einsatz kommen. Diese Vortriebsmethode setzt je nach angetroffener geologischer Situation den Spreng- oder Baggervortrieb ein. Bei dieser Vortriebsart kann auch der Fall eintreten, dass innerhalb eines Querschnittes ein Teil mittels Sprengung und ein anderer Teil mit dem Bagger vorgetrieben wird. Diese problematische Situation wird als „mixed face condition“ bezeichnet und bringt viele Erschwernisse mit sich, welche eine Verzögerung des Baufortschrittes bewirken [30].

2.4.4 Teilschnittmaschinenvortrieb

Der Tunnelvortrieb durch Teilschnittmaschinen (TSM) findet vor allem bei mittleren Gesteinsfestigkeiten ($50 - 80 \text{ N/mm}^2$) mit starker Schichtung und Zerklüftung Anwendung. Ein weiteres Einsatzgebiet ist im Lockergestein. Der TSM-Vortrieb hat einen wirtschaftlichen Einsatz bei kurzen Tunnellängen sowie wechselnden Gebirgsverhältnissen und inkonstanten Querschnittsformen. Auf Grund des erschütterungsarmen Vortriebs wird die TSM oftmals beim Bau von Untertagebauwerken in bebauten Gebieten verwendet [55].

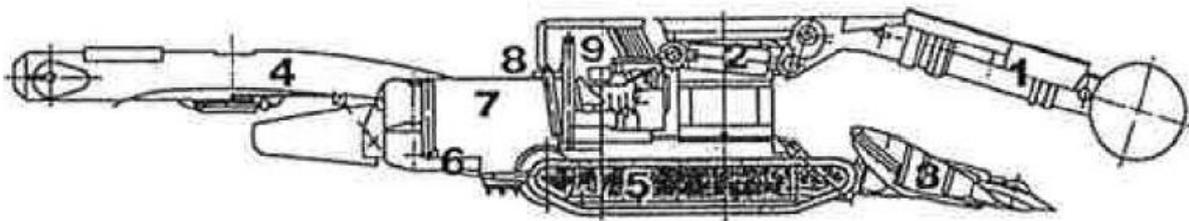


Abb. 2.8: Aufbau einer Teilschnittmaschine (TSM) – (1) Schrämarm, (2) Schwenkwerk, (3) Ladeeinrichtung, (4) Kettenförderer, (5) Raupenfahrwerk, (6) Rahmen, (7) Elektrische Ausrüstung, (8) Hydraulische Ausrüstung, (9) Fahrerstand [55]

Abbildung 2.8 zeigt skizzenhaft den Aufbau einer TSM. Eine TSM vereinigt in sich die Einrichtungen für mehrere Arbeitsvorgänge und stellt somit ein multifunktionales Gerät dar. Sie ist so aufgebaut, dass sie das Gestein an der Ortsbrust mechanisch löst, danach das gelöste Material schuttert. Während des Schutterprozess wird das Ausbruchsmaterial durch das Gerät

mechanisch aufgenommen und anschließend mittels Stetigförderer in ein Transportgerät geladen. Die TSM integriert somit im Gerät ein Abbau- und Schutterssystem, welches unter beengtesten Platzverhältnissen und ohne Wendemanöver kontinuierliche Vortriebsleistungen ermöglicht. Die TSM wird zumeist durch einen Maschinisten mittels einer Remote-Control-Steuerung bedient. Der Maschinist kann somit aus sicherer Entfernung und mit optimaler Sichtposition den Abbau des Gebirges durch den an der TSM befestigten Schrämkopf sowie den anschließenden Schutterprozess steuern. Die TSM ermöglicht einen kontinuierlichen Arbeitszyklus zwischen Abbruch, Schuttern, Sichern und Fördern, im Gegensatz zum diskontinuierlichen Arbeitszyklus des Sprengvortriebs. Insgesamt erfüllt die TSM baubetrieblich betrachtet folgende Aufgaben:

- Abbau der Ortsbrust durch den Schrämkopf,
- Aufnahme des gelösten Materials durch die Ladeeinrichtung sowie
- Förderung des aufgenommenen Ausbruchmaterials durch einen Stetigförderer zur direkten Beschickung von Transportfahrzeugen oder sekundären Stetigförderanlagen [34].

2.4.5 Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode NÖT

Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) – im Englischen auch als New Austrian Tunnelling Method (NATM) bezeichnet – verfolgt das Ziel, das Gebirge als wichtigsten Bauteil eines Tunnels in seiner Funktion so weit wie möglich zu unterstützen. Durch Aktivierung eines Gebirgstragringes wird der den Hohlraum umgebende Gebirgsteil zum Mittragen herangezogen und somit tragender Bauteil. Damit eine weitestgehende Erhaltung der Gebirgsfestigkeit gewährleistet werden kann, müssen die Sicherungsarbeiten rasch nach dem Ausbruch erfolgen. Kritische Entspannungen und Auflockerungen des Gebirges werden dadurch vermieden. Bei größeren Querschnitten oder bei ungünstigen Gebirgsverhältnissen erfolgt der Ausbruch abschnittsweise unterteilt in einen Kalotten-, Strossen- und Sohlbereich.

Die NÖT besitzt eine Reihe an Grundsätzen, welche bei ihrer Durchführung beachtet werden müssen. Im Folgenden werden neben der Erhaltung der Gebirgsfestigkeit die wichtigsten Punkte des Konzepts der NÖT vorgestellt:

- Kenntnis des geomechanischen Gebirgsverhaltens sowie deren Anwendung,
- zeitgerechter Einsatz geeigneter Sicherungsmaßnahmen zur Vermeidung von ungünstigen Spannungs- und Verformungszuständen,
- besonderes Augenmerk liegt auf dem rechtzeitigen Einbau des statisch wirksamen Sohl-schlusses, welcher dem Gebirgstragring die statische Funktion der geschlossenen Röhre verleiht,
- Berücksichtigung des Zusammenwirkens von Gebirge und Sicherungsmaßnahmen durch die Optimierung des Ausbauwiderstandes in Abhängigkeit von den zulässigen Verformungen,
- messtechnische Beobachtung zur Kontrolle und Optimierung [20, 56].

Die Grundsätze der NÖT gehen auf ein Patent von L. v. Rabcewicz aus dem Jahr 1948 zurück. Der vorübergehende Einbau nachgiebiger Sicherungselemente soll den Abbau des Gebirgsdrucks durch Zulassung von Bewegungen und Ableitung in das umgebende Gebirge ermöglichen. Die endgültige Sicherung erfährt somit weniger Belastung und kann wesentlich wirtschaftlicher konstruiert werden. Begleitende Messungen beobachten auftretende Spannungen und Verformungen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse fließen in die rechnerischen und konstruktiven Nachweise ein [13]. Die Sicherungsmaßnahmen verwendeten früher vor allem Holzrüstungen, heute erfolgt der Einbau von (bewehrtem) Spritzbeton, Ankern und Stahlträgern. Die Verwendung dieser Technologien verwandelt die NÖT in ein flexibles und anpassungsfähiges Vortriebs- und Ausbaukonzept, das sich schnell an wandelnde Gebirgsverhältnisse anpassen kann. Es wird somit ein wirtschaftlicher und sicherer Tunnelvortrieb ermöglicht [56].

Im Folgenden werden die wichtigsten Sicherungsmaßnahmen der NÖT und deren Funktion sowie Wirkungsweise aufgezählt.

- Spritzbeton
 - Vermeidung von Auflockerungen durch Versiegelung der Felsoberfläche – Verbundkonstruktion des Baustoffes Gebirge-Beton,
 - radialer Stützdruck auf das Gebirge übt einen Ausbauwiderstand aus,
 - ermöglicht eine hohlraumlose, satte Verbindung zwischen dem Gebirge und der anschließenden Sicherung;
- Stahl- oder Gitterträger/ Tunnelbögen
 - Schutzmaßnahme gegen Ausbrechen und Herabfallen sich lösender Felsblöcke bis zur Erhärtung des Spritzbetons,
 - radialer Stützdruck auf das Gebirge übt einen Ausbauwiderstand aus,
 - Ringbewehrung der Spritzbetonschale;
- Anker
 - Ausweitung des Tragrings der Verbundkonstruktion tiefer ins Gebirge,
 - radialer Stützdruck auf das Gebirge übt einen Ausbauwiderstand aus,
 - Anheften gelockerter Felsblöcke an das Gebirge, Verdübelung von Felstrennflächen (Behinderung von Scherverschiebungen) sowie Behinderung der Kinematik von neuen Brüchen,
 - teilweiser Abbau von Auflockerungen durch den Ausbruch (z.B. Sprengen) [13, 56].

Die NÖT wird dem zyklischen Vortrieb zugeordnet, da die Teilvorgänge des Ausbruchs, des Schutterns und des Einbaus der Sicherungsmittel im Wesentlichen zeitlich hintereinander und mit Hilfe von Einzelgeräten erfolgen. Der Tunnel wird normalerweise bei der NÖT mittels Sprengens, Baggers oder durch eine Teilschnittmaschine vorgetrieben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Nutzung der Tragfähigkeit des Gebirges mit Hilfe von Sicherungsmitteln, wie beispielsweise Spritzbeton, sowie der Berücksichtigung messtechnischer Beobachtungen eine wirtschaftliche und sichere Art der Hohlraumstabilisierung ermöglicht. Der hohe Flexibilitätsgrad während der Bauausführung ermöglicht es, nahezu alle Gebirgsverhältnisse zu beherrschen und die Risiken des Vortriebes stark zu reduzieren. Dabei sind die Anwesenheit des Planers während der Bauausführung sowie eine passende Anwendung der unterschiedlichen bautechnischen Maßnahmen an die gegebenen Verhältnisse für einen wirtschaftlichen Tunnelbau unumgänglich [30].

2.5 Kontinuierlicher Vortrieb

Der kontinuierliche Vortrieb bzw. maschinelle Tunnelvortrieb erfolgt mittels Tunnelvortriebsmaschinen (TVM). TVM werden im Allgemeinen in Tunnelbohrmaschinen (TBM) und Schildmaschinen (SM) unterteilt. Im Wesentlichen erfolgen beim kontinuierlichen Vortrieb die einzelnen Arbeitsschritte des Ausbruchs, Ladens und Abtransports gleichzeitig und innerhalb der gewählten TVM [30].

Der Abbau des Tunnelquerschnitts erfolgt bei TVM entweder im Vollschnitt über die gesamte Fläche mittels Bohrkopf oder Schneidrad oder teilflächig durch geeignete Lösevorrichtungen. Der Vorschub der Maschine während des Abbauprozesses passiert kontinuierlich oder intermittierend. Abbildung 2.9 veranschaulicht die Einteilung der TVM. Die Systematik unterscheidet zwischen Tunnelbohrmaschinen (TBM), Doppelschildmaschinen (DSM), Schildmaschinen (SM) und Kombinationsschildmaschinen (KSM) [9]. Die Wahl der Vortriebsmaschine hängt maßgeblich von den vorhandenen geologischen und hydrogeologischen sowie den projektspezifischen baubetrieblichen Bedingungen ab. Baugelogistische und wirtschaftliche Überlegungen sowie die Länge der vorzutreibenden Strecke unter Einhaltung der vorgegebenen Bauzeit bedingen oftmals eine Kombination mehrerer Vortriebsmethoden in unterschiedlichen Tunnelabschnitten [12].

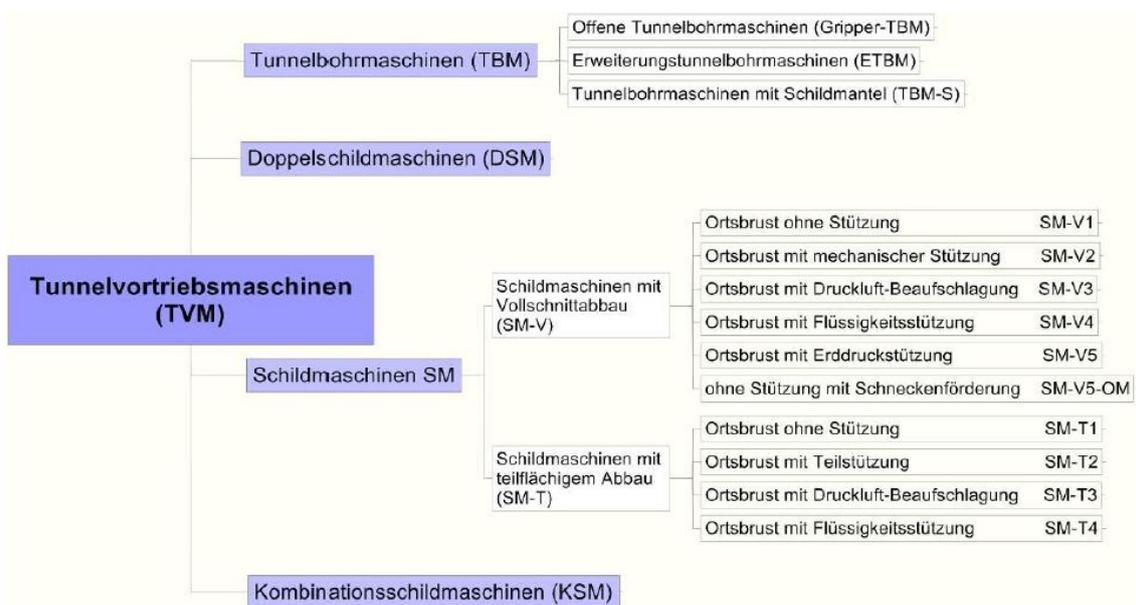


Abb. 2.9: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) [9]

Des Weiteren können der Rohrvortrieb sowie das Vorpressverfahren dem kontinuierlichen Vortrieb zugeordnet werden. Beim Rohrvortrieb erfolgt mittels hydraulischer Pressen der Vorschub eines Rohrstranges von einem Start- zu einem Zielschacht. Der an der Ortsbrust vorhandene Boden wird dabei maschinell oder manuell abgebaut. Beim Vorpressverfahren wird ein zuvor hergestellter Baukörper mittels hydraulischer Pressen bei parallelem Aushub in den Erdboden hineingedrückt. Das Verfahren eignet sich nur für kurze Strecken und wird zumeist bei der Herstellung von Unterführungen angewendet [30].

2.5.1 Tunnelbohrmaschinen

Tunnelbohrmaschinen (TBM) finden ihren Einsatz in standfestem bis gebrächem Fels mit nicht zu hoher Abrasivität. Das Festgestein kann Gesteinsfestigkeiten von etwa 50 bis 300 MN/m^2 aufweisen. Ihr Anwendungsspektrum umfasst jedoch nicht lockeres bis bodenähnliches Gestein. TBM mit Schild werden bei nachbrüchigem bis gebrächem Gebirge eingesetzt, TBM ohne Schild bei standfestem bis nachbrüchigem Fels verwendet. Im Allgemeinen kann nur ein Kreisquerschnitt vorgetrieben werden [55, 69].

Eine TBM entspricht einer Logistikfabrik unter Tage. Sie besteht im Wesentlichen aus einem Bohrkopf und einer Nachläuferkonstruktion. Der Bohrkopf weist einen Durchmesser von etwa zehn bis 15 Metern auf und ist mit Hartgesteinschneidrollen (Disken) besetzt, welche durch Rotation und hohen Anpressdruck Felschips aus der Ortsbrust brechen. Die Nachläuferkonstruktion hinter dem Bohrkopf beherbergt die Einrichtungen für die Entsorgung des Ausbruchsmaterials sowie für die Versorgung des Vortriebs. Des Weiteren sind auf ihr die notwendigen Geräte für die Sofortsicherungsmaßnahmen hinter der Ortsbrust sowie Lüftungs- und Entstaubungseinrichtungen und auch Hilfseinrichtungen wie Feuerlöscher und Toiletten installiert. Abbildung 2.10 zeigt schematisch die Logistikfabrik einer TBM bei einem maschinellen Vortrieb. Die wesentlichsten Vorteile des maschinellen Vortriebs liegen in der schnellen konstanten Vortriebsleistung und der relativ hohen Arbeitssicherheit für das eingesetzte Personal. Da der baubetriebliche Aufwand für die Inbetriebnahme einer TBM sehr hoch ist, rentiert sich der Einsatz einer TBM erst bei längeren Streckenabschnitten. [12].

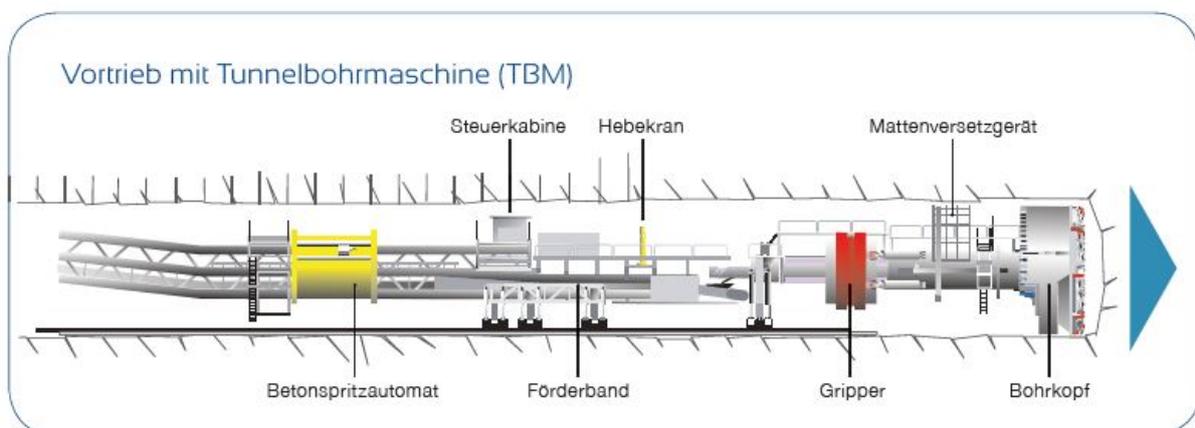


Abb. 2.10: Bohrkopf und Nachläuferbereich einer Tunnelbohrmaschine [12]

Abbildung 2.9 auf Seite 42 zeigt die verschiedenen Typen von Tunnelbohrmaschinen: Offene Tunnelbohrmaschine (Gripper-TBM), Erweiterungstunnelbohrmaschine (ETBM) und Tunnelbohrmaschinen mit Schildmantel (TBM-S). ETBM werden im Festgestein eingesetzt, um einen zuvor hergestellten durchgehenden Pilotstollen auf den geplanten endgültigen Durchmesser zu vergrößern. Im Festgestein mit geringer Standzeit oder nachbrüchigem Fels werden die TBM mit einem Schildmantel versehen. In diesem Fall ist ein Ausbau im Schutze des Schildmantels möglich. Beim Vortrieb kann sich die Maschine auch gegen den Ausbau abstützen. Die offenen TBM verfügen über keinen geschlossenen Schildmantel. Sie verspannen sich vor jedem Bohrhub mithilfe von seitlich ausfahrbaren Hydraulikzylindern fest an der zuvor ausgebrochenen Tunnelwand. Die außen liegenden Gripperplatten oder Gripperschuhe verspannen sich somit radial gegen die Hohlraumwandung. Man kann daher das Gebirge sehen [30].

Doppelschildmaschinen (DSM) vereinen die Vortriebssysteme der Gripper-TBM und der TBM-S. Sie bestehen aus zwei nacheinander angeordneten Maschinenteilen, wobei die erste Komponente den Bohrkopf und die Hauptvortriebspresen, der hintere Bereich die Nebenvortriebspresen und die Grippereinrichtung trägt. DSM werden auch als Teleskopschilde bezeichnet, da der Hauptvortriebszylinder mit einem Teleskopschild geschützt ist, welcher den Frontschild mit dem Gripperschild verbindet. Die Kombination der beiden Vortriebssysteme ermöglicht den Einsatz von DSM im standfesten Gebirge mit phasenweisen Abschnitten von nachbrüchigem bis gebräuchtem Fels. Im Bereich des standfesten Gebirges gleicht der Vortriebszyklus einer Gripper-TBM. Der Vortriebszylinder dient in diesen Gebirgsabschnitten einzig dem Zweck der Lagesicherheit des nachfolgenden Tübbingeinbaus sowie des Nachsetzens der Maschine. In den Schwächezonen würden die Vorspannplatten kein ausreichendes Widerlager finden. Daher erfolgt der Vortrieb durch Abstützung auf dem zuletzt errichteten Tübbingring. Der Teleskopschild ist in dieser Zone eingefahren. Da DSM keine aktive Ortsbruststützung vorsehen, muss sich das Gebirge bis zur vollständigen Vermörtelung oder Verblasung des Ringspalts mit Perlkies selbstständig halten [55, 69].

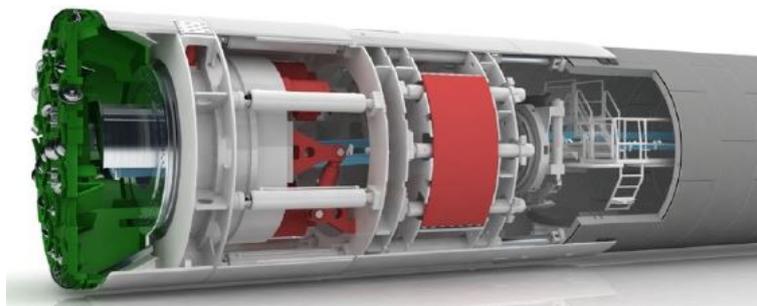


Abb. 2.11: Aufbau einer Doppelschild-TBM [69]

Abbildung 2.11 zeigt den Aufbau einer Doppelschild-TBM. Hinter dem in grün dargestellten Bohrkopf sitzt das ausklappbare Teleskopschild, welches mit den Hauptvortriebszylindern ausgestattet ist. Das dahinter positionierte Gripperschild umfasst die Gripperverspanneinheit (rot), die Hilfsvortriebszylinder und den Schildschwanz. Der letzte Ausschnitt stellt den Tübbingerrektor dar, der zum Versetzen der Segmente beim Ringbau dient.

2.5.2 Schildvortriebe

Schildmaschinen werden laut der Systematik in Abbildung 2.9 in Vollschnitt- und Teilschnittmaschinen unterschieden. Beim Vollschnitt wird der komplette Querschnitt in einem Zug abgebaut. Beim Teilschnittabbau wird der teilflächige Vortrieb des Tunnelprofils durch Teilschnittfräsen oder Bagger erreicht. In jeder Kategorie wird außerdem zwischen Maschinentypen mit oder ohne Ortsbruststützung unterschieden. Die Wahl der Ortsbruststützung hängt von den örtlichen Rahmenbedingungen und der gewählten Abbaumethode ab. Schildmaschinen finden vorwiegend im Lockergestein mit und ohne Grundwasser ihren Einsatz. Lockergesteinböden weisen geringe Stehzeiten des vorgetriebenen Hohlraums auf und benötigen daher den Schild für einen geschützten fortschreitenden Abbau [20, 69].

Hinsichtlich ihrer Art der Ortsbruststützung lassen sich die Schildmaschinen in Vollschnitt- und Teilschnittmaschinen folgendermaßen untergliedern:

- Schildmaschinen für Vollschnittabbau (SM-V)
 - Ortsbrust ohne Stützung (SM-V1)
 - Ortsbrust mit mechanischer Stützung (SM-V2)
 - Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung (SM-V3)
 - Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-V4)
 - Ortsbrust mit Erddruckstützung (SM-V5)
- Schildmaschinen für Teilflächenabbau (SM-T)
 - Ortsbrust ohne Stützung (SM-T1)
 - Ortsbrust mit mechanischer Teilstützung (SM-T2)
 - Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung (SM-T3)
 - Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-T4) [9]

Das Auffahren des Hohlraumes sowie der Ausbruch des vorliegenden Lockergesteinsverbandes an der Ortsbrust werden im Wesentlichen durch eine zylindrische Stahlkonstruktion erreicht, welche durch mechanisierte Prozesse in der trassierten Hohlraumachse nach vorne geschoben wird. Die Schildkonstruktion nimmt die dabei entstehenden Gebirgsdrücke deformationslos auf. Bis durch den sogenannten Schildschwanz der temporäre oder der endgültige Ausbau geschieht, muss die Stahlkonstruktion des Schildes die Ausbruchswandung sichern. Die für den fortschreitenden Vortrieb benötigten Vorschubkräfte werden durch Hydraulikpressen erzeugt, welche sich auf das Widerlager, geformt durch den bereits bestehenden Ausbau, stützen. In ihrer Funktionsweise unterscheidet sich die SM durch ihre aktive Ortsbruststützung von der TBM-S [28].

SM mit Teilflächenabbau verfügen zum Abbau der Ortsbrust über einen in der Abbaukammer des Schildes gelagerten längsschneidenden Schrämkopf, der über einen gelenkig gelagerten Teleskoparm geführt wird. Der Teleskoparm ermöglicht durch die Auflagerung auf einem Schwenkwerk Bewegungen in horizontaler und vertikaler Richtung. Seitlich angeordnete hydraulische Pressen werden zum Ein- und Ausfahren des Schrämarms verwendet und produzieren die erforderliche Anpresskraft. Eine auf der Schildsole angebrachte Ladevorrichtung nimmt das gelöste Ausbruchsmaterial auf und transportiert es zu der Fördereinrichtung in Form eines Förder- oder Kratzbandes (nicht bindige Böden) oder einer Förderschnecke (feuchte, schluffige und tonhaltige Böden). Die Sondereinrichtung eines Hydraulikhammer ermöglicht die Zerstörung von auftretenden Findlingen.

Bei sehr großen Schilddurchmessern werden bei offenen Schilden mit Teilflächenabbau Bühnen zur Unterteilung der Ortsbrust in arbeitstechnisch günstige Abschnitte errichtet. Dadurch werden eine zusätzliche mechanische, horizontale Linienstützung der Ortsbrust sowie der Einbau einer Trägervorrichtung für die Abbaugeräte ermöglicht. Im Sohlbereich wird meist ein Kombinationsgerät zum Abbauen und Schüttern verwendet.

SM mit Vollflächenabbau sind mit einem Schneidrad als Abbauwerkzeug bestückt. Der vollflächige Abbau der Ortsbrust erfolgt mit jeder Umdrehung des Schneidrads, welches in der Abbaukammer des Schildes gelagert ist [34].

SM sowohl mit Vollflächenabbau als auch mit Teilflächenabbau weisen folgende Varianten der Ortsbruststützung auf.

Ortsbrust ohne Stützung

Der Einsatzbereich dieses SM-Typs beschränkt sich auf weitgehend kohäsive Lockergesteine mit hohem Feinkornanteil und hoher Scherfestigkeit ohne Grundwasser. Diese Art der Ortsbruststützung darf nur bei Nachweis der ausreichenden Standfestigkeit der Ortsbrust und des Abbruchbereichs vor der Ortsbrust bis zum Einbau des Tunnelausbaus ausgeführt werden. Abbildung 2.12 zeigt eine Systemskizze der natürlichen Ortsbruststützung durch ihre eigene Standfestigkeit oder eine Böschung [55].



Abb. 2.12: Systemskizze – Natürliche Stützung [55]

Ortsbrust mit mechanischer Stützung

Die mechanische Stützung der Ortsbrust erfolgt mittels am Schneidrad montierten Verbauplatten und Arbeitsbühnen, die hydraulisch gegen die Ortsbrust gepresst werden. Abbildung 2.13 zeigt

dies skizzenhaft. Das nahezu geschlossene Schneidrad (Speichenrad) baut den vorherrschenden Boden mittels schälender Wirkung ab. Schlitzte im Schneidrad ermöglichen dem Ausbruchsmaterial in die Abbaukammer und zur anschließenden Schutterung zu gelangen. Die partielle Freilegung der Ortsbrust gewährt eine hohe Arbeitssicherheit der Abbauarbeiten [55, 69].

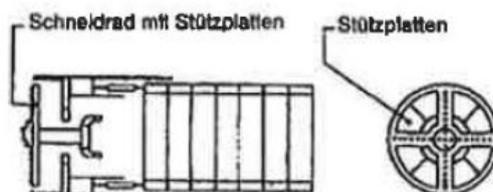


Abb. 2.13: Systemskizze – Mechanische Stützung [55]

Bei Vortrieb unterhalb des Grundwasserspiegels sind zusätzliche Maßnahmen zur Wasserhaltung wie beispielsweise einer Druckluftstützung notwendig. Vorteilhaft bei der mechanischen Ortsbruststützung sind die schnelle Installation und der rasche Wechsel verschiedener Abbauwerkzeuge und die damit einhergehende flexible Adaption an wechselnde Untergrundverhältnisse [55].

Ortsbrust mit Druckluftstützung

Diese Art der Ortsbruststützung ermöglicht den Einsatz der SM im Grund- oder Schichtwasser. Die dabei eingesetzte Druckluft drängt das Wasser durch Überdruck in den Boden und verhindert damit seinen Eintritt durch die Ortsbrust in den Bereich des Vortriebs. Voraussetzung für den Einsatz der Methode ist, dass keine wasserundurchlässigen Schichten oberhalb der SM liegen. Des Weiteren funktioniert diese Stützung bei hoher Durchlässigkeit des anstehenden Bodens und damit einhergehendem hohen Luftverbrauch nur sehr eingeschränkt. Abbildung 2.14 veranschaulicht die Wirkungsweise einer Druckluftstützung [69].

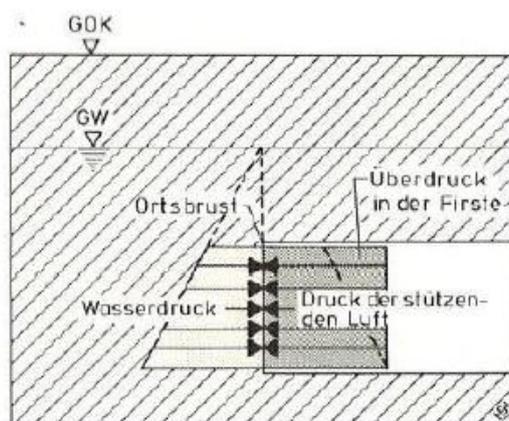


Abb. 2.14: Wirkungsweise – Druckluftstützung [55]

Es werden zwei Arten der Druckluft-Beaufschlagung unterschieden: unmittelbare Wirkung des Überdrucks im gesamten aufzufahrenden Hohlraum oder Einbau einer Druckwand, sodass nur

die Abbaukammer unter Überdruck gehalten wird. Beide Fälle erfordern Druckluftschleusen und -schotten für den Materialtransport sowie separate Personenschleusen. Bei hohem Erddruck kann eine zusätzliche mechanische Stützung erforderlich werden, da die Druckdifferenz nicht direkt an der Ortsbrust ihre Wirkung zeigt. Abbildung 2.15 zeigt beispielhaft den Aufbau einer SM mit Druckluftstützung [30, 69].

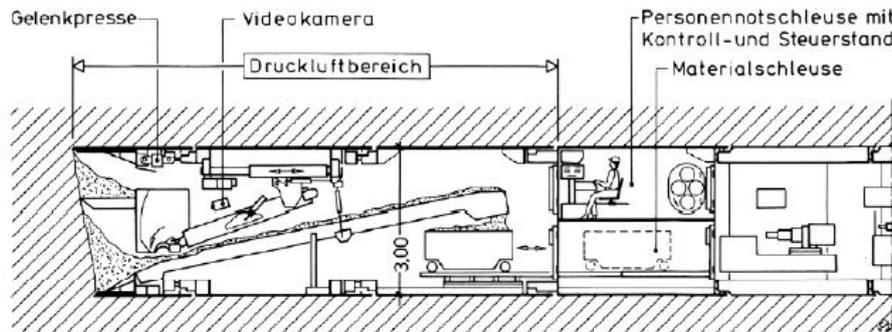


Abb. 2.15: Schematische Darstellung einer Ortsbruststützung mit Druckluft [55]

Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung

Diese Methode wird bei nicht standfesten, feinteilarmen Böden, auch im Grundwasser eingesetzt. Dabei stützt eine in der Abbaukammer unter Druck stehende Flüssigkeit (z.B. Bentonitsuspension) die Ortsbrust. Nach dem Abbau des anstehenden Bodens mit dem Schneidrad, wird das Ausbruchsmaterial mit der Stützflüssigkeit gemischt und zusammen mit ihr über eine Förderleitung abgepumpt. Im nächsten Arbeitsschritt erfolgt die Trennung und Reinigung des Boden-Stützflüssigkeit-Gemisches sowie die Rückleitung der Stützflüssigkeit in die Abbaukammer. Der Anteil der Feinteile (Durchmesser kleiner 0,02 mm) sollte unter zehn Prozent liegen, sodass der Energieeinsatz bei der Separation des Gemisches möglichst gering gehalten wird. Abbildung 2.16 zeigt eine schematische Darstellung einer Flüssigkeitsstützung [30, 55].

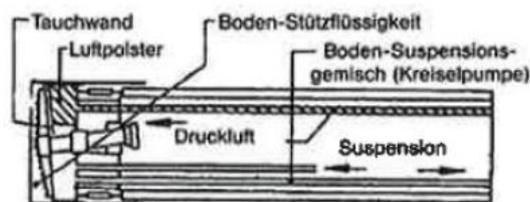


Abb. 2.16: Schematische Darstellung einer Flüssigkeitsstützung [55]

Der Stützdruck wird bei der Flüssigkeitsstützung über die Drehzahl der Förder- und Speisepumpe oder über einen Luftpolster geregelt. Die letzte Option ermöglicht eine Entkoppelung der Suspensionsumlaufmenge von der Stützdrucksteuerung und wird beim sogenannten Mixschild eingesetzt. Dabei wird der Einsatz einer Tauchwand notwendig, welche die Abbaukammer in zwei Sektionen teilt. Die Suspension gewährleistet die Stützung des vorderen Bereichs der Ortsbrust. Im Bereich hinter der Tauchwand füllt die Suspension den Bereich unterhalb der Maschinenachse aus, der Luftpolster den oberen Abschnitt. Hohe Flexibilität und Sicherheit bei wechselnden Gebirgsverhältnissen sind Vorteile dieser Steuerungsmöglichkeit [69].

Abbildung 2.17 zeigt die Wirkungsweise einer Flüssigkeitsstützung.

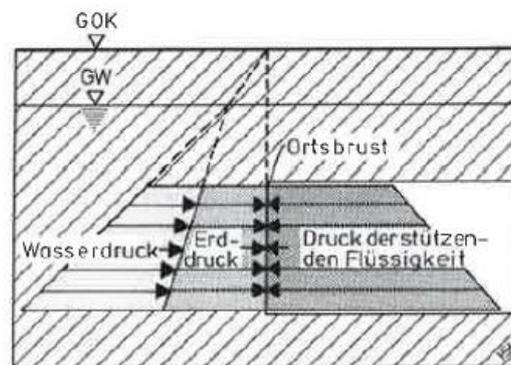


Abb. 2.17: Wirkungsweise einer Flüssigkeitsstützung [55]

Ortsbrust mit Erddruckstützung

Der Erddruckschild wird bei nicht standfesten, feinteilreichen Böden, vorwiegend mit bindigen Anteilen und auch im Grundwasser eingesetzt. Er verwendet das an der Ortsbrust abgebaute Material zusammen mit eventueller Zugabe von Konditionierungsmittel als Stützmedium der Ortsbrust. Das gelöste Material gelangt durch eine Förderschnecke, bei der die Druckdifferenz über Reibung abgebaut wird, aus der Arbeitskammer. Grobrechen und Backenbrecher halten große Steine und Findlinge zurück und zerkleinern sie. Der Abtransport des Materials aus der SM erfolgt durch Förderbänder. Abbildung 2.18 zeigt den schematischen Aufbau einer SM mit Erddruckstützung [30, 55, 69].

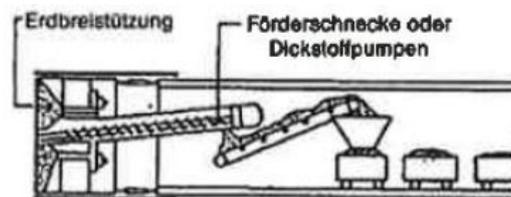


Abb. 2.18: Aufbau einer Flüssigkeitsstützung [55]

Abbildung 2.19 zeigt die Gleichgewichtssituation zwischen dem Druck des abtransportierten Materials und dem Erd- und Wasserdruck. Die Steuerung des Gleichgewichtszustandes erfolgt über die Förderschneckendrehzahl, die Konditionierung des Erdbreis und die Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit. Die Steigerung des Erddrucks in der Abbaukammer wird durch eine Erhöhung der Pressenvorschubgeschwindigkeit sowie eine Reduzierung der Schneckendrehzahl hervorgerufen. Der Stützdruck in der Abbaukammer wird dadurch erhöht, dass die Menge des Bodeneintrags jene des Bodenaustrags übersteigt.

Ist ein Einstieg in die Abbaukammer für beispielsweise Wartungsarbeiten notwendig, muss der Erdbrei komplett durch Druckluft ersetzt werden [30, 69].

Sekundäre Stützmedien wie Druckluft oder Suspension sind bei dieser Methode nicht notwendig. Die Erddruckstützung unterscheidet sich nur durch die Stützkontrolle und die Fördertechnik von der Flüssigkeitsstützung [55].

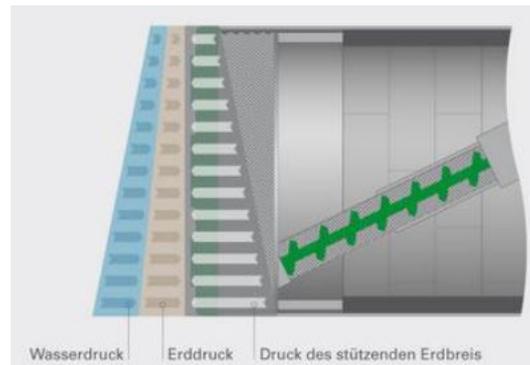


Abb. 2.19: Darstellung des Stützdrucks eines Erddruckschildes [55]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine SM aus folgenden konstruktiven Elementen besteht:

- geschlossener Schildmantel,
- Einbau von Tübbing im Schildschwanzbereich, sodass Tübbingausbau und Schild ein geschlossenes System bilden und kein direkter Kontakt zum Gebirge vorherrscht,
- Schrärmarm oder werkzeugbesetztes Schneidrad für Teilflächen- bzw. Vollflächenabbau sowie ein
- Abbauraum, welcher als Druckkammer konzipiert werden kann. [34]

Kapitel 3

Klassischer Baubetrieb – Tunnelbau

Der Baubetrieb ist verantwortlich für die planmäßige Zusammenführung der Produktionsfaktoren (menschliche Arbeitsleistung, Betriebsmittel, Werkstoffe) durch dispositive Tätigkeiten (Führung, Planung, Organisation und Überwachung) zur Errichtung von Bauwerken und zugeordneten Dienstleistungen (Gerald Goger [27]).

Das Wesen des Baubetriebs ist die Planung, Vorbereitung und Ausführung von Bauprojekten. Ziel ist es, eine wirtschaftliche und zeitgerechte Umsetzung der Planung mit angemessener Qualität und Sicherheit, zu erreichen [28]. Da im Tunnelbau direkte Beziehungen zwischen Gebirge, Konstruktion und Bauvorgang vorherrschen, sind die Kenntnis über und eine Klassifikation des Gebirges vor Bauausführung notwendig. Voruntersuchungen mit Hilfe von Aufschlüssen sowie geologischer und geophysikalischer Methoden liefern Kenntnisse über geologische und gebirgsmechanische Parameter. Das Gebirge dient im Tunnelbau als Baustoff, wirkt jedoch gleichzeitig auch als Belastung und tragendes Element. Die Wahl der Bauverfahren, Sicherungs- und Ausbaumaßnahmen steht somit in Wechselwirkung mit dem Gebirge. Eine Adaptationsfähigkeit dieser Einflussgrößen ist daher ein Indikator für den wirtschaftlichen Baubetrieb einer Tunnelbaustelle. Diese zahlreichen Einflüsse zwischen Tunnelbauwerk und Gebirge tragen dazu bei, dass der Tunnelbau zu den faszinierendsten und schwierigsten Aufgaben des Bauingenieurs zählt [33].

3.1 Geotechnische Planung

Da Tunnelbauwerke sowohl in ihrer Bauvorbereitung als auch in ihrer Bauausführung und -überwachung sowie Instandhaltung maßgeblich vom Gebirge geprägt werden, ist die Kenntnis der Geologie für eine technische und wirtschaftliche Projektumsetzung Voraussetzung. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Planenden (Projektverfasser, Geologen, Geotechniker, Geophysiker, ...) und Ausführenden (Bauunternehmen, Lieferanten, ...) ist unumgänglich, um eine Klassifizierung des Gebirges und in weiterer Folge eine Bestimmung von Ausbruchsklassen zu erreichen [33]. Die geotechnische Planung dient der Klassifizierung des entlang einer Tunneltrasse vorherrschenden Gebirges. Dabei werden die Eigenschaften des Gebirges, das Gebirgsverhalten bei Ausbruch und das Systemverhalten von Gebirge und Stützmittel analysiert [30]. Die geotechnische Planung verfolgt dabei das Ziel, unter Rücksichtnahme von Sicherheit, Umwelterfordernissen und der Langzeitstabilität, die bautechnischen Maßnahmen in Wechselwirkung mit den anstehenden Gebirgsverhältnissen zu optimieren [20]. Es ist bei der wirtschaftlichen Optimierung

darauf zu achten, dass der Gebirgsklassifikation eine geologische Betrachtung zu Grunde liegt, während die Wahl der bautechnischen Maßnahmen (Vortriebsklassifizierung) die Grundlage für Leistungsbeschreibung, Kalkulation und Vergütung darstellt [30].

3.1.1 Gebirgsklassifikation

Die Gebirgsklassifikation hat sich in der Vergangenheit aus den Bedürfnissen des Tunnel- und Kavernenbaus entwickelt. Sie dient als Grundlage folgender Zielsetzungen:

- Gebirgsansprache,
- Wahl des Ausbruchsverfahrens,
- Festlegung der erforderlichen Sicherungsmethoden und -maßnahmen,
- Erstellung des Bauvertrages sowie
- Durchführung der Kalkulation und Abrechnung von Bauleistungen [56].

Die ursprünglichen Gebirgsklassifikationssysteme für Tunnelbauwerke basierten vorwiegend auf geologischen Beschreibungen des Gebirges. Diese qualitative Einschätzung erfolgte auf Grundlage der Erfahrungen der am Projekt beteiligten Fachleute. Erst mit Beginn der 1950er Jahre erfolgte eine Verknüpfung zwischen der geologischen Beschreibung des Gebirges und den bautechnischen Maßnahmen. Durch diesen Praxisbezug gewann die Gebirgsklassifikation an Objektivität und ermöglichte eine zumindest teilweise quantitative Bewertung des Gebirges. Terzaghi und Stini implementierten die Beurteilung nach dem Gebirgsverhalten und schafften somit die Grundlage neuer Klassifizierungen. Lauffer beispielsweise wählte 1958 die Standzeit und die freie Stützweite als Parameter für seine Gebirgsklassifikation. Neben der Beschaffenheit des Gebirges gewann somit das Gebirgsverhalten bei der Herstellung immer mehr an Bedeutung, wie auch beispielsweise im Klassifizierungssystem von Müller, Rabcewicz und Pacher ersichtlich [30].

Auf Grundlage der fortschreitenden felsmechanischen Erkenntnisse konnten sich ab Mitte der 1970er Jahre die sogenannten semiquantitativen Gebirgsklassifikationssysteme nach Wickham et al. (1972), Bieniawski (1973) und Barton et al. (1974) international durchsetzen. Diese Methodiken berücksichtigen qualitative und quantitative Eingangsparmeter, welchen nach bestimmten Regeln Bewertungszahlen zugeordnet werden. Die Summe der Bewertungszahlen definiert eine Gebirgsklasse und/oder empfiehlt eine Ausbaumaßnahme [56].

Zur Veranschaulichung der Bewertungsschemata werden nun im Folgenden die Gebirgsklassifikationssysteme nach Lauffer und Barton näher beschrieben.

Gebirgsklassifikation nach Lauffer

Die Klassifizierung nach Lauffer beruht vor allem auf den empirisch ermittelten Faktoren der freien Standzeit und der wirksamen Stützweite l . Das System stützt sich direkt auf die Eigenschaften des Gebirges ab und fokussiert sich auf die Zeitspanne zwischen dem Ausbruch des Hohlraums und dem zu erwartenden Niederbruch. Ursache und Wirkungszusammenhänge sowie andere Reaktionen aus dem Gebirgsverhalten werden dabei jedoch nicht berücksichtigt. Da große Erfahrungen für

die Einschätzung notwendig sind, ist das Bewertungsschema mit Problemen behaftet. Die Wahl der Sicherungsmaßnahmen erfolgt an Hand der Eigenschaften des Gebirges bei der Herstellung des Hohlraums. Für diese Entscheidung wird die Abbildung 3.1 verwendet. Die graphische Darstellung ergibt sich aus der Auftragung der freien Standzeit und der wirksamen Stützweite im doppeltlogarithmischen Diagramm. Der schraffierte Bereich in der Abbildung 3.1 stellt die im Tunnelbau am häufigsten vorkommenden Werte dar. Die Gebirgsklassen sind mit den Buchstaben A-G bezeichnet und werden in der Tabelle 3.1 nach Lauffer definiert. Tabelle 3.1 ordnet den jeweiligen Gebirgsklassen die erforderlichen Sicherungsmaßnahmen zu [33, 56].

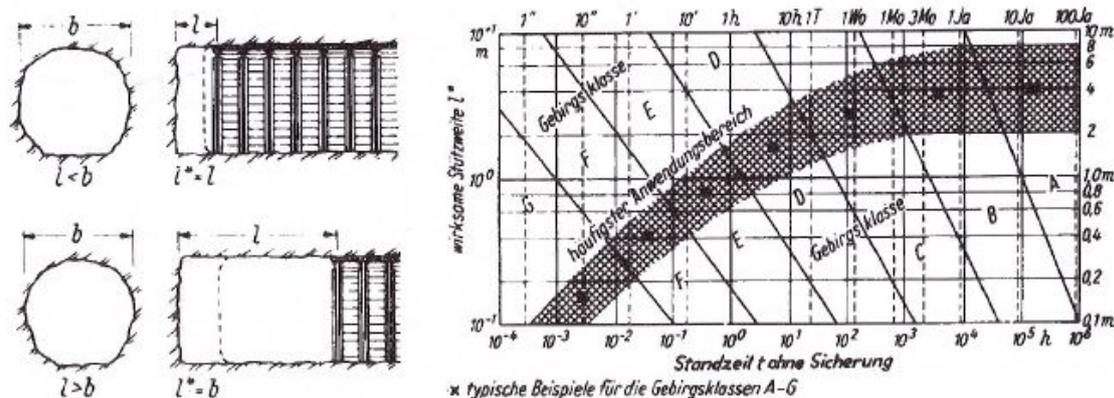


Abb. 3.1: Wirksame Stützweite l und Klassifizierungsdiagramm nach Lauffer [33]

Tab. 3.1: Gebirgsklassen und zugeordnete Sicherungsmaßnahmen nach Lauffer[33]

Gebirgsklassen	Phänomenologische Standfestigkeit	Sicherung
A	Standfest	Ohne Sicherung/ Kopfschutz
B	Nachbrüchig	Kopfschutz
C	Sehr nachbrüchig	Firstsicherung
D	Gebräch	Leichte Sicherung
E	Sehr gebräch	Mittelschwere Sicherung
F	Druckhaft	Schwere Sicherung
G	Sehr druckhaft	Schwere Sicherung mit Brustverzug

Gebirgsklassifikation nach Barton

Das Q-System (Quality-System) nach Barton sieht eine numerische Einschätzung folgender sechs Parameter vor:

- Bestimmung der Gebirgsqualität ($RQD = \text{Rock Quality Designation}$),
- Anzahl der Kluftsysteme (J_n),
- Rauigkeit der ungünstigsten Kluft als Kluftrauigkeitszahl (J_r),
- Grad der Veränderung oder Verfüllung der schwächsten Kluft als Kluftveränderungszahl (J_a),

- Wasserandrang als Kluftwasserreduktionszahl (J_w) und
- Spannungsverhältnisse als Spannungsreduktionsfaktor (SRF = Stress Reduction Factor) [30].

Diese sechs Parameter bestimmen durch Gleichung 3.1 einen gewichteten mathematischen Wert der Gebirgsqualität Q .

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \quad (3.1)$$

Der berechnete Wert Q kann die Werte 0,001 bis 1000 annehmen. Er wird auf einem logarithmischen Maßstab aufgetragen und somit graphisch dargestellt. Die Gebirgsqualität (A-G) kann aus der graphischen Darstellung (siehe Abbildung 3.2) abgelesen werden. Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Querschnittsgröße und des zukünftigen Verwendungszwecks des Hohlraumbauwerks kann man an Hand des Q -Werts indirekt auf die notwendigen Sicherungsmaßnahmen schließen [30].

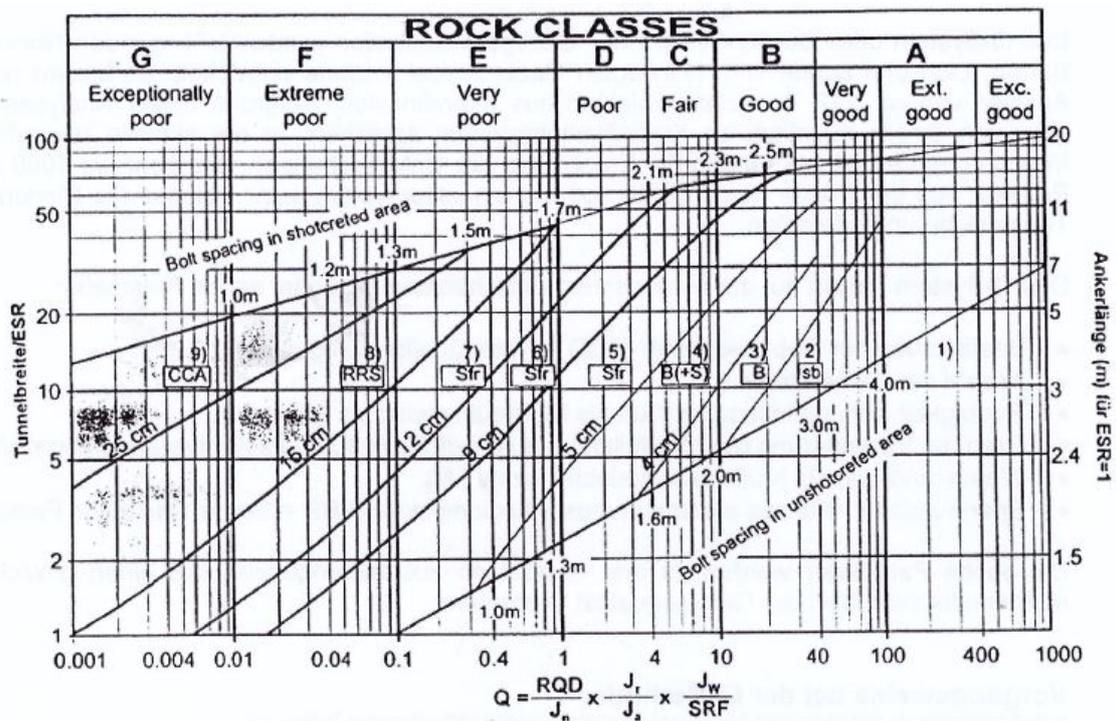


Abb. 3.2: Quality-System-Diagramm: Bezugsgröße für die Sicherungsmaßnahme im Verhältnis zur Gebirgsqualität Q [30]

Die in Abbildung 3.2 zugrundegelegten Stützmittelklassen (durch Nummern und Buchstaben gekennzeichnet) gliedern sich folgendermaßen auf:

- 1) keine Stützmittel erforderlich
- 2) lokale Ankerung [sb]

- 3) Systemankerung [**B**]
- 4) Systemankerung mit unbewehrtem Spritzbeton, 4-10 cm [**B+(S)**]
- 5) Stahlfaserspritzbeton mit Ankerung, 5-9 cm [**Sfr**]
- 6) Stahlfaserspritzbeton mit Ankerung, 9-12 cm [**Sfr**]
- 7) Stahlfaserspritzbeton mit Ankerung, 12-15 cm [**Sfr**]
- 8) Stahlfaserspritzbeton >15 cm, Tunnelbögen und Ankerung [**RRS**]
- 9) Ortbetonschale [**CCA**] [30].

3.1.2 Geotechnische Planung beim zyklischen Vortrieb

Um ein Tunnelbauwerk projektspezifisch zu klassifizieren, wird eine allgemeine Gliederung in Vortriebsklassen benötigt. Diese Vortriebsklassifizierung basiert auf geotechnischen Untersuchungen und deren tunnelbautechnischer Beurteilung [33]. Die geotechnische Planung ist daher als ingenieurmäßige Tunnelplanung zu verstehen und sollte sowohl in der Planungs- als auch Ausführungsphase integriert werden [30]. Eine geomechanische Planung, die bauvorbereitende und baubegleitende Tätigkeiten berücksichtigt, ermöglicht:

- vor der Bauausführung eine Planung der Vortriebsklassen, die eine leistungsgerechte Preisbildung in den unterschiedlichen Klassen beinhaltet,
- während der Bauausführung die Wahl einer angepassten und zielführenden Ausbruchs- und Sicherungsmethode des Hohlraums,
- und nach der Ausführung eine Abrechnungsbasis für die Vergütung [33].

Die Vorgehensweise der Gebirgsbeschreibung und die Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung werden in der „Richtlinie für die Geotechnische Planung von Untertagebauarbeiten“ der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) – in Ergänzung zur ÖNORM B 2203 – festgelegt. Sowohl die Richtlinie der ÖGG als auch die ÖNORM B 2203 enthalten die geotechnische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischen Vortrieb und die geotechnische Planung von Untertagebauarbeiten mit kontinuierlichem Vortrieb. Diese Richtlinien dienen als Leitfaden für eine systematische Vorgangsweise und sollen die Entscheidungen der bautechnischen Maßnahmen des Vortriebs und des Ausbaus unterstützen [3].

Die geotechnische Planung beinhaltet folgende zwei Schritte:

- Phase 1: Planung
- Phase 2: Bauausführung

Geotechnische Planung - Phase 1

Diese Planungsphase umfasst folgende 7 Schritte:

1. Bestimmung der Gebirgsart
2. Bestimmung des Gebirgsverhaltens und Zuordnung zu Gebirgsverhaltenstypen
3. Wahl eines tunnelbautechnischen Konzeptes
4. Abschätzung des Systemverhaltens im Ausbruchsbereich
5. Detailfestlegung der bautechnischen Maßnahmen und Ermittlung des Systemverhaltens im gesicherten Bereich
6. Erstellung des tunnelbautechnischen Rahmenplanes
7. Ermittlung der Vortriebsklassen [3]

Bestimmung der Gebirgsart

Im ersten Schritt werden auf Grundlage des geologischen Modells die geotechnischen Parameter des Gebirges bestimmt. Die Einschätzung erfolgt auf Basis der geologischen Voruntersuchungen und an Hand von Erfahrungswerten. Gebirge mit gleichartigen Eigenschaften werden zu Gebirgsarten zusammengefasst. Die Verteilung der Gebirgsarten hängt von der vorherrschenden Geologie entlang der gewählten Tunneltrasse ab. [50].

Bestimmung des Gebirgsverhaltens im Ausbruchsbereich und Zuordnung zu Gebirgsverhaltenstypen

Im zweiten Schritt werden die Einflussfaktoren

- Gebirgsart
- Primärspannungszustand
- Form, Lage und Länge des Hohlraumes
- Lage des Hohlraumes zur Oberfläche
- Orientierung des Trennflächengefüges zum Hohlraum
- Schichtgrenzen von Gebirgsarten
- Bergwasser, hydrostatischer Druck, Strömungsdruck

zur Bestimmung des Gebirgsverhaltens berücksichtigt [20]. Das Gebirgsverhalten ist laut der ÖGG-Richtlinie für den zyklischen Vortrieb als *Reaktion des Gebirges auf den Ausbruch ohne Berücksichtigung von Stützung oder Querschnittsunterteilung* definiert. Das Gebirgsverhalten

im Verlauf der projektierten Trasse wird den in der ÖGG-Richtlinie definierten Kategorien von Gebirgsverhaltenstypen zugeordnet, die in Abbildung 3.3 ersichtlich sind [50].

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

Abb. 3.3: Übergeordnete Kategorien von Gebirgsverhaltenstypen [50]

Wahl eines tunnelbautechnischen Konzeptes beim zyklischen Vortrieb

Basierend auf der Bestimmung der Gebirgsart und des Gebirgsverhaltens wird für jede charakteristische Situation das tunnelbautechnische Konzept festgelegt. Dieses beinhaltet unter anderem die Lösemethode, die Querschnittunterteilungen (Kalotte, Strosse, Sohle) und Teilflächen (Unterteilung der Kalotte in Teilflächen) sowie vorausseilende Sicherungsmethoden und das allgemeine Ausbaukonzept [20, 50].

Abschätzung des Systemverhaltens im Ausbruchsbereich

Im nächsten Schritt wird, auf Grundlage des tunnelbautechnischen Konzeptes, das Systemverhalten im Ausbruchsbereich abgeschätzt. Faktoren, wie der räumliche Spannungszustand, die Stabilität der Ortsbrust und der Laibung sowie die Form, Größe und Unterteilung des Ausbruchsquerschnittes, beeinflussen das Systemverhalten im Vortriebsbereich [20, 30]. Die ÖGG-Richtlinie für zyklischem Vortrieb definiert das Systemverhalten als *das Verhalten des Systems aus Gebirge und*

gewählten Baumaßnahmen. Es wird zwischen Systemverhalten im jeweiligen Ausbruchsbereich, Systemverhalten im gesicherten Bereich und Systemverhalten im Endzustand unterschieden. Abbildung 3.4 stellt die Unterteilung der Bereiche des Systemverhaltens graphisch dar [50].

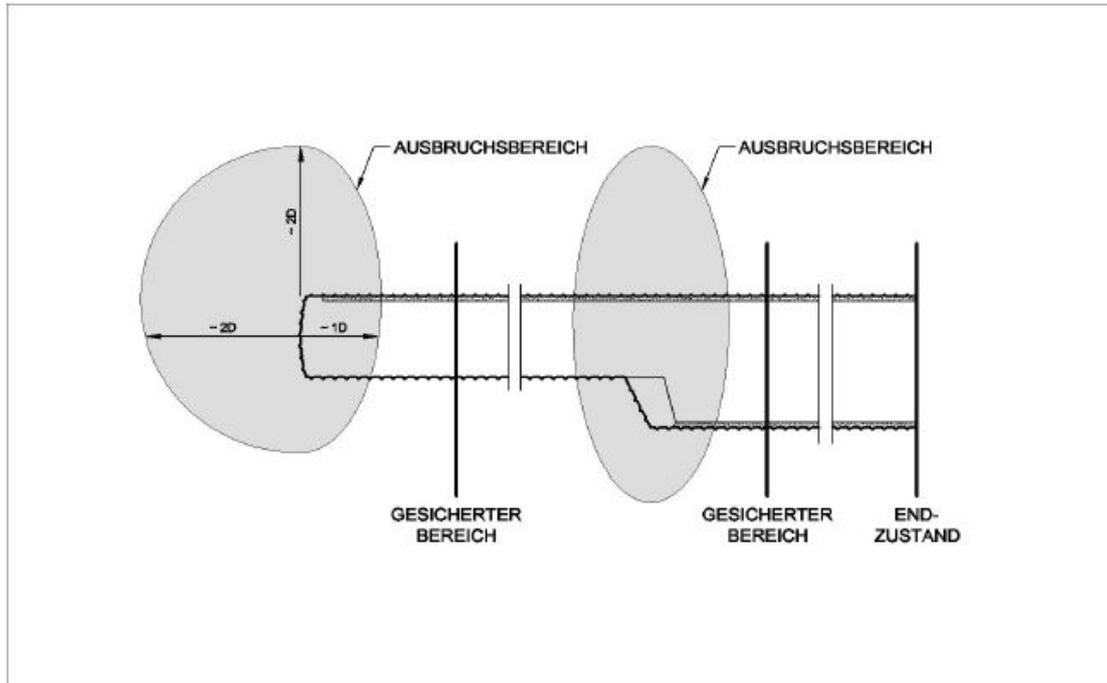


Abb. 3.4: Unterteilung der Bereiche des Systemverhaltens [50]

Detailfestlegung der bautechnischen Maßnahmen und Ermittlung des Systemverhaltens im gesicherten Bereich

Die detaillierte Bestimmung der bautechnischen Maßnahmen erfolgt auf Basis der Abschätzung des Systemverhaltens. Nach Festlegung der bautechnischen Tätigkeiten in Art und Menge wird das Systemverhalten ermittelt und den Anforderungen gegenübergestellt. In weiteren Iterationsschritten werden die bautechnischen Maßnahmen und das dazugehörige Systemverhalten optimiert, sodass eine sichere und wirtschaftliche Methodik gefunden wird [20, 30].

Erstellung des tunnelbautechnischen Rahmenplanes

Die Schritte eins bis fünf der geotechnischen Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb dienen der Festlegung von bautechnisch gleichartigen Vortriebsbereichen. Die Beschreibung und Einzelheiten von Ausbruch und Stützung sind im tunnelbautechnischen Rahmenplan festgelegt. Des Weiteren sind in ihm die Grenzen und Kriterien der möglichen Anpassung der bautechnischen Maßnahmen vor Ort für jeden Bereich angegeben [20, 30]. Der tunnelbautechnische Rahmenplan beinhaltet folgende Angaben:

- Geologisches Modell inklusive der Verteilung der zu erwarteten Gebirgsarten im Längsschnitt,
- Darstellung des erwarteten Systemverhaltens im Ausbruchsbereich in Abhängigkeit von Gebirgsart und Einflussfaktoren,

- Vorgaben für die Festlegung der Baumaßnahmen vor Ort in Bezug auf das Systemverhalten im Ausbruchsbereich,
- Merkmale und Kennzeichen für die Zuweisung der bautechnischen Maßnahmen sowie deren Anwendungskriterien,
- Vorgaben für Ausbruch und Stützung,
- Angabe der Maßnahmen, die vor Ort festzulegen sind,
- Angaben zum erwarteten Systemverhalten in den gesicherten Bereichen,
- Warnkriterien und Alarmwerte sowie Beschreibung der durchzuführenden Tätigkeiten laut des geotechnischen Sicherheitsmanagementplans [50].

Die ÖGG-Richtlinie definiert den tunnelbautechnischen Rahmenplan als *eine zusammenfassende Darstellung, welche die maßgeblichen Parameter der geotechnischen Planung sowie die Anwendungskriterien für die Zuordnung von Ausbruch- und Sicherungsmaßnahmen beinhaltet* [50].

Ermittlung der Vortriebsklassen

Im letzten Schritt der geotechnischen Planung werden mittels Bewertung der Baumaßnahmen gemäß ÖNORM B2203-1 die Vortriebsklassen ermittelt. Die Vortriebsklassen dienen der Erstellung von Vergütungsregelungen in den Ausschreibungsunterlagen [50]. Dieser Planungsschritt erfolgt länderspezifisch nach unterschiedlichen Regelungen und Kriterien, beispielsweise in Österreich gemäß ÖNORM B 2203-1, in Deutschland nach DIN 18312 oder in der Schweiz nach SIA 198 [30].

Die Vorgehensweise der Einteilung in Vortriebsklassen ist im Kapitel 3.2.1 Vortriebsklassifizierung beschrieben.

Abbildung 3.5 bildet ein Flussdiagramm ab, welches den grundsätzlichen Ablauf der geotechnischen Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb zeigt. Die Graphik dient der Veranschaulichung des schematischen Ablaufs der geotechnischen Planung.

Geotechnische Planung - Phase 2

Da das geologische Modell vor Baubeginn die Gebirgsverhältnisse nicht vollständig darstellen kann, ist eine laufende Fortschreibung und Dokumentation während der Bauausführung notwendig. Die bautechnischen Maßnahmen müssen somit an die während des Baues tatsächlich angetroffenen Gebirgsverhältnisse angepasst werden. Geotechniker vor Ort unterstützen die endgültige Wahl der Ausbruch- und Sicherungsmaßnahmen, welche auf Grundlage der Erkenntnisse der geotechnischen Detailanalysen basiert. Die Vorgangsweise wird von einem Sicherheitsmanagement begleitet und ist in Abbildung 3.6 schematisch dargestellt [20, 50].

Die Ausführungsphase umfasst daher folgende vier Schritte:

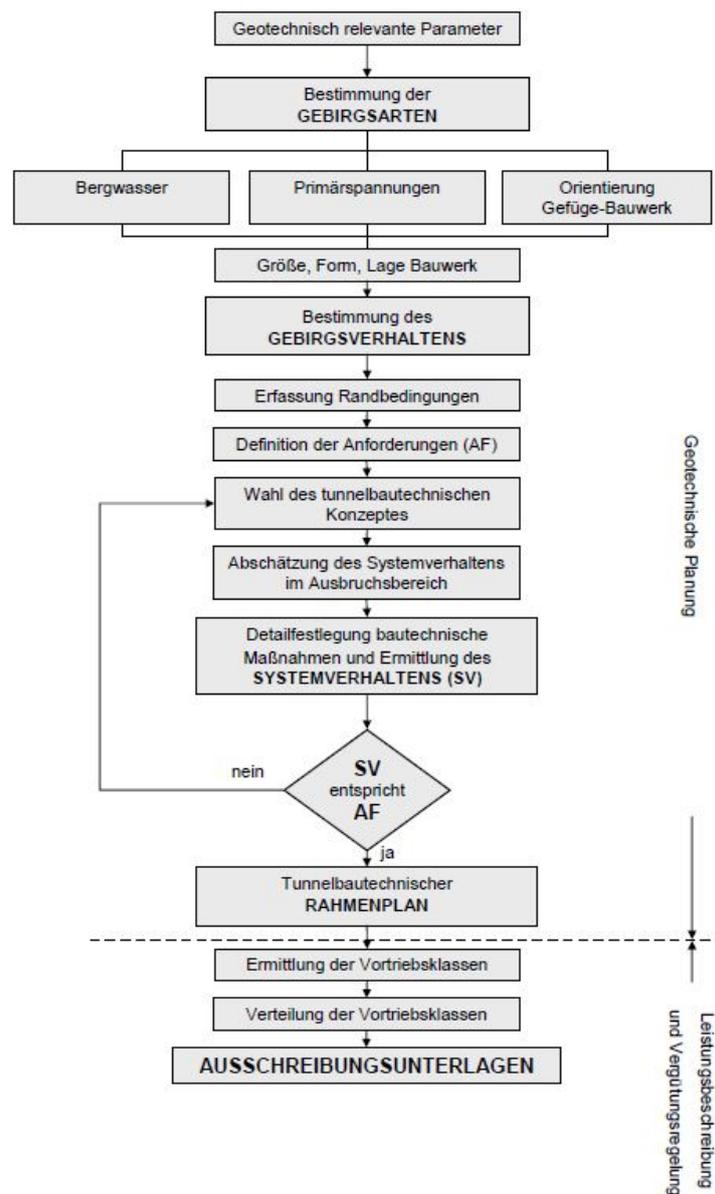


Abb. 3.5: Schematischer Ablauf der geotechnischen Planung für Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb [50]

1. Bestimmung der aktuellen Gebirgsart vor Ort und Prognose der Gebirgsverhältnisse
2. Abschätzung des Systemverhaltens im Ausbruchsbereich
3. Festlegung von Ausbruch und Stützung sowie Prognose des Systemverhaltens im gesicherten Bereich
4. Überprüfung des Systemverhaltens [3]

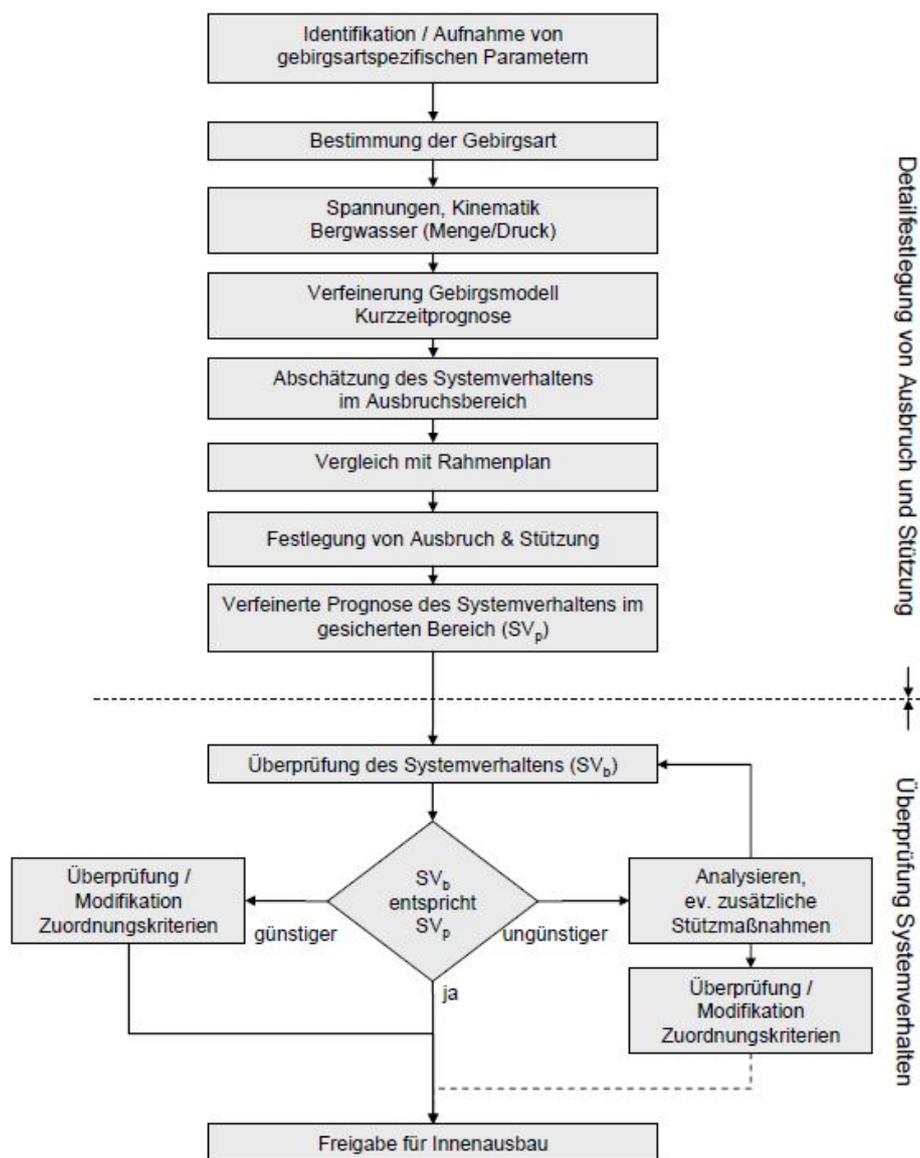


Abb. 3.6: Schematischer Ablauf der Festlegung und Überprüfung von Baumaßnahmen während der Ausführungsphase [50]

Bestimmung der aktuellen Gebirgsart vor Ort und Prognose der Gebirgsverhältnisse

Das geologische Modell wird durch Vorauserkundungen und Bewertung der geotechnischen Messungen sowie durch Beobachtungen des bereits ausgebrochenen Bereichs laufend aktualisiert. Ziel ist es, eine kurzfristige Prognose der Gebirgsverhältnisse im nächstfolgenden Vortriebsbereich zu erstellen [50].

Abschätzung des Systemverhaltens im Ausbruchsbereich

Das Systemverhalten wird auf Grundlage der prognostizierten Gebirgsverhältnisse und unter Einwirkung der Einflussfaktoren analysiert. Beim anschließenden Vergleich mit den Angaben im

tunnelbautechnischen Rahmenplan ist besonderes Augenmerk auf mögliche Versagensmechanismen zu richten [50].

Festlegung von Ausbruch und Stützung sowie Prognose des Systemverhaltens im gesicherten Bereich

Die Kriterien für Ausbruch und Stützung sind im tunnelbautechnischen Rahmenplan definiert. Deshalb ist zu kontrollieren, ob die angetroffenen Gebirgsverhältnissen den im tunnelbautechnischen Rahmenplan festgelegten Annahmen gleichen. Auf Basis der vor Ort gewonnenen Erkenntnisse sind die bautechnischen Maßnahmen endgültig festzulegen und umzusetzen. Dabei sind Wirtschaftlichkeit und Sicherheit zu gewährleisten. Nach Festlegung der gewählten Baumaßnahmen ist unter Berücksichtigung der Gebirgsverhältnisse für den jeweils anstehenden Vortriebsbereich das Systemverhalten zu prognostizieren [50].

Überprüfung des Systemverhaltens

Durch visuelle und messtechnische Beobachtung während und nach dem Ausbruch wird überprüft, ob das prognostizierte Systemverhalten den vorgegebenen Anforderungen und den Kriterien des geotechnischen Sicherheitsmanagementplans entspricht. Bei Unter- oder Überschreitung definierter Parameter erfolgt eine gezieltere Untersuchung, um bei Bedarf entsprechende bautechnische Maßnahmen setzen zu können. Somit erfolgt eine laufende, verbessernde Modifikation der Vortriebsarbeiten [50].

Die in der ÖGG-Richtlinie definierten Schritte der zweiten Phase der geotechnischen Planung beschreiben eine Beobachtungsmethode. Dabei werden die Planungsgrundlagen durch eine stetige Fortschreibung der über den Baugrund (in dem Fall das Gebirge) verfügbaren Informationen verbessert. Durch den Rückfluss dieser neuen Erkenntnisse in die Bauausführung können Risiken vor Eintritt erkannt und die bautechnischen Maßnahmen optimiert werden [23].

3.1.3 Geotechnische Planung beim maschinellen Vortrieb

Da sich die geotechnische Planung von kontinuierlichen Vortrieben mit Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) gegenüber jener mit zyklischem Vortrieb durch verfahrensspezifische Aspekte unterscheidet, hat die Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) eine eigene Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb erstellt. Es wird mit der Richtlinie ein klar strukturiertes geotechnisches Dimensionierungskonzept mit der bestmöglichen Anpassung der bautechnischen Maßnahmen an die jeweiligen Untergrundsverhältnisse vor Ort vorgegeben.

Bei Ausbruch mittels TVM ist die Adaptierung des Vortriebskonzeptes und des Ausbaus nur in geringem Maße möglich. Die Planung des kontinuierlichen Vortriebs muss daher für das Vortriebs- und Ausbaukonzept diverse Zusatz- und Sondermaßnahmen berücksichtigen. Eine Vorsorgemaßnahme ist beispielsweise die Erstellung einer geotechnischen Risikoanalyse, welche mögliche Gefährdungen erkennt und analysiert [51].

Die Planung erstreckt sich von der Machbarkeitsstudie über den Vorentwurf, die Einreich- und Ausschreibungsplanung bis hin zur Ausführungsplanung. Sie wird laufend fortgeschrieben und dokumentiert, um die bautechnischen Maßnahmen zu präzisieren und optimieren [51].

Die ÖGG-Richtlinie hat den Charakter einer Aufgabenbeschreibung und definiert in diesem Sinne, korrespondierend mit der entsprechenden ÖNORM B 2203-2, den Ablauf, die Methodik und die zu erstellenden Prognosen und Unterlagen im Planungsprozess von Untertagebauwerken mit kontinuierlichem Vortrieb. Die Vorgehensweise wird dabei in drei Phasen unterteilt:

- Phase 1: Planung
- Phase 2: Planung TVM für die Bauausführung
- Phase 3: Bauausführung

Wie in Abbildung 3.7 ersichtlich, unterteilt die Richtlinie die Planungsphase (Phase 1) in sieben Schritte. Der letzte Schritt beschreibt die Erstellung von Ausschreibungsunterlagen und somit auch die Klassifizierung der Vortriebsabschnitte gemäß ÖNORM B 2203-2. Die Erstellung von Vortriebsklassenmatrizen erfolgt somit als Teil der Ausschreibung durch den Auftraggeber (AG) [30].

Geotechnische Planung - Phase 1

Die Planungsphase umfasst folgende sieben Schritte:

1. Bestimmung der Gebirgsarten
2. Bestimmung des Gebirgsverhaltens und Zuordnung zu Gebirgsverhaltenstypen
3. Evaluierung/Wahl der Vortriebsart
4. Wahl eines Tunnelbautechnischen Konzeptes
5. Detailfestlegung der bau- und maschinentechnischen Maßnahmen sowie Abschätzung und Ermittlung des Systemverhaltens
6. Dokumentation der Geotechnischen Planung
7. Ermittlung der Vortriebsklassen und Erstellung der Ausschreibungsunterlagen [51]

Bestimmung der Gebirgsarten

Im ersten Schritt werden auf Grundlage des geologischen Modells die geotechnischen Parameter des Gebirges bestimmt. Die Einschätzung erfolgt auf Basis der geologischen Voruntersuchungen und an Hand von Erfahrungswerten. Gebirge mit gleichartigen Eigenschaften werden zu Gebirgsarten zusammengefasst. Die Verteilung der Gebirgsarten ist projektspezifisch [51]. Dieser Arbeitsschritt erfolgt analog zu jenem des zyklischen Vortriebs, der im Kapitel 3.1.2 beschrieben wird.

Bestimmung des Gebirgsverhaltens und Zuordnung zu Gebirgsverhaltenstypen

Der zweite Schritt erfolgt auch de facto ident mit jenem des zyklischen Vortriebs, der im Kapitel 3.1.2 beschrieben wird. Es werden die örtlichen Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Gebirgsart, der Primärspannungszustand, die Orientierung des Trennflächengefüges zum Hohlraum und die

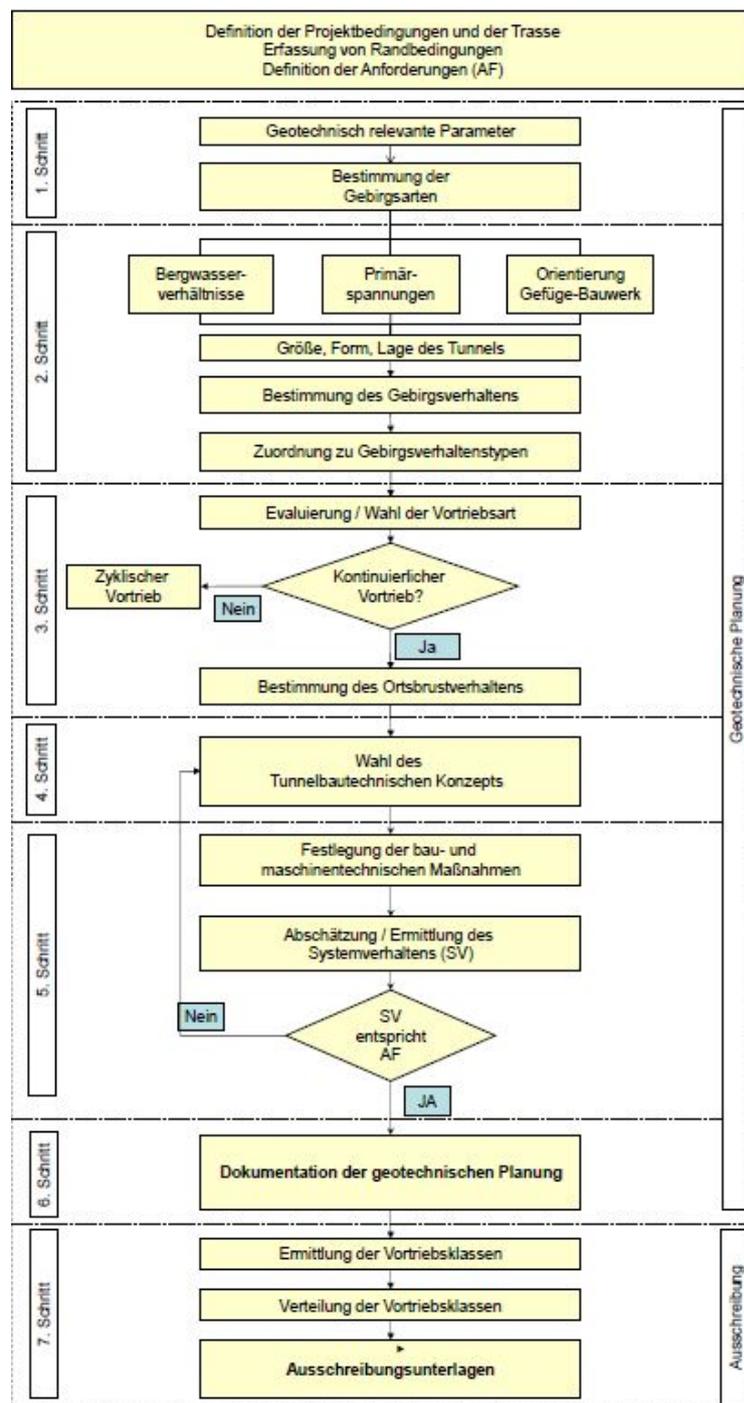


Abb. 3.7: Schematischer Ablauf der Geotechnischen Planung beim maschinellen Vortrieb [51]

Bergwasserverhältnisse, zur Bestimmung des Gebirgsverhaltens berücksichtigt. Das Gebirgsverhalten ist laut [51] als *Reaktion des Gebirges auf den Ausbruch ohne Berücksichtigung von Stützung oder Querschnittunterteilung* definiert. Die jeweils beim Projekt vorkommenden Gebirgsverhalten werden den in der ÖGG-Richtlinie definierten Kategorien von Gebirgsverhaltenstypen zugeordnet, die in Abbildung 3.3 ersichtlich sind. Bei Bedarf werden die Gebirgsverhaltenstypen projektspezifisch näher definiert und/oder unterteilt [51].

Evaluierung/ Wahl der Vortriebsart

Aufbauend auf die ersten beiden Schritte erfolgt im Schritt drei eine Untersuchung über die Machbarkeit eines kontinuierlichen Vortriebs. In der Analyse werden alle die Vortriebsart bestimmenden Parameter, wie beispielsweise die Tunnellänge und der Ausbruchsquerschnitt, miteinbezogen. Des Weiteren werden Randbedingungen, wie z.B. Deponierbarkeit, Karst und Chemismus berücksichtigt. Im Zuge der Ausarbeitung sind die spezifischen Anforderungen an das Vortriebssystem zu definieren [51].

Auf Grundlage der Machbarkeitsstudie wird entschieden, welche Vortriebsarten in einer weiteren geotechnischen Bearbeitung näher analysiert werden [51]. Die nächsten Arbeitsschritte (nach Schritt 3) sind auf die gewählte Vortriebsart abzustimmen. Es ist eine parallele Ausarbeitung von einer zyklischen und einer kontinuierlichen Vortriebsvariante anzustreben, sodass die endgültige Wahl der Vortriebsart erst nach Prüfung der jeweiligen Angebote der Bieter getroffen werden muss [30].

Fällt die Wahl auf einen kontinuierlichen Vortrieb, erfolgt für alle Bereiche gleicher Gebirgsart und Einflussfaktoren eine Analyse des Ortsbrustverhaltens (OBV). Analog zur Gebirgsklassifikation beim zyklischen Vortrieb erfolgt eine Zuordnung zu Ortsbrustverhaltenstypen (OVT). Dabei ist eine graphische Darstellung für das jeweilige OBV hinsichtlich Deformations- und Versagensmechanismen anzufertigen. Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem dreidimensionalen Spannungszustand der Ortsbrust [30].

Laut ÖGG-Richtlinie werden die in Tabelle 3.2 ersichtlichen Bestimmungsbereiche für das Gebirgs- und Ortsbrustverhalten unterschieden. Eine graphische Darstellung erfolgt in Abbildung 3.8.

Tab. 3.2: Bestimmungsbereiche für das Gebirgs- und Ortsbrustverhalten [51]

Abkürzung	Bereichszuordnung	Beschreibung
GA	Bereich-Gebirgsarten	unverritztes Gebirge auf Tunnelniveau
OBV	Bereich-Ortsbrustverhalten	Gebirge innerhalb des Einflussbereiches der Ortsbrust
GV	Bereich-Gebirgsverhalten	aufgefahrenes Gebirge außerhalb des Einflussbereiches der Ortsbrust

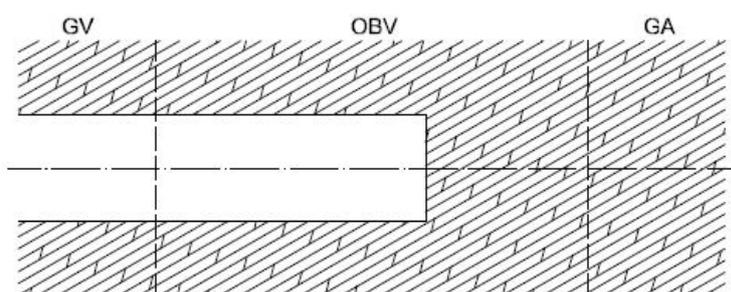


Abb. 3.8: Bestimmungsbereiche für das Gebirgs- und Ortsbrustverhalten [51]

Wahl eines tunnelbautechnischen Konzeptes beim maschinellen Vortrieb

Auf Grundlage des Schrittes 3 wird das tunnelbautechnische Konzept erstellt. Unter Berücksichtigung der Gebirgscharakteristik sowie weiterer Baugrundeigenschaften und Bodenkennwerte basiert die Wahl des TVM-Typs, des Vortriebsverfahrens und des Ausbaus einschließlich der Regel-, Zusatz- und Sondermaßnahmen. In dieser Phase werden bereits detaillierte Anforderungen an die Vortriebsmaschine des späteren AN formuliert. Eine mögliche Auswahl solcher Anforderungen ist in folgender Auflistung dargestellt:

- Geometrische Daten, wie beispielsweise nominaler Bohrdurchmesser und Überbohrmaß
- Technische Leistungsdaten, wie beispielsweise Vorschubkraft und Drehmoment
- Tragvermögen des Schildes
- Erkundungskonzept während des Vortriebes [30, 51].

Detailfestlegung der bau- und maschinentechnischen Maßnahmen und Abschätzung bzw. Ermittlung des Systemverhaltens

Im fünften Schritt werden die bau- und maschinentechnischen Maßnahmen detailliert festgelegt. Die in Schritt vier abgeschätzten Regel-, Zusatz- und Sondermaßnahmen sowie die maßgebenden Maschinenparameter beeinflussen gemeinsam mit dem GVT das Systemverhalten, welches die Reaktion des Gesamtsystems beschreibt. Auf Grundlage des tunnelbautechnischen Konzepts wird das Systemverhalten laut der ÖGG-Richtlinie in fünf Arbeitsbereichen, die in Tabelle 3.3 ersichtlich sind, abgeschätzt bzw. ermittelt. Die Schritte vier und fünf werden solange variiert bis das prognostizierte Systemverhalten die Anforderungen der Systemsicherheit in allen Bauphasen gewährleistet [30, 51].

Tab. 3.3: Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) – Bereiche [51]

Kurzbezeichnung	TVM-Bereich
I	Bohrkopfbereich/ Schneidradbereich
II	Schildbereich/ Bohrkopfträger & Firstschild
III	Einbaubereich
IV	Bereich fertiger Ausbau bis Endzustand
V	Sonderbereiche (An- & Ausfahren, Öffnung für Querschläge etc.)

Dokumentation der geotechnischen Planung

Die Ergebnisse der geotechnischen Planung (Schritte eins bis fünf) sind in Form einer Dokumentation zusammen zu tragen. Diese beschreibt übersichtlich und nachvollziehbar die Planungsschritte und bildet den Abschluss der geotechnischen Planung in der Ausschreibungsphase. Die Dokumentation beinhaltet folgende Unterlagen:

- Geotechnischer Bericht einschließlich tunnelbautechnischen Rahmenplans
- Geotechnischer Sicherheitsmanagementplan
- Störfallanalyse und Maßnahmen
- Maschinentechnische Anforderungen [51].

Für den darauffolgenden Schritt der Vortriebsklassifizierung ist vor allem der Tunnelbautechnische Rahmenplan von Bedeutung. Dieser soll in Form eines Längsschnittes durch die gesamte Vortriebsstrecke unter anderem folgende essentielle Angaben beinhalten:

- Gebirgsbereiche und Verteilung der prognostizierten Gebirgsarten,

- Geotechnische und bautechnische Besonderheiten,
- Angaben für den Einsatz von Regel-, Zusatz- und Sondermaßnahmen,
- Geplante Betriebsweise [30].

Ermittlung der Vortriebsklassen und Erstellung der Ausschreibungsunterlagen

Auf Basis der in Schritt sechs erstellten Angaben erfolgt im siebenten und zugleich letzten Schritt die Ermittlung der Vortriebsklassen einschließlich Regel-, Zusatz- und Sondermaßnahmen gemäß ÖNORM B 2203-2. Dabei erfolgt eine Prognose der Verteilung der Vortriebsklassen, die sowohl das wahrscheinlichste Szenario als auch die sich aus der Streuung der Eingangsparameter ergebende Bandbreite an Vortriebsklassen einbezieht [51].

Die Vorgehensweise der Einteilung in Vortriebsklassen ist im Kapitel 3.2.1 Vortriebsklassifizierung beschrieben.

Geotechnische Planung - Phase 2

Bei der geotechnischen Planung des kontinuierlichen Vortriebs ist eine maschinentechnische Planung zu berücksichtigen. Diese erfolgt in zwei Schritten:

1. Konzeptplanung TVM für die Angebotserstellung
2. Detailplanung TVM für die Bauausführung

Im ersten Schritt wird durch den Bieter im Rahmen der Angebotsbearbeitung ein bau- und maschinentechnisches Konzept auf Grundlage der Ausschreibung und des maschinentechnischen Anforderungsprofils erstellt [20, 51].

Im zweiten Schritt erfolgt durch den Auftragnehmer (AN) unter Berücksichtigung der geotechnischen Planung des Auftraggebers (AG) die maschinentechnische Detailplanung. In Abstimmung mit dem AG ermöglicht ein Optimierungsprozess die Festlegung der tatsächlich zum Einsatz kommenden TVM. Dabei sind die maschinentechnischen Gegebenheiten und Möglichkeiten sowie die geotechnischen Anforderungen der Ausschreibung und der Wunsch nach Wirtschaftlichkeit miteinander zu verknüpfen [20].

Vor Vortriebsbeginn wird die Entscheidungsmatrix nach dem geotechnischen Sicherheitsmanagementplan unter Einbezug der tatsächlich zum Einsatz kommenden TVM überprüft und gegebenenfalls angepasst. Diese Matrix enthält folgende Parameter, welche der Planung als Grundlage dienen, mit den SOLL-Werten:

- Allgemeine Bestimmungen für die gewählten Betriebsweisen,
- Differenzierte Bestimmungen für die wesentlichen Maschinenparameter und Betriebsweisen vor Vortriebsbeginn,
- Differenzierte Bestimmungen für den Einsatz von Zusatz- und Sondermaßnahmen.

Im Laufe der Abstimmung zwischen AG und AN sind der geotechnische Sicherheitsmanagementplan, der tunnelbautechnische Rahmenplan und die Störfallanalyse zu überprüfen und in Zusammenhang mit dem laufenden Erkenntniszuwachs während der Bauausführung fortzuschreiben. Des Weiteren werden die absolvierten geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Erkundungen und Untersuchungen analysiert und gegebenenfalls erweitert [51].

Geotechnische Planung - Phase 3

Da die tatsächlichen Gebirgsverhältnisse vor Baubeginn nicht komplett bekannt sind, müssen die bautechnischen Maßnahmen während der Ausführungsphase an die wirklich vorherrschenden Gebirgsverhältnisse angepasst werden [20]. Unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren wird auf Grundlage der ermittelten Gebirgsart das aktuelle Systemverhalten in den Bereichen I bis V gemäß Tabelle 3.3 nach den Angaben der Planung abgeschätzt bzw. ermittelt. Die geotechnische Planung wird daraufhin fortgeschrieben. Für die Fortschreibung werden während der Bauausführung soweit möglich die geotechnisch relevanten Gebirgsparameter, bau- und maschinentechnische Parameter sowie TVM-betriebstechnische Daten und allgemeine Beobachtungen erhoben, analysiert und dokumentiert [51].

Abbildung 3.9 zeigt schematisch den Ablauf der geotechnischen Planung in der Phase 3 (Bauausführung). Die Graphik veranschaulicht folgenden Ablauf der Festlegung und Überprüfung der bautechnischen Maßnahmen:

1. Bestimmung der aktuellen Gebirgsart und Erstellung einer Kurzzeitprognose der Gebirgsverhältnisse
2. Abschätzung des Systemverhaltens
3. Detailfestlegung des Vortriebs sowie Festlegung der Vortriebsvorschau (SOLL)
4. Erhebung der Vortriebsnachschaue (IST) – Überprüfung des Systemverhaltens und Fortschreibung des tunnelbautechnischen Rahmenplans und der Entscheidungsmatrix
5. Freigabe für nachfolgende Gewerke [20].

3.2 Vertragliche Regelungen

Der Bauvertrag regelt in Form eines Werkvertrages die leistungsabhängige Vergütung von Bauleistungen. Als Werkvertrag wird laut ABGB eine *Vereinbarung, in der sich jemand gegen Entgelt verpflichtet, ein den Umständen und Vorstellungen des anderen entsprechendes Werk entweder persönlich selbstständig herzustellen oder unter persönlicher Verantwortung durch Dritte herstellen zu lassen* verstanden [39]. Der Auftragnehmer hat somit beim Bauvertrag die Pflicht der Erbringung einer Bauleistung oder der Errichtung eines Bauwerkes. Die Pflicht des Auftraggebers besteht in der Vergütung des Bauwerkes [61]. Es herrschen verschiedene Bauvertragsarten, welche sich durch ihre Abrechnungsmethodiken unterscheiden, vor. Der Einheitspreisvertrag rechnet beispielsweise nach Einheitspreisen und deren tatsächlichen Massen ab. Im Allgemeinen erfolgt die

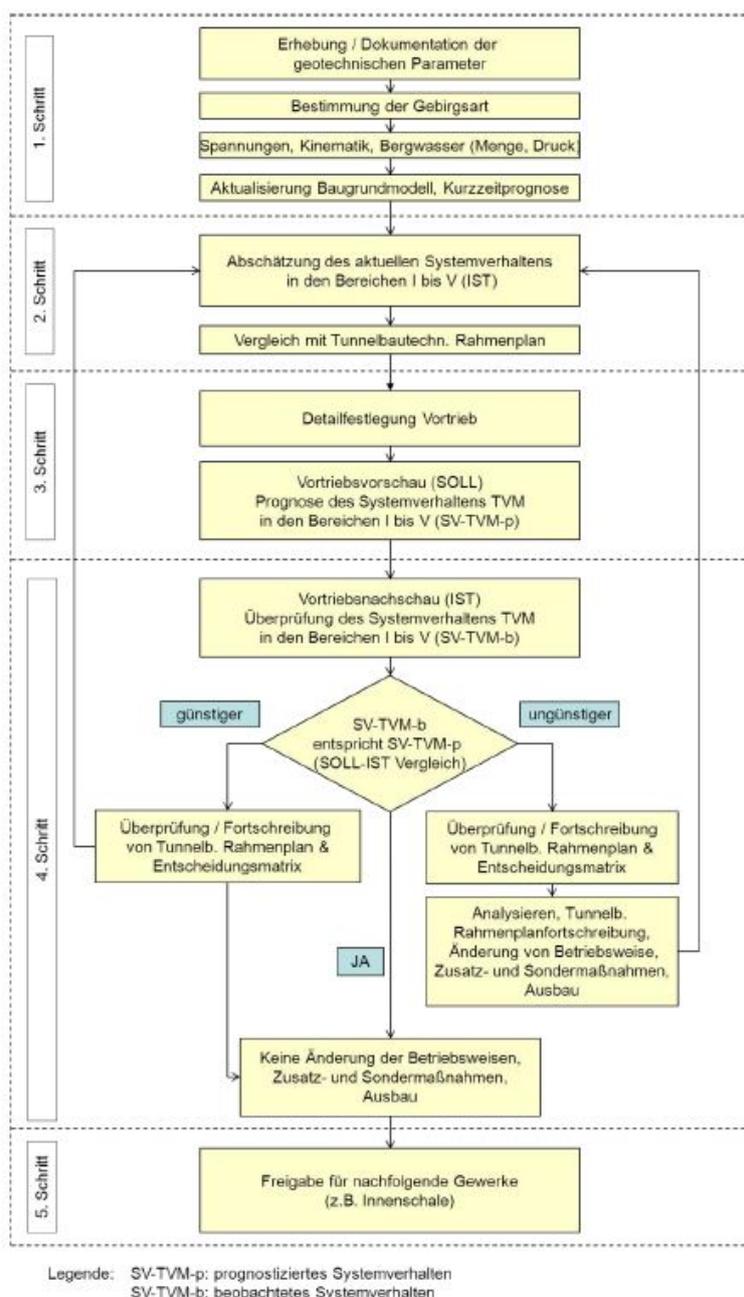


Abb. 3.9: Schematischer Ablauf der geotechnischen Planung in der Phase 3 (Bauausführung) [51]

leistungsabhängige Vergütung mittels Leistungsbeschreibungen (LB) und Leistungsverzeichnissen (LV) [39].

In Österreich bilden das Bundes-Verfassungsgesetz (B-VG) sowie das Normengesetz 1971 die Rechtsgrundlage des Normungswesens. Normen dienen dem Zweck, technische Berechnungen und technisch-wirtschaftliche Verfahren zu vereinfachen und fungibel zu machen. Das österreichische Normungswesen hat unter anderem die Aufgabe, benötigte technische Regeln gemäß international anerkannter Prinzipien zu erstellen. ÖNormen stellen qualifizierte Empfehlungen dar, deren

Einhaltung freiwillig ist. Sie können jedoch durch Gesetze, Verordnungen, Bescheide, Weisungen oder durch Verträge als rechtsverbindlich erklärt werden [5, 61].

Es liegt in Österreich für Bauverträge eine eigens geschaffene Normengruppe B (Bauwesen) vor. Die ÖNORM B 2110 zählt unter anderem zu den wichtigsten Bauvertrags-ÖNormen. Sie verfolgt das Ziel, die allgemein gehaltene gesetzliche Normallage des ABGB bzw. des UGB an die Besonderheiten der rechtlichen Abwicklung eines Bauprojektes anzupassen und einen allgemeinen Bauvertragsstandard zu schaffen. Die ÖNORM B 2110 ist daher auch wesentlicher Bestandteil des bauwirtschaftlichen Mustervertrages [5, 61].

Da im Tunnelbau der Baugrund eine Belastung, ein tragendes Element und gleichzeitig einen Baustoff darstellt, ist eine flexible Tunnelbaumethode zu wählen. Die Beherrschung der sich ändernden Baugrundverhältnisse benötigt eine Vielzahl an flexiblen verfahrenstechnischen Parametern, wie beispielsweise die technische Lösemethode, die Abschlagslänge und die bautechnischen Maßnahmen zur Stützung und Sicherung des Hohlraumes. Um eine faire, leistungsgerechte Vergütung dieser Baumethodiken zu gewährleisten, benötigt man ein geotechnisches Klassifizierungssystem, welches ein dynamisches Vergütungsmodell repräsentiert [30]. Eine geotechnische Untersuchung und deren tunnelbautechnische Beurteilung, wie in den Kapiteln 3.1.2 und 3.1.3 beschrieben, ist somit Grundlage für eine angemessene und leistungsgerechte Vergütung im Tunnelbau [33].

Die Vortriebsklassifizierung nach ÖN B 2203-1 für den zyklischen Vortrieb und nach ÖN B 2203-2 für den kontinuierlichen Vortrieb soll eine Abschätzung der Kosten, der Zeit und des Stützmitteleinbaus ermöglichen. Die in der ÖNORM B 2203-1 und ÖNORM B 2203-2 beschriebenen Verfahrens- und Vertragsbestimmungen für die Ausführung von Untertagebauarbeiten bilden ein dynamisch steuerbares Vergütungsmodell ab [30].

3.2.1 Vortriebsklassifizierung

Die bautechnischen Leistungen im Tunnelbau durchlaufen von der Planungs- bis zur Ausführungsphase, auf Grund der tatsächlich angetroffenen Gebirgsverhältnisse im Vergleich zu den prognostizierten Werten, eine schrittweise Adaption. Die Vergütung der bautechnischen Leistungen im Tunnelbau muss daher folgende drei Projektphasen berücksichtigen:

- **Projektphase 1: Vergabe**
Auf Basis der Baugrundprognose werden mittels Vortriebsklassifizierung klassenspezifische Vortriebsleistungen und Einheitspreise festgelegt.
- **Projektphase 2: Ausführung**
Die prognostizierten verfahrenstechnischen Maßnahmen werden an die, auf Grund der veränderlichen Baugrundverhältnisse tatsächlich notwendigen Maßnahmen angepasst. Dadurch entsteht eine Veränderung in den in der Projektphase 1 vereinbarten, klassenspezifischen Vortriebsleistungen und Einheitspreisen. Des Weiteren wird der Verbrauch an Produktionsmitteln verändert.
- **Projektphase 3: Vergütung**
Die Abrechnung erfolgt auf den in der Projektphase 2 tatsächlich festgestellten Baugrundverhältnissen und deren Klassifizierung. Es erfolgt somit eine leistungsabhängige Vergütung auf Basis der klassenspezifisch gewährleisteten Vortriebsleistungen und vereinbarten Einheitspreise.

In Österreich regeln die ÖNORM B 2203-1 und ÖNORM B 2203-2 ein objektives Klassifizierungssystem, welches sowohl den gebirgsmechanischen Belangen wie auch der Preisbildung und Verrechnung der Leistung gerecht wird. Auf Basis eindeutig definierter Kriterien erfolgt dabei eine Klassenzuordnung [30].

3.2.1.1 Vortriebsklassifizierung nach ÖNORM B 2203-1 für den zyklischen Vortrieb

Die ÖNORM B 2203-1 enthält Verfahrens- und Vertragsbestimmungen für die Ausführung von Untertagebauarbeiten im zyklischen Vortrieb.

Die Vortriebsklassifizierung basiert auf Grundlage der geotechnischen Planung. Die Angabe der technisch erforderlichen Lösemethoden, der Unterteilung der Teilquerschnitte und der Längsentwicklung des Vortriebsbereiches ist daher als Basis für die Einteilung der Vortriebsklassen notwendig. Das Ergebnis der Vortriebsklassifizierung wird zweckmäßig in einer Matrix, wie in Abbildung 3.10, dargestellt.

ERSTE ORDNUNGSZAH	ABSCHLAGSLÄNGE BIS		ZWEITE ORDNUNGSZAH										
	KALOTTE oder KALOTTE+ STROSSE	STROSSE	STÜTZMITTELZAH										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	keine Vorgabe	ist projektbezogen festzulegen											
2	4,0 m												
3	3,0 m												
4	2,2 m												
5	1,7 m												
6	1,3 m												
7	1,0 m												
8	0,8 m												
9	0,6 m												

MUSTER

Abb. 3.10: Vortriebsklassenmatrix für den Vortrieb der Kalotte, der Strosse oder der Kalotte mit Strosse [52]

Die Darstellung beinhaltet zwei Ordnungszahlen. Die erste Ordnungszahl ergibt sich aus dem Abschlagslängenbereich des Ausbruchs der Kalotte, der Strosse oder des Querschnittes von Kalotte mit Strosse. Der Sohlenausbruch wird dabei nach dem Öffnungslängenbereich unterteilt. Diese Ordnungszahl wird durch den Geologen vorgegeben. Die zweite Ordnungszahl stellt die Stützmittelzahl dar. Dafür werden für die prognostizierten Gebirgsverhaltenstypen innerhalb definierter Homogenbereiche die voraussichtlich benötigten Sicherungs- und Ausbaumaßnahmen für die Kalotte, die Strosse oder den Querschnitt von Kalotte mit Strosse festgelegt und gemäß ÖNORM B 2203-1 zahlenmäßig bewertet. Die dabei entstehende charakteristische Stützmittelzahl wird in der Vortriebsklassenmatrix eingetragen. Die zweite Ordnungszahl der Sohle wird durch die Ausbauart definiert [52].

Es gelten für die zweite Ordnungszahl Gültigkeitsbereiche, wie in Abbildung 3.11 ersichtlich, welche eine Schwankungsbreite (in positiver und negativer Richtung) in Abhängigkeit von der

Abschlagslänge Kalotte bis	Maximaler Geltungsbereich für die zweite Ordnungszahl (Stützmittelzahl) Kalotte	Abschlagslänge Strosse bis	Maximaler Geltungsbereich für die zweite Ordnungszahl (Stützmittelzahl) Strosse
Keine Vorgabe	$\pm 0,35$	Keine Vorgabe	$\pm 0,45$
4,0 m	$\pm 0,35$		
3,0 m	$\pm 0,45$	3,0 m	$\pm 0,70$
2,2 m	$\pm 0,60$		
1,7 m	$\pm 0,80$	2,0 m	$\pm 1,20$
1,3 m	$\pm 1,00$		
1,0 m	$\pm 1,30$	1,0 m	$\pm 2,10$
0,8 m	$\pm 1,60$		
0,6 m	$\pm 2,10$		

Abb. 3.11: Gültigkeitsbereich der zweiten Ordnungszahl [52]

Abschlagslänge darstellen. Die Schnittpunkte der ersten und der zweiten Ordnungszahl inklusive der Schwankungsbreite ergeben Matrixfelder, welche die Vortriebsklassen darstellen [52]. Die auftretenden Vortriebsklassen werden gemeinsam mit deren Vordersatz vom Auftraggeber festgelegt. Der Auftragnehmer bestimmt den garantierten Einheitspreis je Kubikmeter Ausbruch und die garantierte Vortriebsleistung je Arbeitstag für die einzelnen Vortriebsklassen. Die Spannweite der Vortriebsklassen gewährleistet eine gewisse Kostensicherheit, da geringfügige Änderungen in den Abschlagslängen und am Ausmaß der Sicherungsmaßnahmen keine sofortige Vortriebsklassenänderung und damit verbundene Einheitspreisänderung bewirken. Die Abrechnung erfolgt mit der vom AN angegebenen Leistung. Der Fall von Wassererschwerenissen wird über zusätzliche Vortriebszeiten abgegolten (Verrechnungseinheiten), die mittels Abminderungsfaktoren für die Vortriebsleistung ermittelt werden [30].

3.2.1.2 Vortriebsklassifizierung nach ÖNORM B 2203-2 für den kontinuierlichen Vortrieb

Die ÖNORM B 2203-2 enthält Verfahrens- und Vertragsbestimmungen für die Ausführung von Untertagebauarbeiten im kontinuierlichen Vortrieb.

Der Vortrieb ist in Hinblick auf die Gebirgscharakterisierung in Vortriebsabschnitte zu gliedern. Bei Bedarf können diese Vortriebsabschnitte weiter in Vortriebsklassen unterteilt werden. Die erste Ordnungszahl ergibt sich aus dem Vortriebsabschnitt und ist daher vom Löseverhalten (Gesteinsart, Zerlegungsgrad, Penetration etc.), Gebirgsverhalten und den baubetrieblichen Interessen abhängig. Die Beschreibung der ersten Ordnungszahl erfolgt auf verbaler Basis. Die zweite Ordnungszahl ist von den leistungsbestimmenden Merkmalen des Vortriebssystems abhängig. Sie hängt somit von dem Typ der eingesetzten Vortriebsmaschine ab und berücksichtigt beispielsweise Merkmale wie die Verspannbarkeit, die Art der Abstützung und die Art des Ausbaus. Im Zuge der Bewertung der Regelstützmittel für die zweite Ordnungszahl werden zwei verschiedene Arbeitsbereiche, welche den Ort des Einbaus darstellen, berücksichtigt [53].

Abbildung 3.12 zeigt Beispiele für eine Vortriebsklassifizierung für offene TBM und TBM mit Aufweitungsbohrkopf.

ERSTE ORDNUNGSGRUPPE VORTRIEBSABSCHNITTE (VA) gemäß 4.3.2.2		ZWEITE ORDNUNGSGRUPPE											
		Stützmittelzahl gemäß 4.3.2.3											
		Maximaler Geltungsbereich											
		1	2	3	5	7	9	13	17	21	27	33	39
	± 0,5			± 1,0			± 2,0			± 3,0			
1	1/0,5	1/1,5	1/2,5	1/4	1/6	1/8	1/11	1/15	1/19	1/24	1/30	1/36	
2		2/1,5	2/2,5	2/4	2/6	2/8	2/11						
3	3/0,5	3/1,5	3/2,5	3/4									
n-1													
n													

Abb. 3.12: Vortriebsklassenmatrix für offene TBM und TBM mit Aufweitungsbohrkopf [53]

3.2.2 Tunnelbauverträge in Österreich

Gegenüber konventionellen Bauverträgen herrscht bei Tunnelbauverträgen ein besonderer Regelungsbedarf. Im Tunnelbau ist die vom AN zu erbringende Leistung direkt vom Baugrund als Baustoff abhängig. Dieser kann jedoch niemals komplett vor der Leistungserbringung beschrieben und definiert werden. Es ergeben sich somit die Schwierigkeiten ausführungsbegleitender Änderungen hinsichtlich der erwarteten Leistungskomponenten. Es entsteht ein vertraglicher Regelungsbedarf in den Bereichen des Vergabe- und Vertragsrecht wie auch der Abrechnung. Der Lösungsansatz für diese Fragestellungen ist ein dynamisches Vergütungsmodell für den Untertagebau. Dieses verfolgt aus vergabe- und vertragsrechtlichen wie auch abrechnungstechnisch betrachteten Gesichtspunkten folgende Ziele:

- Eindeutige, vollständige und neutrale Beschreibung der Leistung auf Grundlage eines geotechnischen Klassifizierungssystems. Das Kriterium der Kalkulierbarkeit wird für den Bieter gewährleistet und eine objektive und nachvollziehbare Feststellung von Abweichungen von der vertraglichen Leistung ist möglich.
- Auf Grund der im Vergütungsmodell formulierten Bauzeit- und Entgeltanpassungsmechanismen an die veränderten Baugrundverhältnisse erfolgt eine automatische vertragliche Anpassung bei Veränderung.
- Der Vertrag ermöglicht eine faire Risikoverteilung zwischen den Vertragsparteien.

In Österreich findet das in der ÖNORM B 2203 definierte dynamische Vergütungsmodell der Vortriebsklassifizierung (beschrieben unter Punkt 3.2.1) zu diesem Zweck Anwendung. Das System ermöglicht eine eindeutige Vortriebsklassenzuordnung durch die Abschlagslänge und den erforderlichen Bedarf an Sicherungsmaßnahmen in Abhängigkeit zu dem zu erwartenden Gebirgsverhalten beim Vortrieb [61]. Vergaberechtlich stehen somit bei Tunnelbauverträgen für öffentliche Aufträge folgende Aspekte im Vordergrund:

- Gewährleistung eines fairen Wettbewerbs unter den Anbietern,

- Vergleichbarkeit der Angebote,
- Reduzierung von Spekulation,
- Faire Risikoverteilung.

Vertragsrechtlich betrachtet ermöglicht das dynamische Vergütungsmodell folgende Punkte:

- Adaptionfähigkeit bei geänderten Verhältnissen,
- Faire Risikoverteilung,
- Maßnahmen zur Vermeidung und Einschränkung von Streitigkeiten [30].

3.3 Baubetrieb

Die Entwicklung eines Bauprojektes durchläuft von der Idee, dem Bauentschluss des Bauherrn bis zur Fertigstellung und Abnahme des Bauwerks folgende Phasen:

- Phase 1: Planung, Konstruktion und Genehmigung
- Phase 2: Bauvorbereitung
- Phase 3: Bauausführung

Die Beschreibung der Phase 1 des Bauablaufes für den Tunnelbau fand bereits im Zuge dieser Arbeit statt und ist in den Kapiteln 3.1 und 3.2 nachzulesen. Aufbauend auf den darin gewonnenen Empfehlungen zur Leistungsbeschreibung (z.B. Verfahrenswahl) erfolgt in Phase 2 eine entsprechende Organisation der arbeitsvorbereitenden Maßnahmen [26]. Diese baubetriebliche Arbeitsvorbereitung gliedert sich in die Aufbauorganisation und die Ablauforganisation. Die Aufbauorganisation definiert im Wesentlichen die Art und Aufgaben der Projektbeteiligten. Sie vergibt somit Weisungsbefugnisse und weist auf Schnittstellen innerhalb der Organisation hin. Die Ablauforganisation bestimmt dagegen, nach welchen Prinzipien (sowohl zeitlich als auch in ihrer Art) die Aufgaben abzuwickeln sind [70].

Die Zusammenstellung der Informationen zum Bauverfahren, zur Geräteauswahl und zur Leistungs- und Kostenberechnung ermöglicht die Angebotserstellung in der Phase 2. Die Durchführung des Bauprozesses wird wesentlich vom Bauverfahren beschrieben, welches die Methodik definiert. Sowohl der zeitliche Ablauf als auch die kapazitative und räumliche Kombination der Produktionsfaktoren werden vom Bauverfahren gekennzeichnet. Die Produktionsfaktoren werden aus betriebswirtschaftlicher Sicht in Werkstoffe, Betriebsmittel, Personalbedarf und leitende Arbeit (Bauleiter, Polier) unterteilt [26].

3.3.1 Bauablaufplanung

Wurde ein Bauverfahren zur Lösung eines bautechnischen Problems gefunden, wird dieses Verfahren explizit für die Anwendung auf der Baustelle ausgelegt. Dies bedeutet, dass jeder Standort an dem die verschiedenen Fertigungsprozesse stattfinden, sowie die Transport- und Umschlagwege dazwischen konkret ausgebildet und hinsichtlich ihrer Ausstattung und Koordination untereinander optimiert werden [26].

Eine wirtschaftliche Fertigungsplanung beinhaltet die Bauablaufplanung, die Mittelplanung, die Baustelleneinrichtungsplanung und eine begleitende Dokumentation. Dabei wird das Ziel eines möglichst konfliktarmen, termingerechten und wirtschaftlichen Bauablaufs verfolgt. Die Planung der Bauprozesse mit ausreichender Vorlaufzeit ermöglicht unter Berücksichtigung der jeweils eintretenden Randbedingungen:

- ein Leistungsmaximum des eingesetzten Personal- und Materialbedarfs sowie
- ein Minimum an entstandenen Kosten.

Die Arbeitsvorbereitung ist für jede Bauabwicklung spezifisch durchzuführen. Die sorgfältige Dokumentation und Aufbereitung der Planungsdaten und -ergebnisse ermöglichen die Erstellung einer Datenbank an Erfahrungen. Somit können auf Grundlage bereits abgewickelter Projekte neu geplante Bauausführungen optimiert werden [70].

Die wesentlichen Phasen der Fertigungsplanung werden nun im Folgenden für den Bereich des Tunnelbaus näher erläutert. Auf Grund der Längserstreckung unter Tage kommt einer gut durchdachten Logistik bei der Abwicklung von Tunnelbauprojekten besonderer Bedeutung zu. Alle Ver- und Entsorgungstätigkeiten auf und von der Baustelle müssen koordiniert werden, sodass der Ablauf des Baubetriebes keine störenden Einflüsse erfährt [30].

Die Logistik beschäftigt sich neben der Erstellung eines Bauzeitplanes mit der Geräte- und Personaldisposition sowie der Materialbewirtschaftung. Im Folgenden wird besonders auf die Schutterung eingegangen, da diese den Bauablauf im Tunnelbau wesentlich beeinflusst.

3.3.1.1 Bauzeitplanung

Zur Erstellung einer Bauzeitplanung müssen die Arbeitsabläufe einer Baustelle vor Bauausführungsbeginn detailliert geplant, koordiniert und organisiert werden. Die Bauzeitplanung verfolgt das Ziel einer graphischen Darstellung der Bauabläufe, welche die zeitliche Zuordnung der Prozesstätigkeiten in gegenseitiger Abhängigkeit abbildet. Ein Bauzeitplan dient als Führungsinstrument der Bauleitung, da diese somit zu jedem Zeitpunkt den Einsatz von Personal, Geräten und Baustoffen disponieren, steuern und kontrollieren kann. Der Bauzeitplan ist laufend mit dem tatsächlichen Bauablauf fortzuschreiben. Der Genauigkeitsgrad wird daher anforderungsgerecht an den Informationsstand sowie das Planungsstadium angepasst. Dieser iterative Planungsprozess ermöglicht unter anderem eine volle Ausnutzung der Kapazitäten bei gleichzeitiger Minimierung der Herstellkosten und Gewährleistung des ungestörten Bauablaufs [30]. Die Bauzeitplanung gilt als einer der wichtigsten Prozesse in der baubetrieblichen Arbeitsvorbereitung einer Baustelle. Sie umfasst folgende Verfahrensschritte:

- Feststellung aller den Bauablauf und die Terminsituation betreffenden Rahmenbedingungen,

- Ermittlung der Art und des Umfangs der auszuführenden Leistung,
- Wahl der wirtschaftlichsten Bauverfahren,
- Ermittlung und detaillierte Beschreibung (Reihenfolge, Ablaufbedingungen) der auftretenden Arbeitsvorgänge,
- Ermittlung der Aufwand- und Leistungswerte,
- Evaluierung der verfügbaren Produktionsmittel (Personal, Geräte, Material),
- Errechnung der Vorgangsdauern unter Berücksichtigung des ermittelten Personal-, Geräte- und Materialbedarfs,
- Festhalten der Ergebnisse der vorangegangenen Schritte in einem Arbeitsverzeichnis sowie Erstellung eines vorläufigen Ablaufplanes,
- Baustelleneinrichtungsplanung,
- Iterative Optimierung des Bauablaufs und
- Erstellung des endgültigen Bauzeitplanes.

Der endgültige Bauablauf wird optisch durch verschiedene Darstellungsformen, wie beispielsweise einem Balken- oder Liniendiagramm, aufbereitet. Je nach Planungsstufe werden Grob-, Mittel- und Feinplanung unterschieden [30, 70].

3.3.1.2 Gerätedisposition

Die Kapazitätenplanung beinhaltet die Bauproduktionsmittelplanung und die Baustellenbelegschaftsplanung. Die Bauproduktionsmittelplanung legt nach der Auswahl des Bauverfahrens die Anzahl, die Art, die Leistungsfähigkeit und die Einsatzdauer der Bauproduktionsmittel fest. Es werden dabei die im Bauzeitplan definierten Rahmenbedingungen sowie die Kapazitäten innerhalb des Unternehmens als auch das Bestreben nach Wirtschaftlichkeit berücksichtigt [70]. Der Tunnelbau bedient sich verschiedener Logistikkonzepte für die Abwicklung der Schutterung. Die Schutterung bezeichnet den Prozess der Aufnahme und des Abtransports des Ausbruchmaterials bei der Herstellung von unterirdischen Bauwerken. Die Vortriebsgeschwindigkeit des zyklischen Vortriebs wird maßgeblich durch die Dauer des Schuttervorgangs beeinflusst, welche beim Sprengvorgang sogar am kritischen Weg liegt. Die Wahl des Logistikkonzeptes inklusive der gewählten Lade- und Transportgeräte hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Dimension des zur Verfügung stehenden Lichtraums im Quer- und Längsschnitt,
- die Steigungsverhältnisse,
- die Transportentfernungen,

- die Kubatur des Ausbruchsvolumens pro Abschlagsquerschnitt sowie
- die Parameter des ausgebrochenen Materials, wie z.B. die Korngröße [30].

Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen gleisgebundener und radgebundener Logistik sowie der Bandschutterung. Gleisgebundene Systeme finden vor allem bei beengten Verhältnissen und langen Transportentfernungen ihren Einsatz. Sie zeichnen sich durch eine hohe Förderleistung auf Grund von kontinuierlichen Geschwindigkeiten bis zu 30 km/h und durch geringe Personalkosten sowie einer hohen Energieeffizienz hinsichtlich der Transportmassen aus. Nachteile liegen in der unflexiblen und teuer zu errichtenden Trassenführung der Gleise, sowie der Ausführung von speziellen Wagenwechseleinrichtungen für Be- und Entladung sowie der geringen Steigfähigkeit. Die Schutterstrecke wird von Diesel- und Akkulokomotiven befahren, welche diverser Förder- und Versorgungswaggons transportieren [69].

Radgebundene Logistikkonzepte benötigen Kraftfahrzeuge für den Lade- und Transportvorgang des Ausbruchmaterials. Es werden speziell für den Tunnelbau entwickelte Fahrzeuge wie auch handelsübliche Lastkraftwagen und Betonnachmischer eingesetzt [69]. Ladegeräte dienen dem Umschlag des Ausbruchmaterials vom Gewinnungsort zur Transporteinrichtung. Die Transportgeräte haben die Aufgabe der Abförderung des Ausbruchmaterials vom Vortriebsbereich im Tunnel zum Zwischenlager in Portalnähe [30]. Die radgebundene Logistik benötigt somit den Einsatz vieler Geräte, welche auf Grund ihrer Motorisierung einen hohen Luftverbrauch erzeugen. Neben einem hohen Personalaufwand wird der große Querschnittsbedarf dieses Logistikkonzepts als nachteilig betrachtet. Die Vorteile des Systems liegen in der hohen Beweglichkeit und der sehr guten Steigfähigkeit wie auch der Wiederverwendbarkeit der Geräte bei anderen Projekten. Des Weiteren können hohe Fahrgeschwindigkeiten bei schlechten Fahrbahnverhältnissen erzielt werden [69].

Die Bandschutterung erfolgt mittels Förderbändern. Sie kommen vor allem bei kontinuierlichen Vortrieben zur Schutterung und in Materialaufbereitungsanlagen zum Einsatz. Hohe Leistungsfähigkeit und große Förderlängen zeichnen das System aus. Nachteilig sind die hohen Investitionskosten, die starre Linienführung und die beschränkte Korngröße des zu fördernden Materials. Förderbänder gelten als die auf Baustellen am häufigsten eingesetzten kontinuierlichen Förderer [36].

3.3.1.3 Materialdisposition und -bewirtschaftung

Das auf der Baustelle benötigte Material ergibt sich aus den detailliert ermittelten Leistungsmengen und den technischen Unterlagen. Die dazu gehörigen Bereitstellungstermine sind den Bauablaufplänen zu entnehmen. Die zeitgerechte Lieferung des Materials in passender Güte und Menge erfordert ein entsprechendes logistisches System zwischen der Baustellenleitung und den Baustoffzulieferunternehmen. Verzögerungen und/oder Qualitätsmängel der gelieferten Materialien führen oftmals zu unerwünschten Stillstandszeiten auf der Baustelle [70].

Die Baustelleneinrichtung weist den Flächen des Baugeländes ihre jeweilige Funktion zu. Sie ist für eine optimale Aufteilung der Betriebsabläufe, der notwendigen Trennung der Materialflüsse sowie der Arbeits- und Fertigungsabläufe unumgänglich. Ihre Aufgaben umfassen die Erhaltung der allgemeinen Ordnung bei komplexen Baustellen, die effizienteste Koordinierung der voneinander abhängigen Abläufe sowie die allgemeine Abstimmung der Infrastruktur- und Produktionseinrichtungen auf die Produktion und Leistung. Die Baustelleneinrichtungsplanung

ist immer projektspezifisch und berücksichtigt unter anderem bei Tunnelbaustellen folgende Komponenten:

- die Art der Tunnelbaustelle (Vortriebsart, offene Tunnelbauweise etc.),
- die vorherrschende öffentliche Infrastruktur,
- den Anteil an Eigenunternehmer- und Subunternehmerleistungen,
- die Baustoffversorgungsmöglichkeiten und
- die Bauzeit.

Die durch den Baustelleneinrichtungsplan vorgegebene Flächennutzung sieht neben beispielsweise den Versorgungseinrichtungen auch die Baustoff- und Bauhilfsstoffproduktionsanlagen vor. Diese umfassen unter anderem die Lagerflächen und die Baustoffrecyclinganlage. Bei der Anordnung der Lagerflächen ist darauf zu achten, dass sie über eine Zufahrt verfügen, im Schwenkbereich des Kranes liegen und nach Möglichkeit in geringer Entfernung von der Verwendungsstelle angesiedelt sind. Die Materialien sind gegen übermäßige Verschmutzung zu sichern und bei Bedarf auf ihre Standsicherheit zu überprüfen [33].

Auf Grund der Wirtschaftlichkeit und des Umweltschutzes findet im Tunnelbau vermehrt eine Wiederverwendung von geeigneten Tunnelausbruchmaterial statt. Dieses Umdenken ermöglicht neben der Reduzierung der An- und Abtransporte von Zuschlagstoffen sowie des Ausbruchmaterials, den Verkauf von überschüssigem Ausbruchmaterial an Dritte sowie die Versorgung der eigenen Tunnelbaustelle mit selbsterzeugten Betonzuschlagstoffen (Sand- und Splittprodukte). Das gewonnene Ausbruchmaterial wird in folgende 3 Hauptgruppen klassifiziert:

- Betonzugschlagstoffe (Beton, Spritzbeton),
- Massenschüttgut (Schüttmaterial für Tragschichten oder für Auffüllungen),
- bautechnisch unbrauchbares Material (Deponierung als Bauschutt).

Die Klassifizierung des Ausbruchmaterials basiert auf der Baustelle in einem vor Ort installiertem Labor. Die Prüfmethode sollen eine schnelle und wirtschaftliche Durchführbarkeit bei gleichzeitig hoher Aussagekraft und Reproduzierbarkeit gewährleisten. Der Tunnelvortrieb darf von den Prüfverfahren nicht beeinträchtigt werden. Die Prüfparameter beziehen sich vor allem auf die Gesteinhärte sowie die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Gesteins (Petrographie) [30].

Die Festlegung eines Materialbewirtschaftungskonzeptes in der Planungsphase beruht auf einer Reihe an Untersuchungen über die Art, Menge und Wiederverwertbarkeit des zu erwartenden Ausbruchmaterials. Diese Vorerkundungsmaßnahmen im Rahmen der geologischen Erkundung sollen das Ausbruchmaterial bewerten und beurteilen. Diese Analyse ist jedoch mit Vorsicht zu betrachten, da sich die Prognosen meist auf einzelne Bohrungen stützen und nicht die Streuparameter der Gesteinskennwerte abbildet. Dennoch dient die Beurteilung als Grundlage für die Logistik und Geräteinstallation im Materialbewirtschaftungskonzept. Auch die Bereitstellung von Deponiekapazitäten und von Lieferverträgen basiert auf dieser Beurteilung [30]. Abbildung 3.13 veranschaulicht in Form eines Flussdiagramms den Ablauf eines Materialbewirtschaftungspro-

zesses bei einer Tunnelbaustelle. Die Aufbereitungsanlage erfüllt im Wesentlichen die Aufgaben

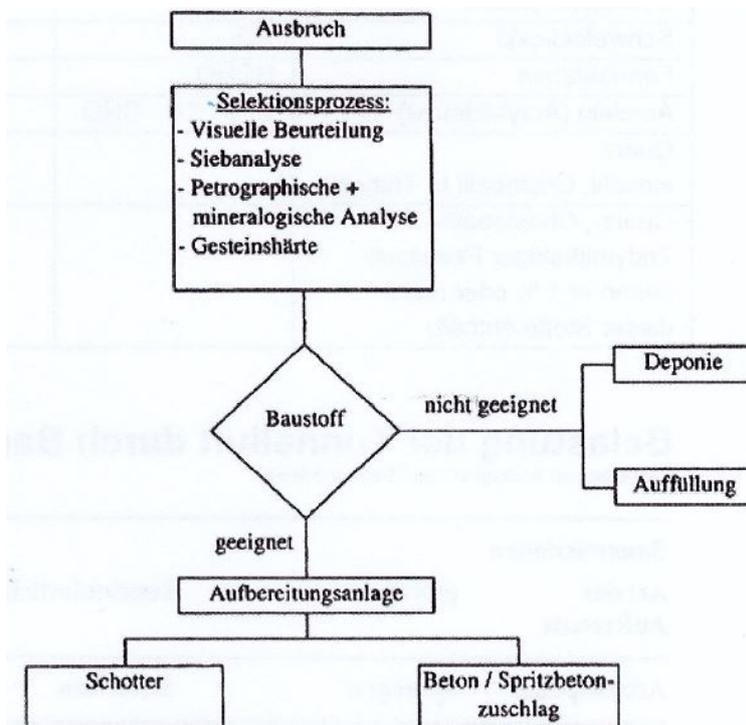


Abb. 3.13: Schema des Materialbewirtschaftungsprozesses bei einer Tunnelbaustelle [30]

des Waschens, Zerkleinerns und des Klassifizierens des gewonnenen Ausbruchmaterials. Die wesentlichen Anwendungsgebiete der aufbereitenden Materialien sind Gesteinskörnungen für die Betonherstellung, Zuschlagstoffe für Schwarzdeckmaterial sowie Material für den Erdbau und die Baustoffherstellung. Die Dimensionierung und der Betrieb der Aufbereitungsanlage werden mit der erforderlichen Leistung (unterteilt nach Korngrößen), den Güteanforderungen und dem geologischen Vorkommen sowie der Verwendung von Recyclingmaterial abgestimmt. Eine ökonomische Arbeitsweise der Materialaufbereitungsanlage erfordert die Abstimmung der einzelnen Anlagenbestandteile aufeinander [36].

Bei der Aufbereitung von TBM-Fräsgut werden im Gegensatz zum Ausbruch aus dem Sprengvortrieb zusätzliche aufbereitungstechnische Maßnahmen benötigt. Der Ablauf der Materialbewirtschaftung und -aufbereitung kann in diesem Fall wie folgt durchgeführt werden:

- Verladung des Materials mittels z.B. Förderbands der TBM über den Nachläufer in den Schutterzug.
- Transport des Materials zur Kippanlage.
- Basierend auf der täglichen Felsbeurteilung im Vortrieb und den petrographischen Untersuchungen wird über die Aufbereitung des Materials nach dem Kippvorgang entschieden.
- Intensive Reinigung des TBM-Bohrguts von Feinstanteilen in Waschtrommeln inklusive Separierung des austretenden Schlamms in Schlammscheidungs- oder Schlammpressanlagen.

- Schonender Bruch der TBM-Gesteinsbruchstücke durch geeignete Verfahren, sodass kein Sandüberschuss entsteht. Dabei hat sich das sogenannte Vertikal-Brechersystem durchgesetzt, bei dem die Komponenten durch Korn-Korn-Kontakt gebrochen werden [34].

3.3.1.4 Personaldisposition

Die Belegschaftsplanung erfolgt ebenfalls in Abstimmung mit dem Bauzeitplan. Der Verlauf der Belegschaftsstärke muss über die gesamte Bauzeit sinnvoll geplant werden und sollte möglichst keine Belegschaftsspitzen aufweisen. Ein inkonstanter Personalbedarf über die gesamte Bauzeit würde ständige Veränderung, in der Logistik von Teilen der Baustelleneinrichtung (z.B. Tagesunterkünften und Quartieren) sowie der Erfüllung sicherheitstechnischer Auflagen (z.B. Erste-Hilfe-Ausstattung) und sonstigen personalstandsabhängigen Auflagen (z.B. Betriebsrat), bewirken. Eine wirtschaftliche Baustellenbelegschaftsplanung ist somit Grundlage für die Reduzierung von gegenseitigen Behinderungen auf der Baustelle. Diese Überlegungen sollten ebenfalls für den Einsatz von Subunternehmern geleistet werden, sodass auch in diesem Bereich gegenseitige Behinderungen und Einschränkungen vermieden werden können [28, 70].

Die Personaleinsatzplanung unterscheidet Angestellte und Arbeiter (gewerbliches Personal). Der notwendige Bedarf wird jeweils an Hand der Bauzeitplanung und den speziellen Erfordernissen der Baustelle ermittelt. Die Zuständigkeiten sowie der Einsatzzeitraum des angestellten Personals wird zumeist mittels eines Baustellenorganigramms abgebildet. Die Disposition der Angestellten erfordert eine zeitgerechte Überprüfung der Verfügbarkeit des Personals sowie Abstimmung und Freigabe der Angestellten von der Geschäftsführung. Das gewerbliche Personal wird auf die in der Arbeitskalkulation aufgestellte Bedarfsermittlung abgestimmt. Die Mannschaftszusammensetzung orientiert sich somit an den Aufwands- und Leistungswerten der Kalkulation wie auch an der Aufgliederung der ermittelten Gesamtarbeitsstunden nach Gewerken. Auf Grundlage der Mannschaftszahl sowie des Detailbauzeitplans erfolgt die Erstellung der Mannschaftseinsatzliste. Diese stellt die Gliederung des eingesetzten Personals dar. Dabei werden die Berufsgruppe, der Einsatzzeitraum sowie die Trennung nach Personal für den allgemeinen Baubetrieb und für die leistungsbezogenen Arbeiten abgebildet. Abbildung 3.14 zeigt beispielhaft eine Mannschaftseinsatzliste für den allgemeinen Baubetrieb. Die Aufteilung basiert nach Arbeitsschritten, nach Bauteilen oder nach Berufsgruppen [28].

Baustelle:				Baumonate														Summe		
Funktion	Name	Std/Mo	Std. Soll	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ma/Mo	Std. Ist	
Magaziner						1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	16	
Einkäufer				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14		
Allg. Baust. LKW-Fahrer							1	1	1	1	1	1	1	1	1		9			
Mechaniker 1						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12			
Mechaniker 2										1	1	1	1	1			5			
Schlosser						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11			
Elektriker 1				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14			
Elektriker 2										1	1	1	1	1	1		6			
Kranfahrer 1										1	1	1	1	1	1	1	8			
Kranfahrer 2											1	1	1	1	1	1	6			
Vermessungsgehilfe 1				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14			
Vermessungsgehilfe 2											1	1	1	1	1		5			
Summe lt. Arbeitsvorbereitung Baustelle				3	4	6	7	7	9	13	13	13	13	12	9	6	5	120		
Summe lt. Urkalkulation																		100		
Summe lt. Arbeitskalkulation																		120		

Abb. 3.14: Mannschaftseinsatzliste für den allgemeinen Baubetrieb [28]

Im Allgemeinen unterscheidet die Arbeitszeitregelung zwischen ein- und zweischichtigen Betriebsformen sowie Sonderformen (Dekadenbetrieb). Der einschichtige Betrieb sieht eine Mannschaft vor, welche montags bis freitags auf der Baustelle anwesend ist. Mehrschichtige Betriebsformen, wie beispielsweise der 2/2-Wochenbetrieb, bestehen aus zwei oder mehreren Schichten, die jeweils täglich anwesend sind [28].

Die Arbeitszeitregelung im Tunnelbau erfolgt, auf Grund des Wunsches eines durchgängigen (über alle 24 Stunden des Tages) Betriebs, als Dekadendurchlaufbetrieb. Der Dekadendurchlaufbetrieb ermöglicht die ständige Anwesenheit der Vortriebsmannschaft und der Aufsicht auf der Baustelle. Es erfolgt somit ein Baufortschritt über den gesamten Tag bei gleichzeitiger Gewährleistung der Sicherheit des Personals. Einer durchgehenden Arbeitszeit von über einer Woche pro Mannschaft, folgt eine längere arbeitsfreie Zeit, welche als Abgang bezeichnet wird. Abbildung 3.15 zeigt schematisch den Ablauf eines 4/3-Dekadendurchlaufbetriebs. Diese Betriebsform beinhaltet vier Mannschaften, von welchen drei auf der Baustelle anwesend sind während die vierte auf Abgang ist. Abbildung 3.15 veranschaulicht einen 16-Tage-Rhythmus, innerhalb dessen eine Mannschaft zwölf Tage auf der Baustelle anwesend ist und anschließend vier Tage arbeitsfrei hat. In der heutigen Zeit erfolgt oftmals ein 14-Tage-Rhythmus mit neun Tagen Baustellenpräsenz und fünf Tagen arbeitsfrei [48].

Im maschinellen Tunnelbau geschieht oftmals die Unterteilung eines Tages in 20 Stunden Arbeitszeit (aufgeteilt auf zwei Partien zu je zehn Stunden Arbeitszeit pro Tag) und einer vierstündigen Wartungsschicht für die Vortriebsmaschine [30].

Woche	1					2					3					4					5					6					7											
Tag	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
Mannsch. 1	Grün	Blau	Rot	Grün	Blau	Rot																																				
Mannsch. 2	Blau	Rot	Grün	Blau	Rot	Grün																																				
Mannsch. 3	Rot	Grün	Blau	Rot	Grün	Blau																																				
Mannsch. 4	Grün	Blau	Rot	Grün	Blau	Rot																																				

Abb. 2.36: 4/3-Dekadendurchlaufbetrieb

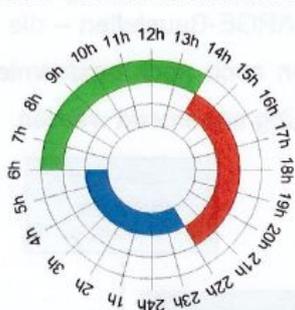


Abb. 3.15: 4/3-Dekadendurchlaufbetrieb - Tagesarbeitszeit [28]

3.3.1.5 Dokumentation

Die Fertigungs- oder auch Arbeitsplanung erstreckt sich von der Informationsbeschaffung über die Bauablaufplanung bis hin zur Mittel- und Baustelleneinrichtungsplanung. Die Dokumentation der Ergebnisse der Fertigungsplanung sind Grundlage für einen überschaubaren Zugang zu allen Planungsergebnissen für alle Projektbeteiligten. Des Weiteren sollen die Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Planung wie auch aus der Bausausführung durch die fortgeschriebene

Dokumentation als Basis für zukünftige Projekte greif- und nachvollziehbar sein. Die Unterlagen müssen in Form von Dokumentationshilfen, wie beispielsweise Protokollen, Arbeitsverzeichnissen, Bauablaufplänen und Gerätelisten, gesammelt und über einen bestimmten Zeitraum aufbewahrt werden [70].

Die im Tunnelbau angewandte Beobachtungsmethode erfordert eine laufende Adaption der bautechnischen Maßnahmen an das während des Baufortschrittes beobachtete Gebirgs- und Systemverhalten. Die Konstruktionsmethode beinhaltet somit eine laufende Fortschreibung der gewonnenen Erkenntnisse, auf deren Basis eine Beurteilung und gegebenenfalls eine zweckmäßige Anpassung der Bauprozesse stattfindet. Dieser Rückfluss der während des Baufortschritts gewonnenen Informationen ermöglicht die Optimierung und erfordert in allen Stadien der Bauausführung eine automatisierte, messtechnische Aufnahme sowie Prognose des Baugrundverhaltens (in dem Fall: Gebirge) [23].

Umfangreiche Mess-, Beobachtungs- und Interpretationsprogramme, nachzulesen im Kapitel 3.3.2, beobachten das Systemverhalten während des Vortriebs und stellen fest, ob das beobachtete Systemverhalten innerhalb des erwarteten Bereichs liegt. Die Interventionsmatrix, welche Kernstück des geotechnischen Sicherheitsmanagementplans ist, definiert das erwartete Soll-Verhalten mit den Vorwarn-, Warn- und Alarmkriterien sowie die zugehörigen Interventionsmaßnahmen. Eine systematische Dokumentation der geologischen und geotechnischen Verhältnisse und des beobachteten Systemverhaltens sind wesentlicher Bestandteil der Konstruktionsmethodik [37].

Eine sachliche ingenieurgeologische Dokumentation verfolgt somit das Ziel der Erfassung des tatsächlich angetroffenen Gebirgszustandes, der geologischen Beweissicherung und der Fortschreibung der Prognose. Sie ist unter anderem Grundlage für:

- die Beurteilung des Gebirgsverhaltens und für die Einteilung in Vortriebsklassen,
- die Interpretation der Verformungsmessungen,
- die Abschätzung von Risiken,
- die Abrechnung sowie
- die Beurteilung von Schadensfällen, Gewährleistungsansprüchen und die Planung von Sanierungen [49].

Kernstück einer guten, objektiven, ingenieurgeologischen Dokumentation im Tunnelbau ist die baugeologische Vortriebsdokumentation. Diese erhebt die Gebirgsverhältnisse im unmittelbaren Abschlagsbereich und Bohrkopfbereich. Es erfolgt eine Protokollierung in Form von Ortsbrustskizzen und dazugehörigen Datenblättern. Ziel der baugeologischen Vortriebsdokumentation ist die detaillierte Erfassung der Gebirgsverhältnisse. Auf deren Grundlage erfolgen

- die Bestimmung der Vortriebsmaßnahmen (Ausbruch und Sicherung) für den unmittelbar aufzufahrenden Gebirgsabschnitt (kurzfristige Prognose) sowie
- der Vergleich der angetroffenen mit den prognostizierten geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen.

Auf Basis der baugelogeologischen Vortriebsdokumentation wird das angetroffene Gebirge den bauvertraglich definierten Gebirgsarten zugewiesen [54]. Die Aufnahme der im Zuge des Vortriebs freigelegten Aufschlüsse obliegt einem Geologen. Die Methoden umfassen dabei unter anderem die Anfertigung von Skizzen, die Erstellung von Digitalfotos und diverse Messungen, beispielsweise von Gefügeorientierungen, sowie Probennahmen in situ und im Labor [24]. Abbildung 3.16 zeigt beispielhaft eine Handskizzierung einer Ortsbrustaufnahme. Das Bild entstand beim Vortrieb des Tunnels Vomp-Terfens, Abschnitt Losverlängerung, direkt an der Ortsbrust und wurde nur noch teilweise im Büro angefärbt [49].

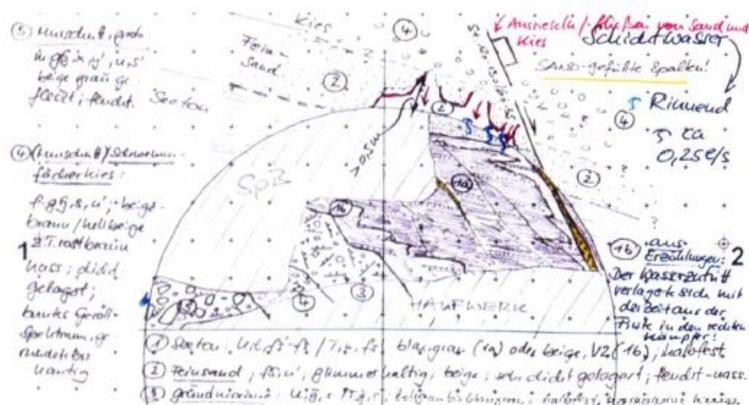


Abb. 3.16: Beispiel einer Ortsbrust-Handskizze [49]

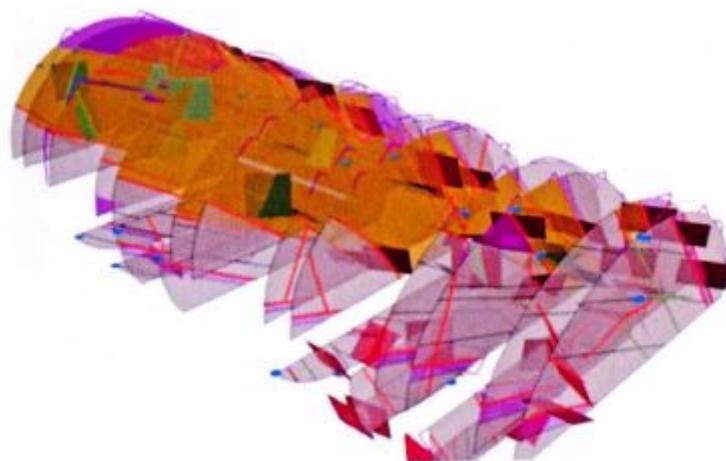


Abb. 3.17: GIS-Modell der Geologie eines Tunnelabschnitts mit mehreren geologischen Ortsbrustaufnahmen [24]

Der Stand der Technik verwendet für die baugelogeologische Dokumentation geologische Fachinformationssysteme. Es handelt sich dabei um Programme wie beispielsweise solidTunnel (Harbourdome) oder Tugis.Net (Geoconsult ZT GmbH). Bei der Verwendung der Programme ist auf folgende Punkte zu achten:

- Alle geologisch-hydrogeologischen Daten müssen für die rasche Verfügbarkeit der Informationen digital erfasst werden.

- Da es sich um nahezu nur räumliche Daten und Informationen handelt, sind im System Raumkoordinaten festzulegen und anzuwenden.
- Automatische Datenvalidierungen und Plausibilitätsprüfungen müssen vor Datenanalyse und vor Visualisierung fehlerhafte Daten bereinigen.
- Analysefunktionen und Visualisierungen veranschaulichen komplexe geologische Sachverhalte und ermöglichen die Erstellung von Prognosen.

Die aus den Beobachtungen gewonnenen Erkenntnisse werden durch Georeferenzierung in einen räumlichen Kontext gestellt. Beim Zeichnen der Geometrie von geologischen Befunden werden somit Koordinaten in einer Datenbank abgelegt. Durch die dabei entstehenden geographischen Informationssystem(GIS)-Modelle entstehen graphische Repräsentationen geologischer Objekte [24].

Abbildung 3.17 zeigt beispielhaft ein GIS-Modell der Geologie eines Tunnelabschnitts mit mehreren geologischen Ortsbrustaufnahmen. Die farbigen Polygone stellen dabei die Verschnitte der lithologischen Körper mit der Ortsbrust dar. Die roten Linien zeigen Störungsflächenverschnitte, die grünen Kluftverschnitte. Die blauen Punkte veranschaulichen Wasserzutritte, während Gefügemessungen in Form von Einheitsquadraten visualisiert sind. Die Ansicht ist im Modell frei im Raum drehbar. Die geologische Tunneldokumentation erfasst somit "2½ dimensionale Modelle", welche Punkt-, Linien- und Polygonthemen lagerichtig im 3D-Raum darstellen [24].

3.3.2 Messtechnik

Der Tunnelbau bedient sich einer Vielfalt an Messverfahren. Alle Verfahren verfolgen dabei das Ziel tiefer reichender Erkenntnisse über die Gesteins- und Gebirgseigenschaften im Hinblick auf deren Vermögen, zur Aufnahme und Ableitung der auftretenden Hohlraumbauwerkskräfte zu gewinnen. Die Messverfahren liefern somit eine wichtige Grundlage für die statische Nachweisführung im Tunnelbau [56].

Die Messtechnik begleitet den Baubetrieb im Tunnelbau von der Planung über die Bauvorbereitung bis hin zur Bauausführung. Die Erfassung und der Rückfluss von Messergebnissen während der Bauausführung in die Planungsgrundlagen führen zu einer stetigen Verbesserung der gewählten bautechnischen Maßnahmen. Diese begleitende Messtechnik ermöglicht die Erkennung von Schädigungsrisiken und anderen Gefahrenpotenzialen vor deren Eintritt sowie die Optimierung der Ausbau- und Sicherungsmaßnahmen vor Ort. Diese Methodik gewährleistet eine technische und wirtschaftliche Ausführung des Tunnelbauwerkes. Wesentlich tragen dazu die messtechnische Überwachung der Standsicherheitsparameter (Verformungen und Spannungen) und der Vergleich der Messergebnisse mit den zuvor ausgeführten Berechnungsergebnissen bei. Die eingesetzten Messprogramme verfolgen somit folgende drei Ziele für die Gewährleistung eines wirtschaftlichen Baubetriebs:

- messtechnische Kontrolle durch (dreidimensionalen) Informationsgewinn über das Gebirgsverhalten während der Bauausführung,
- Vergleich der so gewonnenen Erkenntnisse über die Gebirgsreaktionen mit den erwarteten Werten (Prognose) sowie

- Einleitung von gegensteuernden bautechnischen Maßnahmen bei drohender Gefahr [23, 30].

Geotechnische Messgeräte können folgende Aufgaben erfüllen:

- Messungen von Relativverschiebungen,
- Kraft- und Spannungsmessungen,
- Grundwasserbeobachtungen sowie
- Bestimmung von Verformungseigenschaften des Untergrundes in Bohrlöchern [56].

Die im Tunnelbau angewandten Messtechniken erfüllen alle oben genannten Aufgaben. Besonderes Augenmerk liegt jedoch auf der Messung von Verformungen und Spannungen. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über die im Tunnelbau meist verwendeten Messsysteme und deren Funktionen.

Tab. 3.4: Überblick über die im Tunnelbau am häufigsten eingesetzten Messmethoden [30]

Messmethode	Funktion/ Anwendung
Optische 3D - Verformungsmessung	Ermittlung räumlicher Verschiebungen beliebiger Messpunkte entlang der Tunnellaubung in absoluten Koordinaten
Extensometer	Verschiebungsmessung in Richtung der Bohrlochachse
Inklinometer	Verschiebungsmessung quer zur Bohrlochachse
Gleitmikrometer	Bestimmung der axialen Verschiebungskomponenten entlang einer Bohrung
Druckkissen / Schwingsaitenmessgeber	Ermittlung von Spannungen/Dehnungen im Beton oder in Fugen
Messanker	Beanspruchungsverlauf von Ankern über Tiefe und Zeit
Tunnel-Scanner	Erfassung der kompletten Tunneloberfläche, räumliches Modell der Tunnelschale
Tunnelseismik	Erkundung von Gesteinswechsel und Störungszonen
Feinnivellier	Oberflächenmessungen

Im Folgenden werden die Verfahren Tunnelscanner und Tunnelseismik etwas näher beschrieben, da die Methoden für die Rekonstruktion von 3D-Modellen für die geologische Dokumentation immer mehr an Bedeutung gewinnen. Diese Messtechniken finden vor allem bereits im zyklischen Tunnelbau große Anwendung. Für diesen und auch für den kontinuierlichen Vortrieb laufen derzeit einige Pilotprojekte. Durch geophysikalische Erkundung sowie 3D-Laserscanning und Kamerasystemen soll eine Verbesserung der fortschreitenden Vortriebsdokumentation erreicht werden. Nähere Informationen dazu können den Fachartikeln aus [15, 16, 45, 58] entnommen werden und fließen in das Kapitel 5 ein.

Tunnel-Scanner

Tunnel-Scanner erfassen innerhalb weniger Minuten Millionen von Messpunkten in Tunnelbauwerken. Die photogrammetrisch arbeitenden Scanner stellen somit die gesamte Oberfläche dar. Durch Vergleich von Aufnahmen während unterschiedlicher Bauphasen (z.B. Ausbruch und Spritzbeton) ermöglicht diese Messmethode eine Überprüfung der Schichtdicken von beispielsweise der Spritzbetonschale. Es erfolgt eine Kontrolle der Einhaltung von bautechnischen Vorgaben durch den Bauherrn [12].

Die Aufnahme der Tunneloberfläche passiert durch zwei hochauflösende Digitalkameras, die auf einem starren Rahmen fix montiert sind. Die beiden Kameras erfassen gleichzeitig von zwei verschiedenen Positionen sukzessive die Tunnellaubung und ermöglichen dadurch eine räumliche Rekonstruktion. Mittels beispielsweise selbstzielsuchenden Theodoliten erfolgt zeitgleich die geodätische Bestimmung der Position des Messgerätes. Die aufgezeichneten Daten können digital weiterverarbeitet und in ein räumliches Modell der Tunnelschale transformiert werden [30].

Tunnelseismik

Seismische Untersuchungen geben Auskunft über den strukturellen Aufbau des Gebirges und die speziellen Eigenschaften der einzelnen Gesteinsschichten. Die Seismik nutzt bei ihrer Anwendung den Fakt, dass beim Übergang zwischen zwei Schichten mit unterschiedlichen elastischen Eigenschaften ein Teil der seismischen Wellen reflektiert, ein anderer refraktiert wird. Durch die Ausbreitung künstlich erzeugter elastischer Wellen und der Messung der Laufzeit zwischen ihrer Erzeugung und der Empfängerstelle können die Lagen von Schichtgrenzen und die in ihnen auftretenden Wellengeschwindigkeiten bestimmt werden. Es kann somit mit Hilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen, des Absorptionskoeffizienten und der Schallhärte als Beurteilungsgrößen auf das vorherrschende Gestein geschlossen werden. Verfahrenstechnisch wird zwischen der direkten Laufzeitbestimmung, der Refraktions- und der Reflexionsseismik unterschieden. Da bei der Reflexionsseismik Sender und Empfänger am selben Ort platziert werden können, findet diese häufige Anwendung im Tunnelbau [30, 56].

Kapitel 4

Digitalisierung in der Baubranche

Seit jeher wandelt und entwickelt der Mensch sich und sein Umfeld. Der Bereich der Industrie erfährt derzeit einen strategischen und technologischen Umbruch, dessen gewaltige Auswirkungen global zu spüren sind. Historisch betrachtet unterscheidet man vier industrielle Revolutionen, wobei wir uns heute im Zeitalter Industrie 4.0. befinden. Die erste Industrielle Revolution (Industrie 1.0) fand durch die Entwicklung und Implementierung der Wasser- und Dampfkraft in mechanischen Produktionsanlagen Ende des 18. Jahrhunderts statt. Industrie 2.0 wurde am Beginn des 20. Jahrhunderts durch den Einsatz von elektrischer Energie für die Massenproduktion eingeläutet. Die dritte industrielle Revolution fand am Beginn der 1970er Jahre statt. Sie zeichnete sich durch die Verwendung von Elektronik und Informationstechnologie zur verstärkten Automatisierung der Produktion aus. Die darauffolgende durch die zunehmende Digitalisierung initiierte digitale Revolution charakterisiert die heutige Industrie 4.0. Der Wandel beruht vorwiegend auf die Vernetzung der physischen und virtuellen Welt zu Cyber-Physischen Systemen (CPS) [1]. Kagermann et al. definierten bereits im Jahre 2013 die CPS als Systeme, welche die Prozesse von Produktion, Logistik, Engineering, Koordination und Management sowie die Internetdienste umfassen. Das System verfügt über Sensoren, die unmittelbar physikalische Daten erfassen, und über Aktoren, die auf physikalische Vorgänge einwirken. Die Bestandteile des Systems sind durch digitale Netze untereinander verbunden und nutzen weltweit verfügbare Daten und Dienste für ihre Ausführung. CPS sind offene soziotechnische Systeme und verfügen über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen [47].

4.1 Industrie 4.0

Industrie 4.0 greift entlang aller Stufen der Wertschöpfungskette ein. Sie funktioniert auf Grundlage von Technologien und Geräten, die durch virtuelle Computermodelle miteinander interagieren. Das Ziel ist, durch Optimierung eine Steigerung von Effizienz und Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Industrie 4.0 verwendet zur Entwicklung und Applikation der notwendigen Methoden den Einsatz und die Verknüpfung von CPS, Internet der Dinge (IdD – im Englischen als Internet of Things (IoT) bezeichnet), Big Data, Advanced Analytics, Generative Fertigung, Autonome Robotics, Cloud-Computing und Augmented Reality (AR) [38]. Die im Folgenden definierten Begriffe sollen das Verständnis der nächsten Kapitel unterstützen.

Advanced Analytics

Die Business Intelligence (BI), welche Grundlage der Advanced Analytics (auch Business Analy-

tics genannt) ist, beschäftigt sich mit der systematischen Analyse (durch Sammlung, Auswertung und Darstellung) von digitalen Daten. Die Advanced Analytics erweitern das Konzept der BI durch die Analyse der Vergangenheit und die Vorhersage der Zukunft. Sie unterstützt die Entscheidungsfindung mit Hilfe der Erkenntnis von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen und empfiehlt die Setzung sinnvoller Maßnahmen [38].

Augmented Reality (AR)

Augmented Reality beschreibt die Erweiterung der realen Welt mit kontextsensitiven Zusatzinformationen in Form von virtuellen Daten in Echtzeit. Die Anreicherung der real aktuellen Situation durch zusätzliche Informationen, beispielsweise Prozess- und Bewegungsdaten, erfolgt über Hilfsmittel wie z. B. eine AR-Brille. AR-Lösungen werden vor allem für Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen sowie zur Steigerung der Effizienz des Kundenerfahrungsmanagements eingesetzt [38].

Big Data

Die Sammlung, Speicherung, Verarbeitung und Auswertung sowie das Kommunizieren und die Bereitstellung von Daten mit hohem Volumen, hoher Geschwindigkeit, hoher Mannigfaltigkeit und hoher Unsicherheit wird als Big Data bezeichnet. Big Data verfolgt das Ziel, die Welt mit Hilfe umfangreicher Daten besser nachvollziehen zu können und durch datengestützte Analysen und Aussagen fundierte Entscheidungen treffen zu können [38].

Cloud Computing

Die Speicherung, Analyse und Verwaltung von Daten sowie die Bereitstellung von Diensten, Rechenleistungen oder informationstechnologischen (IT-)Anwendungen mittels einer virtualisierten IT-Ressource ist eine Cloud. Ihre Dienste werden normalerweise über das Internet zur Verfügung gestellt und ihre Verwaltung wird durch den Serviceanbieter organisiert. Cloud Computing gewährleistet eine bedarfsgerechte Versorgung von Daten und Services über das Internet bei einer hohen IT-Sicherheit und Qualität [38].

Internet der Dinge – Internet of Things (IoT)

Die Vernetzung von IT-Systemen mit globalen Subsystemen, Prozessen, Objekten, Lieferanten und Kunden wird als Internet der Dinge bezeichnet. Die verknüpften Elemente kommunizieren über das Internet miteinander und mit der Schnittstelle Mensch. Der Begriff Internet der Dienste erweitert den Ausdruck IdD um die Dienstleistungen, welche zur Unterstützung der Teilnehmer angeboten werden [38].

Virtual Reality (VR)

Eine virtuelle Umgebung, in der menschliche User mit dreidimensional virtuellen Objekten in Echtzeit agieren können und diese realitätsnah sehen und hören können, wird als Virtual Reality definiert. Der Nutzer kann die digitale dreidimensionale Welt durch Hilfsmittel wie beispielsweise einer VR-Brille erleben [38].

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass das Zeitalter Industrie 4.0 eine Eigenständigkeit der Produkte anstrebt, welche in Form von intelligenten Objekten (smart objects) Maschinen und

Anlagen selbstständig über Arbeits- und Prozessschritte informieren. Es erfolgt eine Ablösung alter starrer, auf zentralen Entscheidungsmechanismen beruhender Produktionsstrukturen durch autonom arbeitende, selbststeuernde, wissens- und sensorbasierte Produktionssysteme.

RFID (Radiofrequenzidentifikation)-Chips ermöglichen die Speicherung von Informationen und somit die Weitergabe von Daten an Computer, welche die Informationen auslesen und über das Internet weiterleiten können. Diese Methode ist Basis für die Kommunikation intelligenter Objekte untereinander. Dieser Prozess wird auch unter dem Begriff „Internet der Dinge“ (IdD) beschrieben. Grundlage dafür sind Technologien zur Umgebungswahrnehmung, Datenspeicherung, Kommunikation und zum autonomen Handeln der Gegenstände, Räume und Maschinen. RFID-Systeme, bestehend aus einem Lesegerät und einem Transponder (d.h. einem Chip mit Antenne), lesen Daten berührungslos und ohne Sichtkontakt aus und identifizieren den Gegenstand/das Gerät, auf welchem sie situiert sind. Durch in das Element integrierte Sensoren können RFID-Systeme Sensordaten automatisch aktualisieren [1, 47].

4.1.1 Digitale Transformation der Wertschöpfung

Die Digitalisierung begleitet den Industriesektor über alle Phasen der Wertschöpfung. Kennzeichnend für die digitale Transformation der Produktionssysteme sind

- die hohe Individualisierung der Produkte,
- die stark flexibilisierte Serienproduktion,
- die Integration von Kunden und Partnern in die Wertschöpfungskette und
- die automatische Synchronisation und Optimierung der Daten- und Informationssätze untereinander [1].

Maßnahmen wie die Substitution physischer Produkte durch digitale Dienstleistungen und der Austausch physischer und menschlicher Ressourcen durch intelligente maschinelle Systeme dienen der Effizienz- und Produktivitätssteigerung, Kostensenkung sowie der Verbesserung logistischer Kennzahlen. Digitale Daten und Informationen sind orts- und zeitunabhängig und nur durch Medien gebunden. Sie benötigen für ihre Erfassung und Verarbeitung eine Hardware- und Softwareinfrastruktur. Die Wertschöpfung der Produkte erfährt einen Wandel durch die Weiterentwicklung und den höheren Einsatz von

- Smarte Komponenten (z.B. Software, intelligente Algorithmen),
- Individualisierte Dienstleistungen und
- Offene Netzwerke (Plattformen, IoT-Anwendungen, Mensch-Maschine-Verknüpfungen) [38].

Abbildung 4.1 veranschaulicht die wichtigsten Prozessschritte und -objekte der digitalen Transformation.

Die Digitalisierung der Wertschöpfungskette bedarf einer strategischen Herangehensweise und erfordert Kompetenzen der Führungskräfte und der Mitarbeiter in den Bereichen der neuen

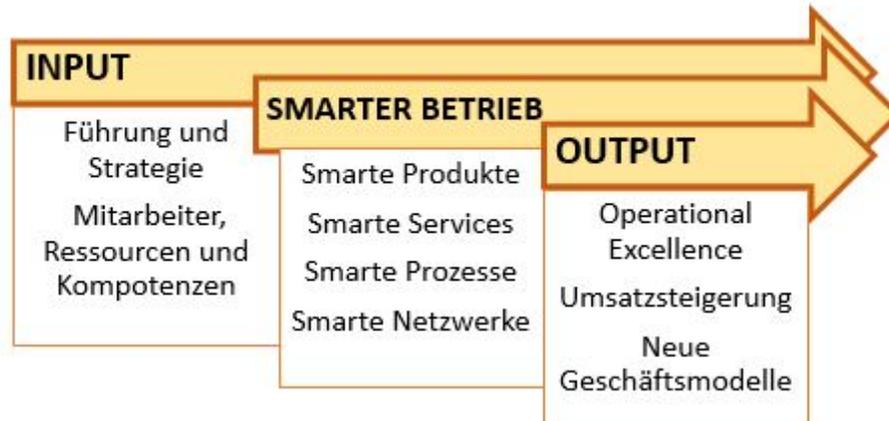


Abb. 4.1: Digitale Transformation nach Jodlbauer; adaptiert nach [38]

Technologien wie IoT, CPS, Big Data und Advanced Analytics. Neben den Anforderungen an das Personal ändern sich auch die Strukturen innerhalb des Arbeitsumfeldes und der allgemeinen Unternehmenskultur. Kernelement eines smarten Betriebs ist ein dynamisches Wertschöpfungsnetzwerk, bestehend aus smarten Produkten, Prozessen, Services und Netzwerken, die mit Hilfe maschineller Intelligenz aufeinander abgestimmt werden und somit zielorientiert arbeiten. Grundlage dafür ist ein allgemein zugängliches durchgängiges digitales Modell, das Kommunikation, Koordination, Automatisierung, Simulation und Entscheidungsfindung für alle Beteiligten Produkte, Prozesse, Services und Netzwerke übernimmt. Ziele der digitalen Transformation der Wertschöpfungskette sind das Erreichen höherer Leistungen bei geringerem Aufwand (Operational Excellence) sowie die allgemeine Umsatzerhöhung durch die Erschließung neuer Märkte und die Gewinnung und Bindung neuer Kunden. Die Abwicklung der neuen digitalisierten Unternehmensmethoden verändert die bisher bestehenden Strukturen. Sie führt zu neuen Geschäftsmodellen, die vor allem durch die Integration von Kunden und Usern, der Datenverwertung und der Steigerung der Dienstleistungsorientierung geprägt werden [38].

Abbildung 4.2 zeigt schematisch die Verknüpfung physischer und digitaler Systeme, wie es in einer smarten Fabrik der Zukunft sein könnte. Solch eine Fabrikationsstätte steht in direktem Austausch mit dem Kunden, welcher über das Internet sein individualisiertes Produkt bestellt. Mit Eingang der Bestellung werden die für die Fertigung erforderlichen Prozesse und Materialien automatisch kontaktiert, reserviert und aktiviert. Allfällige Verzögerungen werden durch die Suche alternativer Wertschöpfungsketten vermieden und bei Eintritt dem Kunden durch das Netzwerk selbstständig mitgeteilt. Die am Prozess beteiligten Anlagen und Elemente tauschen laufend automatisch untereinander Daten aus, organisieren ihre Abläufe und melden ihre Wartungs- und Instandhaltungsnotwendigkeiten [1].

4.1.2 Chancen und Risiken

Industrie 4.0 ist durch den Echtzeit-Informationsaustausch gekennzeichnet und beruht auf der Informatisierung auf Basis von Cyber-Physischen Systemen. Diese ermöglichen neue Technologien, wie beispielsweise Smartphones und Tablets oder Sensoren und Aktoren in eingebetteten

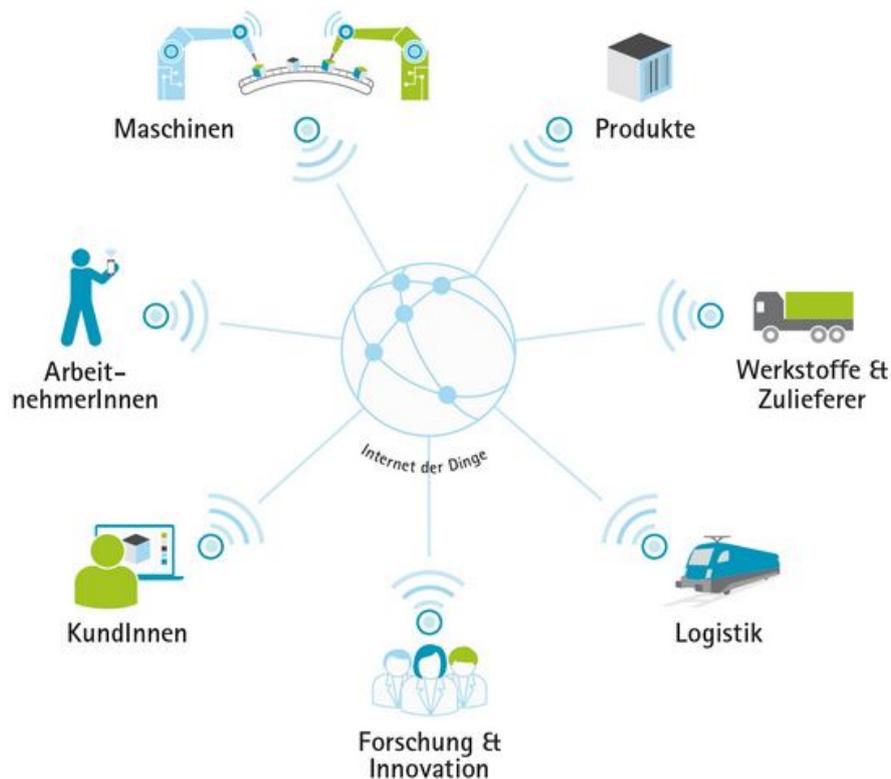


Abb. 4.2: Vernetzung physischer und digitaler Systeme – Industrie 4.0 [18]

Steuerungen. Die eingeführte Digitalisierung verspricht eine bisher nie gesehene Flexibilität und Agilität der Industrie, welche folgende Ziele durch ihre Implementierung in allen Arbeitsprozessen umsetzen soll:

- Bestehen weniger Medienbrüche durch den Zugang auf durchgängige Informationen aus allen Planungs- und Fertigungsbereichen,
- Optimierte Produktivität und höherer Produktivitätsflexibilität sowie kürzere Durchlaufzeiten,
- Hohes Anpassungsvermögen an individuelle Kundenanforderungen,
- Individuelle Serienproduktion bis zur Losgröße 1 und
- Höhere Planungsqualität auf Grund von echtzeitnahen Daten.

Der Begriff der Flexibilität in der Produktion umfasst verschiedene Aspekte der Wertschöpfungskette. Die gesteigerte Flexibilität in beispielsweise räumlicher, gebäudetechnischer oder personeller Hinsicht verspricht dem Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil. Flexibilität in Industrie 4.0 befasst sich unter anderem mit der zeitlichen Flexibilität in Form der adaptierbaren Echtzeit-Planung oder der Typen- und Variantenflexibilität, welche die Umsetzung verschiedenster Prozess- und Lieferketten ermöglicht. Des Weiteren wird die Realisation von kurzfristigen Änderungen vor Produktionsbeginn ermöglicht [19].

Die Digitalisierung weist neben zahlreichen Chancen selbstverständlich auch einige Risiken auf. Wesentliche Probleme können bei der Verfügbarkeit und Anschaffung der erforderlichen Technologie sowie der Vernetzung der unterschiedlichen Produktionsstätten miteinander auftreten. Die räumliche Verknüpfung erfordert eine Standardisierung der gesamten Wertschöpfungskette zur Gewährleistung der Beherrschbarkeit des komplexen Gesamtsystems. Die Implementierung eines intelligenten autonom handelnden Produktionssystems birgt die Gefahr, dass das Prozess- und Systemverständnis der Mitarbeiter degeneriert und sie ihre Handlungsfähigkeit im Produktionssystem verlieren.

Die Digitalisierung erfordert für die operative Umsetzung die Schaffung struktureller und infrastruktureller Voraussetzungen sowie gewisse Fähigkeiten und Fertigkeiten des Menschen für das Verständnis und die Abwicklung der Prozesse. Sie begegnet rechtlichen Herausforderungen wie beispielsweise den Anforderungen an den Arbeits- und Datenschutz. Ein weiteres Handlungsfeld betrifft die Normung und Standardisierung zur Schaffung von Grundlagen für Industrie 4.0. Zuletzt darf nicht auf den Schutz der digitalisierten Prozesse durch die Vernetzung von Maschinen und Anlagen sowie die Überwachung und die Steuerung von industriellen Prozessen vor Spionage und Sabotage vergessen werden [2].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Herstellungsprozesse im Digitalisierungszeitalter nachhaltig verbessert werden. Experten sprechen von einem Quantensprung innerhalb der Produktion, welcher zahlreiche Chancen bietet. Im Zentrum von Industrie 4.0 steht eine dynamische Geschäftsprozess-Gestaltung, welche durch Technologien wie CPS verkürzte Vorlauf- und Entwicklungszeiten bei gleichzeitig hoher Flexibilität im Hinblick auf Veränderungen wie z.B. dem Ausfall von Zulieferern ermöglicht. Basis für schnelle und flexible Entscheidungsfindung sowie für die Optimierung in Planung und Produktion ist die durchgehende digitale Transparenz in Echtzeit. Die Rentabilität bei der Produktion von kleinen Stückanzahlen sowie die Implementierung kurzfristiger Kundenwünsche in der Planungs- oder Produktionsphase ermöglichen die Individualisierung der Produkte durch den Kunden. Es erfolgt eine Einsparung hinsichtlich des Ressourcen- und Energieverbrauchs sowie der Emissionen über alle Prozessphasen wie auch eine Vorhersage und Optimierung der zu erwartenden Wartungs- und Reparaturarbeiten.

Die Digitalisierung bringt neue Laufbahnmodelle mit sich, die durch die Interaktion zwischen Mensch und virtuell technischem System eine demographieorientierte Arbeitsgestaltung ermöglichen sollen. Des Weiteren wird durch eine höhere Flexibilität der Arbeitsorganisation eine bessere Balance zwischen Arbeits- und Privatleben angestrebt [1].

4.2 Digitales Planen, Bauen und Betreiben

Das Zeitalter der digitalen Transformation hat auch die Baubranche erfasst. Die Digitalisierung der Wertschöpfungskette beeinflusst die Gesamtheit der Prozesse am Bau. Digitales Planen, Bauen und Betreiben fordert alle in der Branche tätigen Berufsfelder, wie z.B. Planer, Ausführende und Erhalter, in den Bereichen Automatisierung und Digitalisierung zu investieren und umzuschulen. Neue digitale Innovationen, wie beispielsweise der 3D-Beton-Druck oder der Einsatz von Robotern, revolutionieren die Arbeiten am Bau und verknüpfen die Arbeit der Bauingenieure stärker mit den Bereichen des Maschinenbaus und der Informationstechnologie. Der zunehmende Digitalisierungsgrad verfolgt das Ziel, digitale Planungsdaten für die Baustelle nutzbar zu machen sowie den gesamten Projektlebenszyklus von Planen, Bauen und Betreiben in einem gesamtheitlichen, digitalen Gebäude- bzw. Anlagenmodell darzustellen. Das Ergebnis

der Digitalisierung ist eine optimierte Planung und Ausführung sowie effiziente Erhaltung und Nutzung des Objektes [11, 32].

4.2.1 Aspekte der Digitalisierung entlang der Wertschöpfung im Bauwesen

Ein wichtiger Impulsgeber für die Digitalisierung der Baubranche ist BIM (Building Information Modeling). Unter BIM wird eine integrative Arbeitsmethode verstanden, welche die Abwicklung eines Projektes von der Planungsphase bis inklusive der Betreuung des Objektes begleitet. Sie basiert auf Grundlage eines digitalen Bauwerksmodells, welches in Form einer komplexen Datenbank geometrische und graphische Daten, für alle Projektbeteiligten offen zugänglich, enthält [31].

BIM ist jedoch nur eine Entwicklung, welche die Effizienz aller Prozesse entlang der Wertschöpfungskette in der Bauwirtschaft verbessern sollen. Folgende vier Aspekte werden als vier Hebel der digitalen Transformation verstanden:

- Digitale Daten,
- Automation,
- Netzwerke,
- Digitaler Zugang.

Der Aspekt digitale Daten beschreibt die elektronische Sammlung, Bewertung und Analyse von Daten. Dabei wird das Ziel verfolgt, über alle Stufen der Wertschöpfungskette einen fortschreitenden Wissenszuwachs zu generieren und zu nutzen. Die Automation meint den Einsatz neuer Technologien, welche autonom arbeitende, sich selbst organisierende Systeme schaffen. Der Hebel Netzwerke umfasst die Auswirkung der Vernetzung und Synchronisation bisher voneinander getrennter Aktivitäten. Unter dem digitalen Zugang wird das Potenzial eines mobilen Zugriffs auf das Internet und interne Netze verstanden. Die Umsetzung der Digitalisierung mittels dieser Teilbereiche transformiert die Wertschöpfungskette der Bauindustrie. Diese kann, beispielsweise wie im wissenschaftlichen Artikel [59] nach Roland Berger, in die folgenden Abschnitte gegliedert werden:

- Logistik: Warenfluss, Lagerung und Transport,
- Beschaffung: Einkauf, Lieferantenmanagement und -bewertung,
- Produktion/Bauausführung: Produktion, Qualitätsmanagement,
- Marketing/Vertrieb: Verkauf/Händlermanagement,
- After Sales/Endkundenmarketing: Pull-Marketing, Nutzersupport und Serviceleistungen.

Die Digitalisierung weist ein hohes Potenzial der Produktivitätssteigerung für die Bauindustrie auf, jedoch erst einen geringen Umsetzungsgrad. Abbildung 4.3 zeigt in Form einer Matrix die Vielfalt der digitalen Möglichkeiten, ihren Einfluss und Umsetzungsgrad. Viele Applikationen

befinden sich derzeit in der Entwicklungsphase oder werden gerade in Form von Pilotprojekten getestet [59].

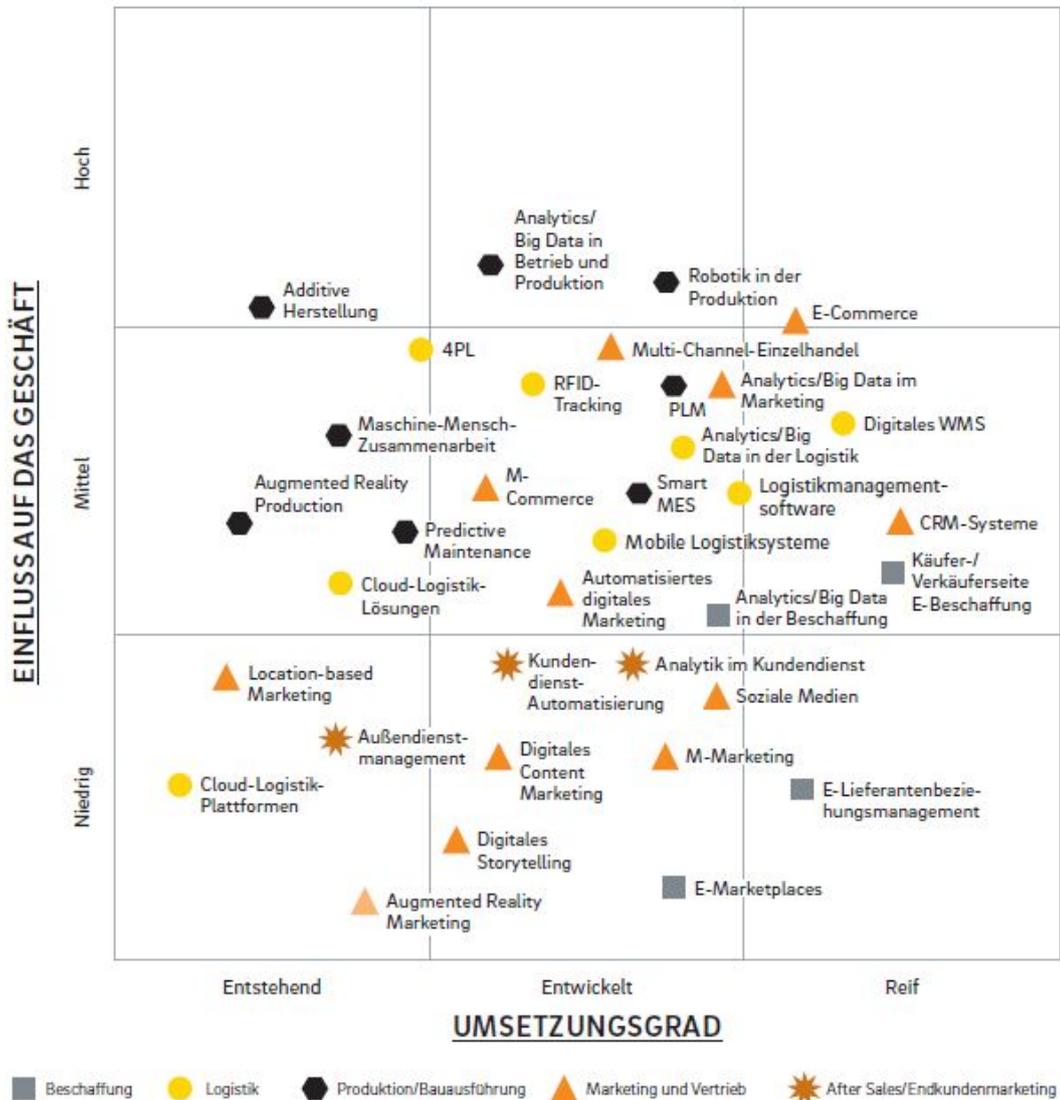


Abb. 4.3: Trendradar der Bauindustrie [59]

4.2.2 Handlungsempfehlungen

Das digitale Bauprojekt hat den Vorteil einer hohen Kosten-, Termin- und Qualitätssicherheit bei minimiertem Projektrisiko. Die Umsetzung mittels eines digitalisierten Lebenszyklus-Modells des Projektes benötigt eine neue Betrachtungs- und Herangehensweise aller Projektbeteiligten über den gesamten Prozess von Planen, Bauen und Betreiben. Der Nutzen dieses neuen digitalisierten Ansatzes der Baubranche kommt der gesamten Volkswirtschaft zu Gute. Die Realisation braucht somit eine gut durchdachte Strategie, welche Grundlagen und Handlungsempfehlungen enthält. Die folgenden Handlungsempfehlungen wurden in Form von Arbeitskreisen, Forschungsvorhaben,

Pilotprojekten und diversen Fachgesprächen erarbeitet und stellen den derzeitigen Wissenstand dar. Sie untergliedern sich in die Bereiche:

- Schaffen rechtlicher und politischer Rahmenbedingungen,
- Definition neuer Prozesse in Unternehmen und Projekten,
- Digitale AVVA (Ausschreibung, Vergabe, Vertrag, Abrechnung),
- Digitale Tools und Softwarelösungen,
- Forschung und Entwicklung [31].

Rechtliche und politische Rahmenbedingungen

Die Umsetzung des digitalen Planens, Bauens und Betriebens benötigt eine Reihe an rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen und Grundlagen auf nationaler und internationaler Ebene. Die Digitalisierung ist ein globales Thema, das weit über Österreich und Europa hinaus seine Wirkungen auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette zeigt. Eine effektive Steuerung und Realisation der Initiative zur Digitalisierung braucht Kommunikation, Abstimmung und Anpassung zwischen den Ländern. Es benötigt nationale und internationale Standards, zahlreiche Gesetze zur Festlegung der neuen Anforderungen sowie einen konkreten Stufenplan mit verbindlichen Zielsetzungen und Zeitrahmen. Die Digitalisierung der Bauprozesse zieht eine Reihe von neuen Berufsfeldern mit sich, welche einen national abgestimmten Ausbildungsplan erfordern. Des Weiteren müssen die bisher bestehenden kleinen und mittleren Unternehmen Unterstützung in ihrer Umrüstung und Weiterbildung erfahren. Es muss auch die Entwicklung einer nationalen Förderstrategie für Start-ups im Bereich der Digitalisierung der Bauwirtschaft stattfinden [31].

Neue Prozesse in Unternehmen und Projekten

Die Abwicklung von Bauprojekten wird mit der Digitalisierung grundlegend verändert. Erstmals findet eine gesamtheitliche, systematische Betrachtung des Lebenszyklus statt, welche die Einbeziehung aller Projektbeteiligten von Anfang an erfordert. Ein innovativer, interdisziplinärer Ansatz der Projektkonzeption ist nötig, welcher Mensch-Maschinen-Interaktionen berücksichtigt. Der Planungshorizont umfasst neben den bisherigen Fachplanungen mit zunehmender Bedeutung der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) auch eine Analyse möglicher zukünftiger, abgeänderter Nutzungen des Bauprojektes. Die digitale Abwicklung von Bauprojekten benötigt eine hohe Flexibilität und schafft neue Prozesse sowie Geschäftsmodelle. Technologische Entwicklungen wie den Einsatz von Mess-Steuerungs-Regeltechnik (MSR) und die Implementierung von autonomen Prozessen, wie beispielsweise den Einsatz von Robotern und Drohnen, werden in das ganzheitliche Prozessmodell eingegliedert. Die Verwendung von MSR dient der laufenden Gewinnung von Daten zur Verbesserung der Erkenntnisse für die Optimierung des Lebenszyklus. Der Ablauf und Nutzen dieser Datenaufbereitung wird in Zukunft durch gesetzliche Regelungen definiert werden müssen. Die praktische Umsetzung der neuen Prozesse und deren Konsequenzen müssen in den Unternehmen schrittweise in Form von Pilotprojekten getestet und evaluiert werden. Die gewonnenen Erfahrungen müssen transparent zugänglich sein [31].

Digitale AVVA – Ausschreibung, Vergabe, Vertrag, Abrechnung

Der digitale AVVA-Prozess löst durch eine ausführungsfähige Planung vor Ausschreibung und

Baubeginn die derzeitige baubegleitende Planung ab. Grundlage dafür sind BIM-Modelle mit zugänglichen Datenbanken und bis ins Detail ausgearbeiteten und optimierten Planungs-, Bau- und Betreiberszenarien. Das optimierte digitale Projektmodell bietet eine hohe Kosten-, Termin- und Qualitätssicherheit. Es wird in Zukunft in der Ausschreibung des Auftraggebers vom Planer bestellt werden. Die Anwendung der derzeit gebräuchlichen Standardleistungsverzeichnisse und -beschreibungen wird durch den Standard der digitalen Projektmodelle nicht mehr zweckmäßig sein. Die Ausschreibung muss weiterhin wettberwebsneutral bleiben und darf keine produkt- oder firmenspezifischen Elemente enthalten. Neue digitale Ausschreibungsmodelle werden eine vordefinierte, genormte Datenstruktur, wie beispielsweise die ÖNORM oder die IFC (Industry Foundation Classes), aufweisen und sollen vollständig durch ein elektronisches Lesegerät verarbeitet werden können.

Der Bieter folgt dieser Datenstruktur der digitalen Ausschreibung bei der Erstellung seines digitalen Angebots. Dieser Prozess benötigt elektronisch zugängliche Produktkataloge wie sie z.B. derzeit bereits in Form von Product Rooms bei der internationalen Organisation Building Smart verwendet werden. Building Smart ist eine Dachorganisation, welche das Austauschformat IFC für den Datenaustausch bei BIM-Prozessen im Bauwesen definiert. Das digitale Angebot muss weiterhin den Bieterschutz gewährleisten.

Nach Einlangen der digitalen Angebote werden diese durch den Auftraggeber gereiht und unter Berücksichtigung des digitalen Ausschreibungsmodells geprüft. Die digitale Vergabe wird neue Vergabekriterien und Berechnungsmethoden benötigen, da die bisherige phasenbezogene Vergabep Praxis in Zukunft durch eine ganzheitliche Optimierung der Lebenszyklus-Kosten verdrängt wird. Der Vergabeprozess wird somit an Komplexität und Mehrschichtigkeit gewinnen. Auftraggeber, ausführende Unternehmen und spätere Betreiber müssen bereits in einem frühen Planungsstadium miteinander kommunizieren und kooperieren. Diese durchgängige Digitalisierung der Planung, der Ausführung und des Betriebs wirft die Frage auf, ob in Zukunft Alternativangebote des Bieters erlaubt sein werden und wie man sie verarbeitet.

Nach Erteilung des Zuschlags an den Bieter mit dem passendsten digitalen Modell, gilt dieses Vertragsmodell verbindlich und ist Basis für die weitere Abwicklung, die Dokumentation, das Berichtswesen sowie die letztendliche Abrechnung und das darauffolgende Controlling. Da das digitale Vertragsmodell bereits alle Prozesse der Planung, Ausführung und des Betriebes enthält, trägt die digitale AVVA wesentlich zur Verdrängung des derzeit gebräuchlichen Nachtragsmanagements bei. Der digitale Vertrag wird die bisher bestehenden einschlägigen Werkvertragsnormen wandeln und bedingt die Entwicklung neuer digital kompatibler Vertrags- und Vergütungsmodelle. Die Abrechnung und Administration des digitalen Projekts erfolgt genauso vollständig elektronisch. Dafür ist eine digitale, baubegleitende Überwachung und Erfassung des Fortschritts durch neue autonom arbeitende Technologien (z.B. Drohnen) notwendig. Die derzeit bestehenden Abrechnungsregeln werden durch digitale Abrechnungsnormen ersetzt, welche auf eine Echtzeitdatenerfassung der Baustelle aufbauen. Basis für die digitale Abrechnung sind Werkzeuge für die Echtzeitdatenerfassung, funktionierende Datenschnittstellen und Transparenz zwischen allen Projektbeteiligten.

Durch eine laufende digitale Dokumentation und Anpassung während der Abwicklung wird das festgelegt Vertragsmodell in ein „As-built-Model“ verwandelt, welches als Grundlage für das Gebäudemanagement herangezogen wird. Das den Betreiber übergebene „As-built-Model“ muss eine Reihe an definierten Qualitätsstandard erfüllen [31]. Hinsichtlich der Terminologie von BIM wird auf das Kapitel 4.2.4 verwiesen.

Digitale Tools und Softwarelösungen

Die nationale und internationale Abwicklung digitaler Bauprojekte benötigt einen einheitlichen

Rahmen (Modellierleitfaden) hinsichtlich von Terminologie, Rollen- und Leistungsbildern. Für eine erfolgreiche Umsetzung müssen einheitliche Grundregeln erstellt werden, sodass auf Grundlage gemeinsamer Planungsgrundlagen ein normiertes Modell entstehen kann. Dieses Modell muss unabhängig vom Format des Herstellers in andere Software importiert und nach genormten Prüfroutinen analysiert werden können. Die Digitalisierung des Bauprojektes erfordert durchgängige Datenketten für den verlustfreien Datenaustausch zwischen allen Projektbeteiligten. Die Standardisierung von Datenschnittstellen erfolgt derzeit auf internationaler Ebene durch die Dachorganisation Building Smart durch IFC (Industry Foundation Classes), welche offene Standards im Bauwesen zur digitalen Beschreibung von Gebäudemodellen darstellen. Die Weiterentwicklung und Festlegung von offenen Datenformaten für die nationale Anwendung des zukünftigen digitalen AVVA-Prozesses soll von möglichst vielen einschlägigen österreichischen Unternehmen begleitet und geformt werden. Es herrscht derzeit noch eine hohe Diskrepanz zwischen dem derzeitigen Wissensstand der IT und den für die Umsetzung der digitalen Ziele erforderlichen Maßnahmen vor. Daher ist ein Austausch zwischen Leuten aus dem Bauwesen und der IT erforderlich. Im Zuge dessen muss die Bauwirtschaft konkrete Forderungen der technischen Umsetzung an die IT stellen und die Entwicklung begleiten, sodass der Bezug zu den tatsächlichen Bauprozessen erhalten bleibt.

Die Abkürzung AIA steht für Auftraggeber-Informationen-Anforderung und beschreibt die Qualität der Anforderungen von Seiten des Auftraggebers. In gleicher Form sind die Anforderungen der Betreiber mittels Betreiber-Informationen-Anforderungen (BIA) zu formulieren. In Form von Pilotprojekten getestete und bewährte AIAs und BIAs sollen ebenso wie BIM-Abwicklungspläne und Organisationshandbücher zu BIM-Projekten gesammelt und herausgegeben werden. Sie können als Grundlage folgender BIM-Projekte dienen und Basis für in Zukunft formulierte Richtlinien und Normen sein. Die österreichische Bautechnik-Vereinigung wird mit Ende 2018 eine Richtlinie mit dem Titel „BIM in der Praxis“ veröffentlichen [31].

Forschung und Entwicklung

Für die erfolgreiche sukzessive Umsetzung der Digitalisierung von Planen, Bauen und Betreiben in Österreich müssen innovative Produkte und Prozesse schrittweise durch Musteranwendungen erprobt und mittels Pilotprojekten erforscht werden. Wesentlich dabei ist ein wissenschaftlicher Rahmen mit inhaltlich und zeitlich abgegrenzten Forschungs- und Pilotprojekten, die klare Vorgaben enthalten. Ein nationaler Forschungsplan setzt Schwerpunkte, legt Prioritäten fest, initiiert und begleitet Forschungsprogramme. Die gewonnenen Kenntnisse müssen strukturiert dokumentiert und transparent gemacht werden. Ein offener Austausch der Ergebnisse und Erfahrungen stärkt die Beteiligung und beschleunigt den Entwicklungsprozess [31].

4.2.3 BIM – Vom digitalen Zwilling zum realen Bauwerk

BIM (Building Information Modeling) steht im Fokus der Digitalisierung der Baubranche. BIM ist eine innovative, interdisziplinäre Arbeitsmethode, welche mittels eines dreidimensionalen digitalen Bauwerksmodells eine lebenszyklische Analyse eines Bauprojektes ermöglicht. Das 3D-Bauwerksmodell begleitet das Projekt von der Planung über die Ausführung und den Betrieb bis zum Abriss. BIM unterscheidet sich von der bisherigen 3D-Modellierung durch die Verknüpfung des BIM-Modells mit den relevanten Projektinformationen. BIM-Modelle enthalten neben geometrischen Daten auch Informationen zu Terminen und Ressourcen wie beispielsweise das Material. Es handelt sich um eine transparente Datenplattform, die allen Projektbeteiligten zugänglich

ist. Die Eingabe der Informationen nach Art, Umfang und Zeitpunkt sowie deren Regulierung hinsichtlich Zugriffs- und Bearbeitungsrecht müssen frühzeitig in einem BIM-Abwicklungsplan definiert werden. Das digitale Modell stellt einen dynamischen Informationsträger dar, der sich im Zuge des Fortschritts laufend aktualisiert und optimiert. Für eine erfolgreiche Durchführung sind Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen den Projektpartnern notwendig [35, 62].

Die Schriftenreihe der österreichischen Plattform 4.0 definiert eine Reihe an Begriffen in Zusammenhang mit BIM und Digitalisierung. BIM wird dabei als eine Methode der transdisziplinären Planungsorganisation und -dokumentation bezeichnet. Es wird zwischen Closed BIM und Open BIM unterschieden. Closed BIM verwendet eine einheitliche Softwarelösung und eine proprietäre Schnittstelle innerhalb eines Projektes für den modell- und informationsbasierten Datenaustausch. Open BIM beschreibt den modell- und informationsbasierten Datenaustausch zwischen verschiedenen Disziplinen. Es werden dabei verschiedene Softwarelösungen durch eine einheitliche offene Schnittstelle und auf Basis einer einheitlichen Datenstruktur verwendet. Des Weiteren wird zwischen mehreren Dimensionen im BIM-Modell unterschieden. 3D bezeichnet ein realitätsnahes, digitales Abbild des Bauwerks. 4D erweitert das Modell um den Faktor Zeit als vierte Dimension. Die Abkürzung 5D wird bei der Erweiterung des digitalen Modells um die fünfte Dimension Kosten verwendet. 6D vollendet das digitale Modell durch die Eingabe von Informationen zur Nachhaltigkeit eines Bauwerks über seinen Lebenszyklus betrachtet. Die sechste Dimension umfasst vor allem den Betrieb des Bauwerks im Zusammenhang mit Gebäudemanagement (Facility Management). Im Kontext dazu wird der Begriff Facility Information Management (FIM) geprägt, welcher den Prozess der bauelementorientierten Gebäudeverwaltung auf Basis des Informationsstandes der BIM-Prozesse beschreibt [44].

BIM ist eine integrale Datenstruktur, welche das Bauprojekt über die Phasen Planen, Bauen, Betreiben und Erhalten digital begleitet und leitet. Abbildung 4.4 zeigt die Prozessschritte, welche in den verschiedenen Abwicklungsphasen durch BIM vereinigt und geführt werden. BIM ermöglicht einen durchgängigen Informationsfluss über alle Projektphasen und eine Nutzung der gewonnenen Daten im Kreislauf des digitalen Systems. BIM weist eine Reihe an Vorteilen auf, wie unter anderem:

- Statische, bauphysikalische und energetische Optimierung,
- Mengen- bzw. Stücklisten, Massen und Kosten können direkt aus dem 3D-Modell gewonnen werden und werden bei Änderungen aktualisiert,
- Integrierte Gesamtplanung aller Gewerke wird im virtuellen Modell auf Kollisionen und Normenkonformität geprüft,
- Terminplanung kann durch die Dimension Zeit in der 4D-Planung integriert werden,
- Variierbare Eingangsdaten (Mengen und Kosten) ermöglichen eine Kostenplanung des Gesamtmodells (Variantenstudie inklusive Kosten möglich),
- Virtuelle Baustellenbesichtigungen verbessern die Kommunikation unter den Projektbeteiligten,
- Simulationen ermöglichen die Vorwegnahme von Baustellenabläufen oder Nutzungsszenarien (Lebenszykluskosten-Analyse),

- Begleitende digitale Dokumentation zu jedem Projektstand und über alle Gewerke,
- Konsistente Datenhaltung ermöglicht eine Erhöhung des Automatisierungsgrades,
- Sensoren in den Gebäudeelementen geben Auskunft über anstehende Wartungs- oder Reparaturarbeiten [10, 22].

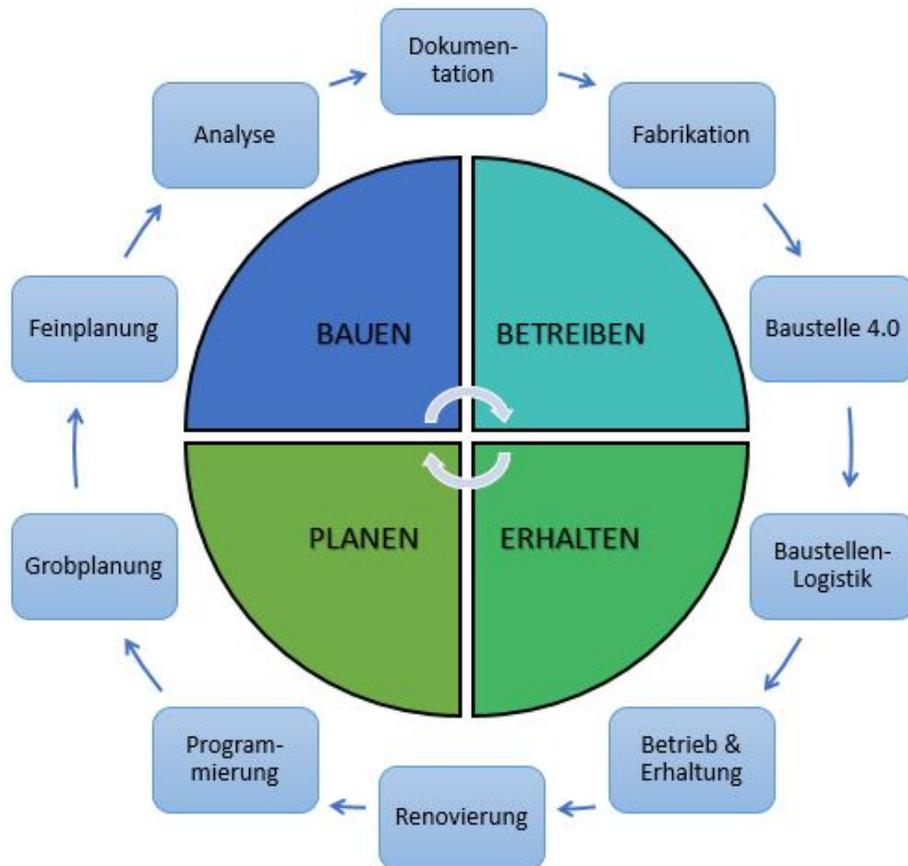


Abb. 4.4: BIM als integrale Datenstruktur über alle Abwicklungsphasen, adaptiert nach [67]

4.2.4 Terminologie BIM

Die Digitalisierung betrifft jeden Einzelnen von uns in unterschiedlicher Ausprägung. Die digitalisierte Arbeitsmethode BIM bringt mit ihrer Umsetzung einer lebenszyklischen Betrachtung eines Bauwerks einen großen Umschwung in der Abwicklung von Tunnelbauprojekten. Die reale Umsetzung von BIM in der Arbeitswelt benötigt klar vorgegebene Arbeitsstrukturen, definierte Schnittstellen und Aufgabenverteilungen und eine Informationstechnologie (IT), deren Entwicklungsstand den technischen Anforderungen gerecht wird.

Kapitel 4.2.3 führt die Begrifflichkeiten und Methode von BIM ein. Im Folgenden werden die derzeit diskutierten Begriffe der digitalen Abwicklung von BIM, die dadurch neu geschaffenen Rollenbilder und das Reglement der Aufgabenbeschreibung genannt und erklärt. Die Terminologie wurde im Rahmen der Initiative Plattform 4.0 in Kooperation von Österreich, Deutschland, Slowenien und Schweiz festgelegt und beschreibt den derzeit in die Realität umgesetzten Stand

der Technik.

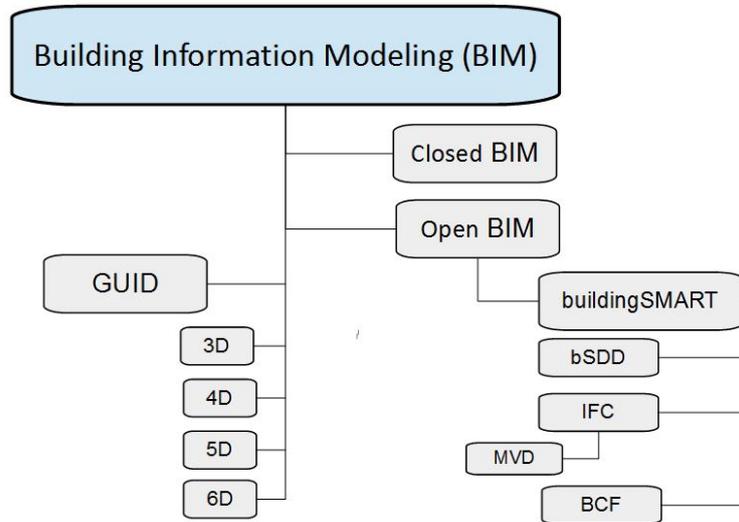


Abb. 4.5: Basisbegriffe BIM, adaptiert nach [44]

Abbildung 4.5 zeigt die im Zusammenhang mit BIM verwendeten Basisbegriffe. Diese stehen vor allem mit den IT-Lösungen bezüglich der Implementation von BIM in der realen Arbeitswelt in Beziehung.

Closed BIM

Closed BIM verwendet eine einheitliche Softwarelösung und eine proprietäre Schnittstelle innerhalb eines Projektes für den modell- und informationsbasierten Datenaustausch [44].

Open BIM

Open BIM beschreibt den modell- und informationsbasierten Datenaustausch zwischen verschiedenen Disziplinen. Es werden dabei verschiedene Softwarelösungen durch eine einheitliche offene Schnittstelle und auf Basis einer einheitlichen Datenstruktur verwendet [44].

buildingSMART

BuildingSMART stellt eine internationale, nichtstaatliche Non-Profit-Organisation dar, welche das Austauschformat Industry Foundation Classes (IFC) zum BIM-Datenaustausch im Bauwesen definiert [44].

bsDD

Die Abkürzung steht für buildingSMART Data Dictionary und bezeichnet ein offenes Klassifizierungssystem für das Bauwesen. Es benennt auf Basis der ISO 12006-3 Bauelemente, Materialien und deren Merkmale und wurde von buildingSMART ins Leben gerufen [44].

IFC

Die Abkürzung steht für Industry Foundation Classes und stellt den offenen Standard für den BIM-Datenaustausch im Bauwesen dar. Grundlage dafür ist ISO 16739:2013 [44].

MVD

Die Abkürzung steht für Model View Definition und definiert Teilmengen des IFC-Datenmodells. MVD ist für die Unterstützung der spezifischen Datenaustausch-Anforderungen im Bauwesen während eines Bauvorhabens notwendig. Alle IFC-Ausdrücke (z.B. Klassen, Attribute) werden von der Modellansichtsdefinition angeleitet und sind jeweils für einen bestimmten Anwendungsbereich einzusetzen. Die MVD beschreibt außerdem das Pflichtenheft für die Umsetzung der IFC-Schnittstelle in einer bestimmten Software [44].

BCF

Die Abkürzung steht für BIM Collaboration Format und beschreibt ein Austauschformat. Es unterstützt, in Form eines offenen Dateiformats, den Austausch von Nachrichten und Änderungsanforderungen zwischen BIM-Viewern und BIM-Autorensoftware [44].

GUID

Die Abkürzung steht für Globally Unique Identifier und definiert einen automatisch generierten, weltweit eindeutigen Code. Er dient als offener Standard im Bauwesen der eindeutigen Kennzeichnung von Bauelementen in digitalen Modellen [44].

3D – 6D

Es wird zwischen mehreren Dimensionen im BIM-Modell unterschieden. 3D bezeichnet ein realitätsnahes, digitales Abbild des Bauwerks. 4D erweitert das Modell um den Faktor Zeit als vierte Dimension. Die Abkürzung 5D wird bei der Erweiterung des digitalen Modells um die Kosten als die fünfte Dimension verwendet. 6D vollendet das digitale Modell durch die Eingabe von Informationen zur Nachhaltigkeit eines Bauwerks über seinen Lebenszyklus betrachtet. Die sechste Dimension umfasst vor allem den Betrieb des Bauwerks im Zusammenhang mit dem Gebäudemanagement [44].

Abbildung 4.6 zeigt durch die Digitalisierung neu geschaffene Rollenbilder im Bauwesen. Die Umsetzung der Digitalisierung benötigt die klare Definition der neuen Positionen und die Ausbildung des erforderlichen Personals.

BIM-Projektleitung – BPL

Die BIM-Projektleitung ist auf Seite des AG für die allgemeine Spezifizierung der Rahmenbedingungen eines Bauprojekts zuständig. Aufgaben der BIM-Projektleitung sind die Definition der verwendeten Leistungsbilder der Projektbeteiligten sowie die Umsetzung der Anforderungen des AG hinsichtlich der verwendeten Datenstruktur im Projekt [44].

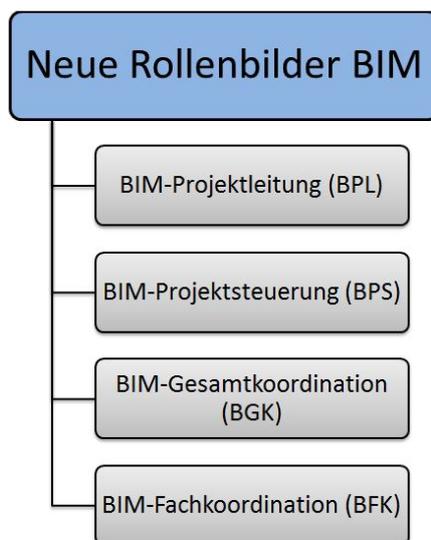


Abb. 4.6: Neue Rollenbilder BIM, adaptiert nach [44]

BIM-Projektsteuerung – BPS

Die BIM-Projektsteuerung ist auf Seite des AG für die konkrete Spezifizierung sowie die operative Durchführung eines BIM-Projekts im Rahmen der Vorgaben der BIM-Projektsteuerung verantwortlich [44].

BIM-Gesamtkoordination – BGK

Die BIM-Gesamtkoordination ist für das Koordinationsmodell zuständig und stellt eine Verbindung zwischen der BIM-Projektsteuerung und der Fachkoordination dar. Ihre Aufgaben betreffen die Koordination und Verifizierung interdisziplinärer BIM-Inhalte der Planungsbeteiligten sowie die Überwachung der Umsetzung der Aufgaben der Fachkoordination. Sie handelt auf Grundlage der Vorgaben der BIM-Projektsteuerung und gilt als primärer Ansprechpartner der digitalen Planung gegenüber der BIM-Projektsteuerung [44].

BIM-Fachkoordination – BFK

Die BIM-Fachkoordination ist für die Verifizierung fachdisziplinspezifischer BIM-Inhalte der jeweiligen Planungsteams verantwortlich [44].

Abbildung 4.7 zeigt das mit BIM eingeführte Reglement. Die Umsetzung eines erfolgreichen digitalen Bauprojekts erfordert einerseits klare Aufgabenstellungen, Handlungsanweisungen und Zieldefinitionen und andererseits die notwendigen Hard- und Softwareausstattungen sowie qualifiziertes Personal.

Betreiber-Informationsanforderung – BIA

Die Betreiber-Informationsanforderung (BIA) wird projektunabhängig von dem BIM-Management des Betreibers definiert und gilt als Basis für die Erstellung der projektspezifischen Auftraggeber-Informationsanforderung (AIA). Der Betreiber definiert durch die BIA auf Grundlage des

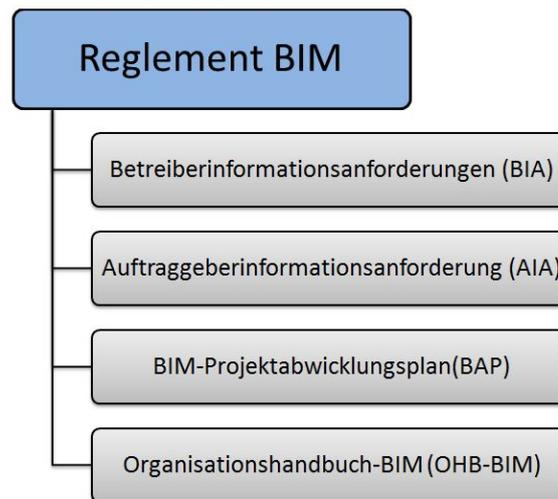


Abb. 4.7: Reglement BIM, adaptiert nach [44]

Datenmanagements seine langfristigen Anforderungen an die Datenstruktur und Detailtiefe sowie die Gültigkeit von Informationsquellen für die Grundlagenermittlung [44].

Auftraggeber-Informationsanforderung – AIA

Die AIA beschreibt dem AN spezifisch die Forderung des Informationsbedürfnisses des AG. Sie formuliert BIM-Anforderungen, BIM-Prozesse und BIM-Anwendungen, welche zur Erreichung der Ziele des AG notwendig sind. Die AIA dient als Basis für den BIM-Projektentwicklungsplan (BAP) [44].

BIM-Projektentwicklungsplan – BAP

Der BAP dient als Leitfaden für eine BIM-basierte Zusammenarbeit, in dem die organisatorischen Strukturen und die Verantwortlichkeiten definiert sind. Er gibt den Rahmen für die BIM-Leistungen vor und legt die Anforderungen an die Zusammenarbeit der vielen Projektbeteiligten fest. Der BAP sollte vertraglich zwischen AG und Projektteilnehmern festgehalten werden [44].

Organisationshandbuch BIM – OHB-BIM

Das Organisationshandbuch BIM dokumentiert die Rollen und Zuständigkeiten der Projektbeteiligten. Es beinhaltet die Projektziele, die Projektstruktur, die Aufbau- und Ablauforganisation, die den Beteiligten zugeordneten Leistungen sowie das Informations- und Kommunikationssystem für die erfolgreiche Projektentwicklung. Das OHB-BIM dient als Organisationsgrundlage der Steuerung aller BIM-Aktivitäten über den Projektverlauf durch die BIM-Projektsteuerung [44]. Weitere Bestandteile des OHB-BIM sind unter anderem:

- BIM2FIM-Strategie
 - Sie legt die Anforderungen der übergeordneten Zielsysteme des Facility Managements fest und umfasst die Informationsbedürfnisse des Betreibers und Nutzers. Sie kann im AIA und/oder im OHB-BIM definiert werden [44].

- Master Information Delivery Plan (MIDP)
 - Er verwaltet die Bereitstellung von Informationen während des Projekts und wird im BAP oder im OHB-BIM definiert. Beispielsweise werden der Lieferumfang von Modellen, Zeitplänen und Zeichnungen in Listenform festgelegt [44].
- Common Data Environment (CDE)
 - Die Kollaborationsplattform, auch Datenraum genannt, ermöglicht den projektbezogenen Austausch von Informationen aller Projektbeteiligten auf Basis der im BAP oder im OHB-BIM definierten Vorgaben [44].
- Qualitätssicherung
 - Die Qualitätssicherung dient der Erhöhung der Planungssicherheit sowie der Reduzierung von Baukosten und Risiken. Es handelt sich dabei um ein modellbasiertes Verfahren, das auf Basis eines dreidimensionalen Computermodells geometrische Konflikte ermittelt sowie auf Grundlage objektbasierter Modelle die logischen und alphanumerischen Qualitäten prüft [44].

4.2.5 Digitale Baustelle der Zukunft

Die digitale Baustelle der Zukunft wendet alle vier Hebel der Digitalisierung (Digitale Daten, Digitaler Zugang, Automation und Netzwerke) über alle Stufen der Wertschöpfungskette (Logistik, Beschaffung, Bauausführung, Vertrieb und After Sales) an. Technologische Entwicklungen wie BIM, IoT, Mobile und Cloud Computing verändern den Baubetrieb sowie die Strukturen innerhalb der Bauunternehmer grundlegend. Die bisherige baubegleitende Planung wird durch eine virtuelle Baustelle ersetzt, welche in Form eines „digitalen Zwillings“ vor Beginn der Bauausführung erstellt wird. Der „digitale Zwilling“ optimiert Bautechnik und -physik, Statik, Haustechnik und Energietechnik mit Hilfe intelligenter, wissensbasierter Kontroll- und Simulationssysteme. Nach Beseitigung der meisten Fehler kann auf Grundlage des perfektionierten digitalen Modells die Bauausführung beginnen. Die virtuelle Baustelle dient als Basis für die Bestellung von Material und Bauteilen auf elektronischen Portalen für die reale Baustelle. Die bedarfssynchrone (just-in-time) Lieferung der Stoffe und Elemente an die (reale) Baustelle senkt die Kosten der Lagerung und des Transports und steigert die Effizienz. Die Zusammenarbeit zwischen Bauunternehmen und Lieferanten wird verbessert. Die Güter werden auf der Baustelle von Kran- und Montagerobotern an den zugeordneten Montageplatz befördert und in weiterer Folge von Montagerobotern identifiziert, platziert und verarbeitet. Die technologische Verbindung der smarten Werkzeuge und Maschinen vermeidet Kollisionen und ermöglicht schnelle Problemlösungen. Mittels der RFID-Technik können Maschinen, Materialien und Produkte jederzeit geortet und so Wege-, Stand- und Suchzeiten reduziert werden. Alle Arbeitsschritte werden automatisch überwacht und dokumentiert und stehen in direkter Verbindung mit dem digitalen Modell. Smarte Bauteile melden ihren Status über den gesamten Lebenszyklus an die virtuelle Baustelle. Somit können Bauelemente beispielsweise selbstständig Informationen über ihren Wartungs- oder Reparaturzustand liefern. Jede Veränderung des digitalen Modells verändert die damit verknüpften Vorgänge und Abläufe auf der Baustelle, welche in Form von Handlungsanweisungen

für alle Projektbeteiligten kommuniziert werden müssen.

Baulieferer verwenden in der Zukunft intelligente Maschinen und Applikationen, welche durch Vernetzung und Selbstorganisation alle Produktionsprozesse vorweg planen und somit eine effiziente Durchführung ermöglichen. Digitale Verkaufs-Applikationen (beispielsweise eine Echtzeit-Besichtigung von realen Innenräumen über VR-Brillen) werden im Marketing und Vertrieb eingesetzt, um Händler und Kunden zu überzeugen. Neue Service- und Supportleistungen, wie z.B. die automatische Meldung von Produkten bei Wartungsarbeiten, werden die Kundenbindung im After-Sales-Bereich erhöhen.

Die Digitalisierung erfasst auch die Baustoffhändler, welche durch elektronische Plattformen die Effizienz steigern und die Transparenz erhöhen. Der digitale Vertrieb ermöglicht die Verarbeitung und Analyse der vom Kunden generierten Daten [22, 59].

Kapitel 5

Digitalisierung im Tunnelbau

Die weltweite Digitalisierung bringt diverse technologische Fortschritte mit sich, welche die bisherige Abwicklung von Projekten in der Bauindustrie gesamtheitlich revolutionieren. Die Umsetzung der digitalisierten Arbeitsmethoden in der Planung und Abwicklung von Großprojekten findet bereits in Form von Pilotprojekten statt. Die Digitalisierung schafft einen neuen integrativen Arbeitsprozess, der den gesamtheitlichen Lebenszyklus – Planen, Bauen und Betreiben – betrachtet und somit ein Umdenken vom bisherigen Projektablauf erfordert.

Der Tunnelbau zählt mit seinen vorrangigen Betätigungsfeldern des Verkehrs- und Versorgungsbaus zum Infrastrukturbereich. Bauwerke dieses Bereiches sind durch lange Lebensdauer von bis über 100 Jahre gekennzeichnet und erfordern daher umso mehr eine Betrachtung der Lebenszyklusphase des Betriebs. Innerhalb einer öffentlichen Infrastruktur-AG werden der Betrieb und die Instandhaltung des Objektes meist durch dieselbe Institution abgewickelt. Aus der Vergangenheit gewonnene Erkenntnisse über den Lebenszyklus bereits bestehender Bauwerke sollen in die neuen digitalisierten Arbeitsmethoden einfließen und für Optimierung sorgen [17].

Da der Tunnelbau zu den komplexesten und schwierigsten Aufgaben des Bauingenieurs zählt, steht die Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau gegenüber dem klassischen Hochbau zeitlich und technologisch nach. Problemfälle wie beispielsweise die Implementation des einen Tunnel umgebenden Gebirges in einem dreidimensionalen Modells beschäftigen derzeit die Akteure der Bauindustrie. Die Möglichkeiten der digitalen Bauabwicklung im Tunnelbau werden schrittweise in Form von Versuchen und Pilotprojekten erforscht und stehen derzeit erst an ihren Anfängen.

Das folgende Kapitel gibt einen kleinen Einblick in die Weiterentwicklungen des Tunnelbaus sowie die derzeitige versuchsweise Umsetzung der neuen digitalen Technologien im Tunnelbau. Da sich die digitalen Entwicklungen kontinuierlich ändern sowie der öffentliche Zugang zu den Ergebnissen der laufenden Pilotprojekte sehr beschränkt ist, kann hier nur ein kleiner Ausschnitt der in der Bauindustrie derzeit getesteten Prozesse gezeigt werden.

5.1 BIM als integrative Arbeitsmethode

Der Einsatz von BIM im Tunnelbau ist derzeit sehr begrenzt, obwohl die Arbeitsmethode großes Verbesserungspotential der Planung, des Vortriebs und des Betriebs von Tunneln hat. Basis für die Anwendung der Methode ist eine dreidimensionale geometrische Beschreibung des Projekts in unterschiedlichen Detaillierungsgraden (LoD - Level of Detail). Die Verknüpfung von Geometrie und Informationen über alle Projektphasen hinweg sorgt für die Einzigartigkeit und Wirtschaftlichkeit von BIM. Ziel ist die Generierung eines detaillierten Soll- und Ist-Zustands des

Bauwerks durch eine zeit- und ortsbasierte eindeutige Zuordnung der anfallenden Informationen und Messwerte zu den entsprechenden geometrischen Beschreibungen aus der dreidimensionalen Modellierung. Kernstück für eine erfolgreiche Umsetzung ist ein intelligentes, gut strukturiertes Datenmanagement, das die dreidimensionale Visualisierung zu einem laufend sich selbst aktualisierenden Informationsmodell macht. Der Austausch dieser digitalen Modelle zwischen verschiedenen Softwareherstellern ist derzeit noch sehr schwierig. In den meisten Fällen erfolgt lediglich der Austausch ausgewählter Datensätze zwischen dem BIM-Modell und einer externen Webanwendung über das Datenaustauschformat IFC (Industry Foundation Classes). Hinsichtlich der Terminologie von BIM wird auf das Kapitel 4.2.4 verwiesen.

BIM begleitet den Tunnelbau über den gesamten Baubetrieb. Variantenstudien, Sensitivitätsanalysen und Studien von Störfallszenarien zur Optimierung der Trassierung und des verwendeten Vortriebsverfahrens erfolgen während der Entwurfsphase. Der erhöhte Detailgrad des BIM in der Ausführungsplanung optimiert das Bemessungsmodell. Die Ergebnisse des Bemessungsmodells werden den entsprechenden Elementen der Datenbank zugeordnet und schärfen das gesamtheitliche Modell des Tunnels. Die Anreicherung der Datenbank mit Maschinendaten und weiteren Informationen, die während der Bauausführung gesammelt und räumlich und zeitlich in das BIM integriert werden, ermöglicht einen ständigen Soll-Ist-Vergleich. Abweichungen führen zu einer Anpassung der Modellierungsgrundlage und zu einer neuen Prognose des nun zu erwartenden Systemverhaltens. Maßgebend für den Mehrwert von BIM ist die erfolgreiche zeit- und ortsunabhängige Datenintegration, die von autorisierten Projektbeteiligten jederzeit in Echtzeit gewährleistet werden muss. Im Folgenden werden kürzlich entwickelte Softwaremodule für die geometrische Modellierung, die Online-Datenerfassung und das Datenmanagement während des Vortriebs sowie die Interaktion der Module untereinander vorgestellt [42].

Software für Geometriemodellierung und Simulation

Der folgende Abschnitt soll einen Überblick über die im kontinuierlichen Tunnelbau verwendete BIM-basierte Software geben. Da die genaue Auseinandersetzung mit der Funktionsweise und die Erarbeitung eines fundierten Hintergrundwissens zu dieser Thematik den Rahmen der Diplomarbeit sprengen würde, wird im folgenden Abschnitt bei der Verwendung von Fachvokabular oftmals auf die Informationsquelle verwiesen.

Komplexe Simulationsmodelle benötigen eine Menge an projektspezifischen Informationen und Daten. Bei Tunnelbauprojekten liegen die Informationen bezüglich der Tunnelgeometrie meistens in Form von CAD-Dateien und schrittweise auch in Form von BIM-Modellen vor. Numerische Analysen ermöglichen eine Optimierung des Projektentwurfs, benötigen jedoch eine Konsistenzhaltung der zugehörigen Submodelle, die bei manueller Datenkonvertierung eine hohe Fehleranfälligkeit aufweist. Integrierte Entwurfs-Analyse-Werkzeuge (siehe [25]) generieren numerische Simulationen auf Grundlage ihrer Geometrie und zugehörigen semantischen Informationen selbstständig. Die erforderlichen Informationen werden dabei direkt aus BIM-Programmen wie Autodesk Revit oder Nemetschek Allplan entnommen. Die Verwendung eines effizienten mehrskaligen Modellierungskonzepts, das alle Komponenten des kontinuierlichen Vortriebs (Baugrund, Vortriebsmaschine, Tunnelschale, Gebäude) einschließt, verringert den Aufwand für die Berechnung und Modellerzeugung. Abbildung 5.1 veranschaulicht die mehrstufige Geometriepäsentation. Wichtig dabei ist, dass die Parameter zwischen den unterschiedlichen Detaillierungsgraden für die jeweiligen Komponenten konsistent bleiben. Die Konsistenz des Modells wird durch die Definition aller Komponenten durch hierarchische Parametersätze gewährleistet. Geringere Detaillierungsgrade

verwenden demnach nur eine Teilmenge der entsprechenden Parametersätze, während die höchste Geometriepräsentation alle enthaltenen Parameter beinhaltet. Der niedrigste Detaillierungsgrad (LoD 1) bezeichnet die nichtvolumetrische Repräsentation einer Komponente, beispielsweise die Abbildung von Gebäuden durch ihre Grundfläche. Die mittlere Stufe (LoD 2) erzeugt ein volumetrisches Modell, welches die reale Ausdehnung jedoch eine vereinfachte Geometrie der Komponente abbildet. Der höchste Detaillierungsgrad (LoD 3) weist genauere Details der tatsächlichen Geometrie auf [42].

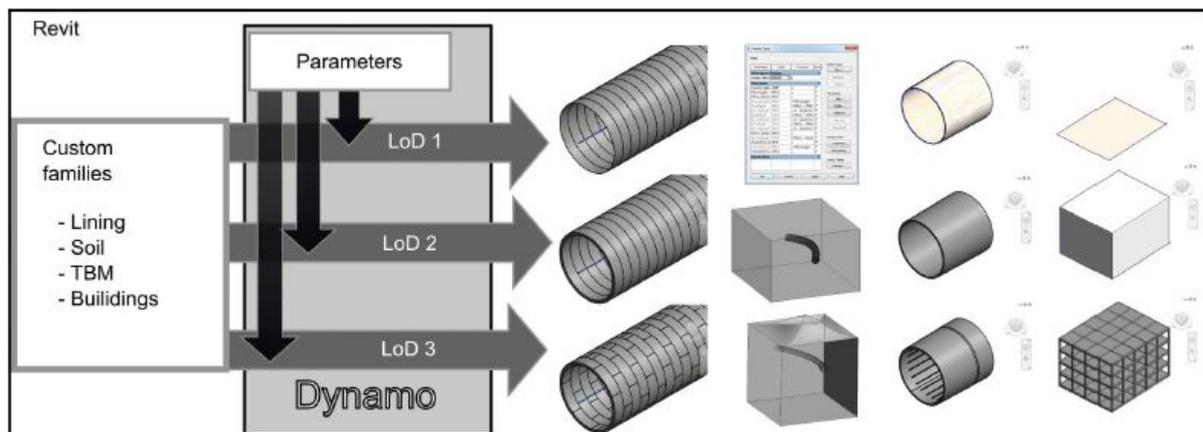


Abb. 5.1: Mehrskaliges Modellierungskonzept: Generierung unterschiedlicher Modellkomponenten und variabler Detaillierungsgrade (LoD) [42]

Neben der Geometrie bilden die mehrstufigen Detaillierungsgrade auch semantische Informationen wie Prozessparameter ab. Damit wird beispielsweise die Notwendigkeit zeitabhängiger Effekte während der Simulation berücksichtigt. Die reale Umsetzung der Einbindung einer mehrskaligen Modellrepräsentation in ein BIM ist mit dem Konzept SatBim-Framework (siehe [40]) möglich. Dieses Konzept generiert eine geometrisch-semantische Modellierung des maschinellen Schildvortriebs, welche sich für die direkte Verwendung in numerischen Simulationen eignet. Das entwickelte realistische Simulationsmodell des maschinellen Vortriebs ist sowohl in der Planungs- als auch der Bauausführungsphase einsetzbar und inkludiert alle wesentlichen Bauteile (Baugrund, Tunnelschale, Vortriebsmaschine etc.). Die technische Umsetzung der unterschiedlichen Detaillierungsgrade erfolgt durch Dynamo-Plug-ins (siehe [25]). Die Verknüpfung aller individuellen Komponenten in ihren jeweiligen Modellierungsstufen lässt das vollständige Tunnelinformationsmodell (TIM - siehe [14]) entstehen [42].

Vortriebsbegleitende Simulation

Die Prognose von Vortriebsparametern auf Basis von Überwachung und Simulation parallel zum Tunnelvortrieb beruht auf folgenden drei Phasen:

- Ersatzmodellerstellung (vorab),
- Monitoringbasiertes Ersatzmodell-Update (prozessbegleitend),
- Prozessparameterprognose (vorausschauend).

Die erste Phase beschreibt die Erstellung eines numerisch effizienten Ersatzmodells vor Vortriebsbeginn. Input in das Ersatzmodell sind z.B. Material-, Geometrie- und Prozessparameter. Die Eingabe der Parameter erfolgt entlang eines aus den vorhandenen Projektdaten ausgewählten Abschnittes. Output sind die Steuerzielgrößen wie z.B. Baugrundverformungen. In der zweiten Phase werden während des Vortriebs gewonnene Maschinendaten sowie aus der Vermessung erlangte Erkenntnisse mit dem Ersatzmodell validiert. Der Input erweitert sich somit um die tatsächlich in den ersten Vortriebsschritten gewählten Prozessparameter. Das Ersatzmodell kann ohne Modifikation für die Prognose von Vortriebsparametern verwendet werden, falls die mit dem Ersatzmodell berechneten Steuerzielgrößen (z.B. Setzungen an bestimmten Messpunkten) innerhalb eines definierten Toleranzbereichs der gemessenen Größen liegen. Ist dies nicht der Fall, muss das Ersatzmodell mit Hilfe von Optimierungsverfahren aktualisiert werden. Die aktualisierten Prozessparameter dienen in der dritten Phase der Prognose von zukünftigen Steuerzielgrößen. Optimierungsaufgaben helfen dabei zukünftige Steuerzielgrößen im gewünschten Rahmen zu halten. In der Praxis werden die prognostizierten Prozessparameter (z.B. Stütz- und Verpressdrücke) dem Maschinenführer zur Unterstützung seiner Steuerentscheidung angezeigt. Die Berechnungsergebnisse müssen nahezu in Echtzeit verfügbar sein, da die Entscheidungen während des Vortriebs in der Regel schnell fallen müssen. Zur Beschleunigung von numerisch aufwendigen Simulationsprozessen wurden Metamodelle entwickelt. Metamodelle werden als kompakte Representationen von Daten und Simulationsmodellen definiert, bei denen die Korrelation zwischen Input x und Output y mit Hilfe eines Lernprozesses formuliert werden. Der Prozess kann allgemein in der Form $y=f(x)$ dargestellt werden. Die Berechnung von $f(x)$ erfolgt durch die Verwendung verschiedener maschineller Lernalgorithmen, wie z.B. Künstliche Neuronale Netze (KNN) oder Rekurrente neuronale Netze (RNN). Näheres zu den Verfahren ist den Veröffentlichungen „Model update and real-time steering of tunnel boring machines using simulation-based meta models“ und „Hybrid surrogate modelling for mechanised tunnelling simulations with uncertain data“ (siehe [41, 60]) zu entnehmen. Das im Rahmen der Echtzeitprognose der Prozessparameter des Schildvortriebs (auf Grundlage maschineller Lernalgorithmen) angelegte Metamodell verwendet eine ausgewählte Gruppe von Parametern der Simulationsergebnisse. Die Erzeugung der Simulationsmodelle mit den notwendigen Entwurfsvarianten geschieht zuvor durch das SatBim-Framework (siehe [40]). Das auf Grund der besten Prognosefähigkeit ausgewählte Metamodell ersetzt in weiterer Folge das Simulationsmodell und gewährleistet die Echtzeitfähigkeit der Prognose. Die Entwicklung der Applikation SMART (Simulation-and-Monitoring-based Assistant for Real-time steering in mechanized Tunneling) im Sonderforschungsbereich 837 der Ruhr-Universität Bochum erforscht und erprobt derzeit diese neuartige Methode der vortriebsbegleitenden Simulation [42].

Abbildung 5.2 zeigt das Schema der Echtzeitprognose von vortriebsinduzierten Effekten. Die Auswertung und Visualisierung der Simulationsergebnisse erfolgen in SatBim über einen benutzerdefinierten Algorithmus in Dynamo (siehe [21]). Die Ergebnisse können somit umfassend, intuitiv und verständlich durch den Benutzer gesichtet werden. Es erfolgt eine rasche Auswertung der Einflüsse von Steuerungs- oder Ausführungsentscheidungen auf die Sicherheit und Leistungsfähigkeit des Tunnelvortriebs. Kommen die dargestellten Ergebnisse aus effizienten Ersatz- oder Metamodellen, so kann die Visualisierung der Ergebnisse für Echtzeitprognosen und Vortriebsoptimierungen verwendet werden [42].

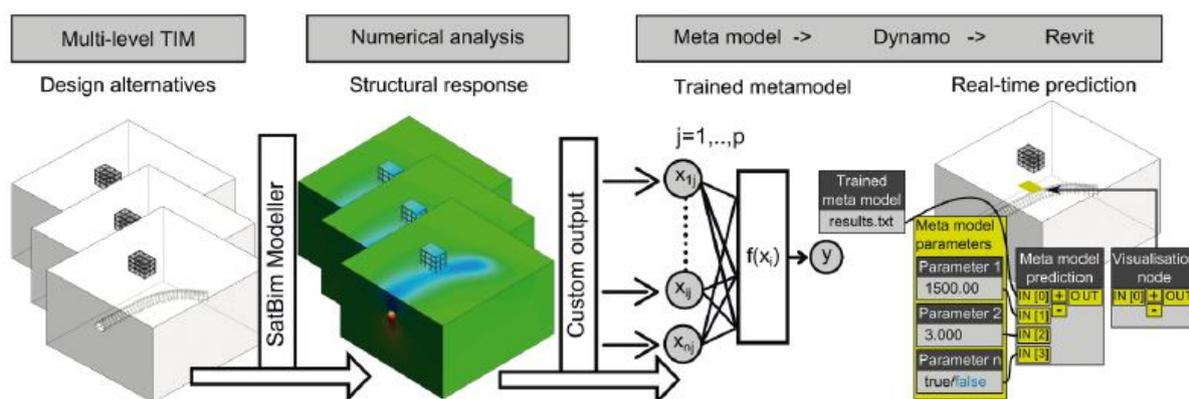


Abb. 5.2: Schema der Echtzeitprognose von vortriebsinduzierten Effekten [42]

Erfassung und Austausch der Daten

Die Überwachung des Tunnelvortriebs sieht unter anderem die automatische Aufzeichnung diverser Parameter der TVM vor. Des Weiteren werden geotechnische Daten sowie Informationen hinsichtlich der Wartungsarbeiten oder Schichtbetriebe erfasst, die eng mit dem Vortriebsprozess verknüpft sind. Für die effiziente Nutzung der Daten für die Überwachung und Optimierung des Vortriebs, auch Prozesscontrolling genannt, müssen sie unter Berücksichtigung ihrer Semantik sowie örtlicher und zeitlicher Verortung von einer Auswertungssoftware aufbereitet werden. Ein Datenspeicher legt die Vortriebsdaten in einem eindeutigen räumlichen und zeitlichen Koordinatensystem zentral ab und ermöglicht einen weltweiten Zugriff in Echtzeit. Datensicherheit und -integrität werden dabei durch einen webbasierten Zugriff über eine Client-Server Architektur gewährleistet. Die zeitliche und räumliche Verknüpfung verschiedener Daten soll Erkenntnisse über die Sicherheit und Leistung des Tunnelvortriebs liefern. Die Verknüpfung des geometrischen Modells des Tunnels mit den semantischen Informationen stellt eine BIM-Anwendung dar. Der Datenzugriff muss flexibel und ohne Installation einer neuen Software für den Benutzer möglich sein. Eine Webapplikation erlaubt einen zentralen, weltweiten und ortsunabhängigen Datenzugang via Internet. REST(Representational State Transfer)-Schnittstellen von integrierten Webservices der Webapplikation ermöglichen externen Softwareprogrammen die Extrahierung der Vortriebsdaten. Nach der Analyse und Berechnung können die Ergebnisse zurückgeschrieben werden. Abbildung 5.3 zeigt im Teilbereich a) den web-basierten Zugriff von Benutzern und externen Softwareprogrammen auf den Datenspeicher. Der Teilbereich b) veranschaulicht den Informationsfluss zwischen BIM-Software und einer Webapplikation zum Prozesscontrolling. Plugins ermöglichen die bidirektionale Kommunikation zwischen der BIM-Software und der externen Webapplikation. Standardmäßig wird für den Datenaustausch zwischen Webanwendungen das kompakte Datenformat JSON (JavaScript Object Notation - siehe [64]) verwendet. Das Plugin kann die erforderlichen Formate interpretieren und benötigte Schritte, wie z.B. das Erstellen einer CSV-Datei, umsetzen. Die aus dieser gewonnenen Daten können in weiterer Folge in das Modell der Tunneltrasse eingearbeitet werden [42].

Beispielsszenario

Ein Anwendungsbeispiel ist der Vergleich der geplanten Tunneltrasse mit der tatsächlich ausgeführten Tunneltrasse. Geeignete Programmschnittstellen ermöglichen das Auslesen von Navigations-

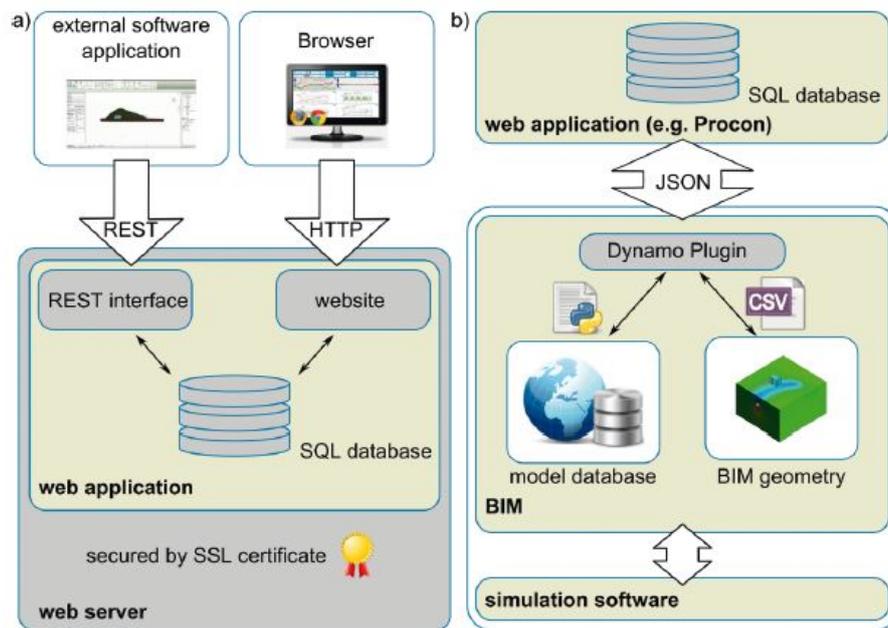


Abb. 5.3: a) Architektur der Prozesscontrolling-Webapplikation und b) Kommunikationsschema bei der Integration von Projektdatenerfassung und BIM-basierter Projektpräsentation [42]

und Ringbaudaten aus dem Prozesscontrolling-System (Ist-Daten). Passende Dynamo-Plugin lesen die Daten in Revit ein, um einen Vergleich mit der dort modellierten Tunneltrasse (Soll-Daten) anzustellen. Visualisierungen in Revit verdeutlichen beispielsweise durch Unterschiede in der Intensität der Einfärbung des modellierten Tunnels den Grad der Abweichung von der Solltrasse. Die Berechnung einer Korrekturkurve sowie ihre Weitergabe an das Prozesscontrolling-System ermöglichen eine neue Sollvorgabe.

Ein weiterer Verwendungszweck wird in Abbildung 5.4 veranschaulicht. Sie zeigt die numerische Ermittlung der aus den Vortriebskräften resultierenden in der Tunnelröhre verbleibenden Längskräfte. Ihre direkte Messung ist nicht möglich, ihr Auftreten liefert jedoch wichtige Informationen für die Abschätzung der Dichtigkeit und der Steifigkeit der Tunnelröhre in Längsrichtung. Die Ermittlung der verbleibenden Längskräfte aus der Belastungsgeschichte ist durch geeignete numerische Modelle möglich. Ein Metamodell berechnet die entsprechenden verbleibenden Kräfte auf Grundlage der zuvor aufgezeichneten Daten [42].

Abbildung 5.5 veranschaulicht abschließend eine vortriebsbegleitende Optimierungsstrategie in Echtzeit auf Basis von vortriebsbegleitend aktualisierten Metamodellen. Ein Simulationsdurchlauf setzt sich aus folgenden Prozessschritten zusammen:

- 1) Erzeugung eines Metamodells mit Hilfe der Modellierungsfunktionen des SatBim-Frameworks.
- 2) Verwendung der im Prozesscontrolling-System erfassten Vortriebs- und Monitoringdaten zur Anpassung der Modellparameter, sodass die Modellergebnisse die Kontrollmessungswerte (in Abbildung 5.5 Setzungsmessungen) reproduzieren.

- 3) Optimierung der Vortriebsparameter durch Optimierungsalgorithmen zur Minimierung der vortriebsinduzierten Setzungen. Die Auswertung der Zielfunktion läuft über das Metamodell. Die Ergebnisse der Parameteroptimierung werden in Form von Steuerungsvorschlägen über das Prozesscontrolling-System zurück an die Vortriebsmannschaft übermittelt [42].

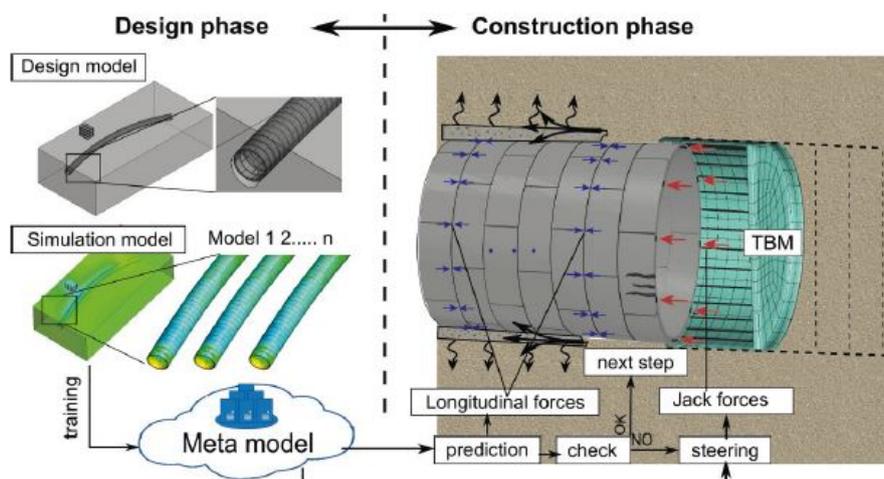


Abb. 5.4: Berechnung bleibender Längskräfte auf Basis von Maschinenaufzeichnungen [42]

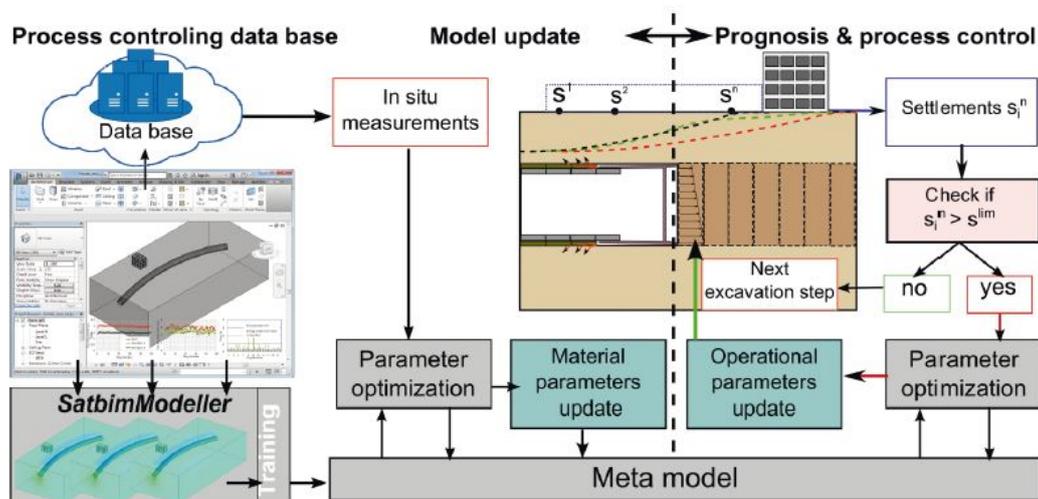


Abb. 5.5: Simulationen via Metamodelle für eine laufende Modellaktualisierung und Anpassung der Vortriebsparameter [42]

5.2 Digitalisierung des zyklischen Vortriebs

Die Industrialisierung und Digitalisierung verbessern den zyklischen Vortrieb durch den Einsatz neuer Geräte und Maschinen sowie deren Zusammenarbeit. Da die technologischen Entwicklungen in Form der Mechanisierung und Robotisierung insbesondere den Sprengvortrieb forciert haben, wird im Folgenden auf diesen eingegangen.

5.2.1 Mechanisierung des Sprengzyklus

Kapitel 2.4.1 beschreibt den Ablauf einer klassischen Tunnelbaustelle bei einem Sprengvortrieb. Die Arbeitsschritte sind bei einem Sprengvortrieb genau vorgegeben und bilden in ihrer Gesamtheit den sogenannten Sprengzyklus. Die Industrialisierung und Digitalisierung setzen an allen Schritten des Sprengzyklus an und sorgen für einen wirtschaftlich optimal abgestimmten Sprengvortrieb. Moderne Techniken erzielen eine höhere Effektivität der einzelnen Arbeitsprozesse bei gleichzeitiger Steigerung der Arbeitssicherheit des Personals. Abbildung 5.6 zeigt das Schema eines elektronisch gesteuerten Sprengzyklus, welcher die Prozesse Bohren – Sprengen – Schüttern – Sichern umfasst.



Abb. 5.6: Elektronisch gesteuerter Sprengzyklus, adaptiert nach [34]

Bohren

Der Sprengkreislauf beginnt mit der computergestützten Bohrung der Sprenglöcher durch einen Bohrwagen. Der computergesteuerte Bohrwagen ist mit mehreren (meist zwei bis drei) Bohrlafetten ausgestattet und arbeitet in einem halb- oder vollautomatischen, roboterisierten Betrieb. Am Beginn eines Bohrzyklus wird das Bohrgerät an der Ortsbrust positioniert und das zugeordnete Sprengbild (Bohrplan) daran angepasst. Tunnelscanner helfen dabei, die Gerätepositionierungsdaten zu generieren und dreidimensional abzubilden. Näheres dazu ist in Kapitel 5.2.3 ersichtlich. Die virtuell erstellten Bohrschemen auf Grundlage der Situation an der Ortsbrust werden automatisch in die Steuereinheit des Bohrwagens eingelesen. Die Bohrposition kann berechnet werden und der Bohrwagen beginnt mit der computergestützten Hochleistungsbohrung entlang des

Bohrschemas. Während des Bohrens (inklusive des Umsetzens der Bohrrarme) werden Bohrdaten aufgezeichnet und an die elektronische Steuereinheit weitergegeben [34].

Sprengen

Auf Basis der gewonnenen Bohrdaten sowie des zuvor entwickelten Bohrplans wird ein Ladeschema erstellt. Neben der technologischen Weiterentwicklung der Sprengstoffe und Zündsysteme führt die Selbstständigkeit des mechanisierten und computergesteuerten Ladens zu einer schnellen und wirtschaftlichen Ausführung. Pumpbare Emulsionssprengstoffe werden direkt über den Bohrwagen in mehreren Ladelinien zur Ortsbrust gefördert. Hierzu werden computergesteuerte Pumpfahrzeuge über Förderschläuche mit dem Bohrwagen verbunden. Volumetrische Steuerungen gewährleisten den zuvor berechneten Füllungsgrad der Sprenglöcher. Die darauffolgende Sprengung des Gebirges wird durch die Zündung der in den geladenen Bohrlöchern eingebrachten Sprengmittel ausgelöst, wobei moderne Steuerungs- und Informationstechnologie eine Genauigkeit des Ausbruchs hinsichtlich Über- und Unterprofil gewährleisten [34, 68].

Schuttern

Nach einer Belüftungspause wird die Ortsbrust auf Grundlage einer visuellen Beobachtung der Oberflächenstruktur nachbehandelt. Das anschließende Schutterkonzept beruht auf den Abmessungen und der Zusammensetzung, den Gesteinsfestigkeiten sowie der Ausbruchsmenge pro Abschlag. Hochleistungs-Tunnelbagger und Seitenkipplader gewährleisten ein mechanisiertes und wirkungsvolles, daher wirtschaftliches Schuttern unter beengten Platzverhältnissen. Spezielle Raupenbagger mit Hochlöffel ermöglichen Hochleistungsschutterungen mit Leistungen bis zu 500 t/h ($300 \text{ m}^3/\text{h}$) [34, 68].

Sichern

Im nächsten Arbeitsschritt wird das freigelegte Gebirge durch Stützmittel wie Anker, Stahlbögen, Sicherungsnetze oder durch Auftrag von Spritzbeton gesichert. Der Ankereinbau erfolgt größtenteils halb- bzw. vollautomatisch und setzt sich aus den Prozessen Bohren, Setzen und Vorspannen zusammen. Erektormanipulatoren stellen eine mechanisierte Einbaumethode für das Versetzen von Stahlbögen dar. Der Einbau von Sicherungsnetzen ist vergleichsweise sehr zeitintensiv. Oftmals werden spezielle Ankerbohr- und Setzgeräte verwendet, die auch mit einer integrierten mechanisierten Matten-Versetzeinheit ausgestattet sind [34, 68].

Dem Einbau von Spritzbeton kommt besondere Bedeutung zu, nähere Informationen zur Wirkungsweise siehe 2.4.5. Spritzbeton kann manuell oder maschinell durch sogenannte Spritzbeton-Manipulatoren (auch als Spritzbetonroboter bezeichnet) aufgetragen werden. Verfahrenstechnisch werden, in Abhängigkeit von der Geometrie des Tunnelquerschnitts sowie der erforderlichen Betonmenge pro Zeit, das Nass- oder das Trockenspritzverfahren unterschieden. Der Spritzbeton wird immer von unten nach oben aufgetragen. Für ein optimales Ergebnis bei minimalem Rückprall sollte die Spritzbetondüse etwa einen Abstand von eineinhalb bis drei Metern und einen senkrechten Winkel zur zu bespritzenden Fläche einnehmen. Abbildung 5.7 zeigt die Abhängigkeit des Rückpralls von der Neigung der Spritzdüse gegen die Wand (links) bzw. gegen die Horizontale (rechts) [20, 30].

Der computergesteuerte Manipulator scannt durch eine Lasereinheit die Tunneloberfläche und bildet diese in einem Raster ab. Auf Grundlage dessen berechnet der Computer die optimale virtuelle Bahnführungsoberfläche der Düse für einen wirtschaftlichen Auftrag des Spritzbetons. Der

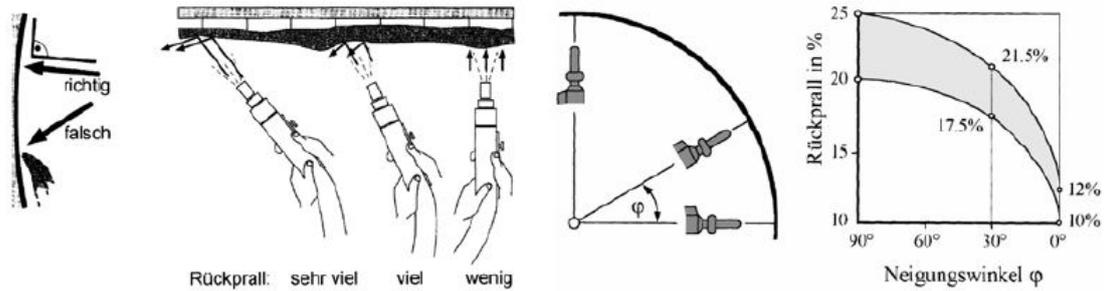


Abb. 5.7: Abhängigkeit des Rückpralls von der Neigung der Spritzdüse gegen die Wand (links) bzw. gegen die Horizontale (rechts) [20]

Spritzbeton-Roboter steuert somit sowohl die kinematischen Prozesse als auch die Applikation des Stützmittels selbst. Die Automatisierung des Spritzbetoneinbaus durch den Manipulator steigert auf Grund der optimalen Düsenführung die Materialqualität und vermindert den Rückprallanteil. Da der Spritzbetonauftrag am kritischen Weg liegt, bewirkt die gewonnene Zeitersparnis eine Erhöhung der Vortriebsleistung. Außerdem erhöht die Verwendung des Roboters die Arbeitssicherheit, da die Bedienung des Geräts außerhalb des Auftragsbereiches stattfindet. Die Eingabemaske des Spritzbetonmanipulators benötigt die Eingabe der erwünschten Spritzbeton-Schichtstärke und der erforderlichen Ebenheit. Die Prozesssteuerung berechnet auf Basis der eingegebenen Betriebsdaten sowie des zuvor erstellten Tunnelrasters automatisch alle erforderlichen operativen Parameter [30, 34].

Die Entwicklung leistungsstarker computergesteuerter Recheneinheiten inklusive benutzerfreundlicher Softwarepakete hat den Sprengvortrieb mechanisiert, automatisiert und weitestgehend optimiert. Der technologische Fortschritt bringt eine Reduktion an Bauteilen, wie Kabeln und Schalter, bei einer gleichzeitigen Leistungssteigerung mit sich. Der Zugriff auf Geräteinformationen in Echtzeit ermöglicht eine Selbstdiagnose bei Störungen. In den Maschinen installierte Kommunikationssysteme ermöglichen die Übertragung von Daten, Sprache und Videobildern zwischen Geräten und anderen tunnelbautechnischen Anlagen. Die Digitalisierung dient als Grundlage für eine funktionale Überwachung und Steuerung autonom arbeitender, mobiler Baumaschinen. Die Zukunft strebt dahin, den Sprengzyklus hinsichtlich der Prozessschritte Bohren und Sprengen noch mehr zu verknüpfen und zu optimieren. Des Weiteren soll der Automatisierungsgrad durch Verbesserung der Aufnahme der geologischen Beschaffenheit des Gebirges und der daraufhin abgeleiteten Prozessschritte weiterentwickelt werden [68].

5.2.2 Produktivitätssteigerung durch durchdachte Nachläufer-Logistiksysteme

Der Sprengvortrieb wird aus logistischer Sichtweise in die Vortriebszone und den rückwärtigen Bereich unterteilt. Die Vortriebszone stellt den Produktionsbereich dar, in dem die Prozesse Bohren – Sprengen – Schüttern – Sichern stattfinden. Der rückwärtige Bereich, auch Nachläufer genannt, trägt alle für den Vortrieb erforderlichen Hilfseinrichtungen wie beispielsweise die Strom- und Wasserversorgung oder Sanitär- und Magazincontainer. Abbildung 5.8 zeigt schematisch die funktionalen Bereiche des Sprengvortriebs mit einem Nachläufer-Logistiksystem.

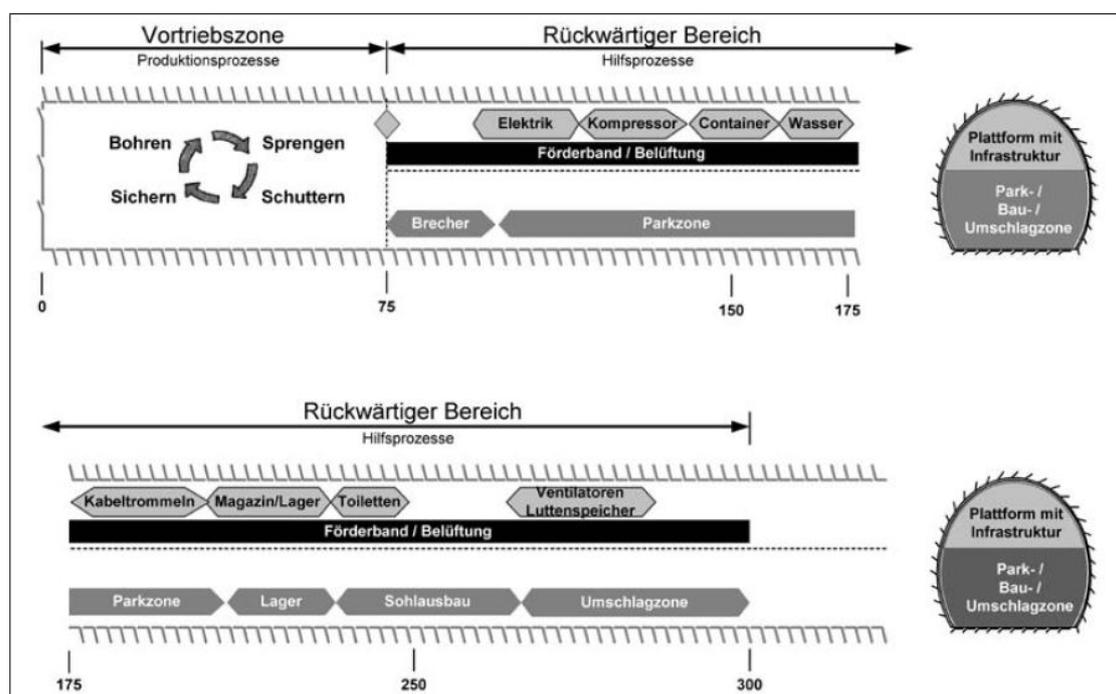


Abb. 5.8: Nachläufer-Logistiksysteme beim Sprengvortrieb [34]

Der technologische Fortschritt ermöglichte die Entwicklung von Nachläufer-Logistiksystemen, die in Form einer aufgehängten Trägerplattform den Ablauf des Sprengvortriebs neu strukturieren und optimieren. Dieses Konzept des Infrastrukturträgers führt durch die mögliche parallele Abwicklung der einzelnen Prozessphasen des Vortriebszyklus sowie der räumlichen Trennung der Materialflüsse in Ver- und Entsorgung zu einer erheblichen Produktivitätssteigerung. Die Materialversorgung erfolgt unterhalb der auf Schienen aufgehängten Plattform, der Abtransport, beispielsweise über Förderband, entlang der Infrastrukturplattform. Die Nachläufer-Konstruktion wird dem Vortrieb zeitlich versetzt durch Vorschubzylinder nachgeschoben. Während des Sprengvorgangs wird der vordere Bereich der aufgehängten Plattform durch einen Kettenvorhang gegen Felstrümmer geschützt. Abbildung 5.9 zeigt linksbündig diesen Trümmerschutz sowie das schräge Zuführungsband für das ausgebrochene Material zum Brecher. Die rechte Seite der Abbildung 5.9 veranschaulicht die Positionierung des aufgehängten Nachläufers im Tunnelquerschnitt. Der Einsatz dieser Logistiksysteme gewährleistet einen industrialisierten, kontinuierlichen und sich wiederholenden Arbeitsablauf, der den zeitlichen Aufwand für nichtwertschöpfende Aktivitäten (z.B. Umsetzen der Infrastruktureinrichtungen) minimiert [34].

Die Digitalisierung verfolgt das Ziel, die Interaktion zwischen der Vortriebszone und dem rückwärtigen Bereich weiter zu optimieren sowie die Parallelisierung der einzelnen Arbeitsprozesse sowohl an der Ortsbrust als auch im Nachläuferbereich weiter auszubauen. Die Vortriebsgeschwindigkeit des Sprengzyklus wird beim digitalen Ansatz durch die Betrachtung und daraus folgende Adaptierung aller Arbeiten entlang der gesamten Logistikkette und deren Einflüsse untereinander gesteigert. Grundlage für die permanente Entwicklung des Hochleistungssprengvortriebs sind der Einsatz hochmechanisierter und robotisierter Maschinen und Geräte. Die Implementation von neuen Technologien wie IoT, CPS oder Advanced Analytics führt zu einer weitreichenden Verknüpfung und Optimierung aller Prozesse entlang der Wertschöpfungskette und verspricht einen weiteren technologischen Fortschritt des Sprengvortriebs.



Abb. 5.9: Trümmerschutz durch einen Kettenvorhang (links), Aufgehängte Plattform: Blick auf Lutte, Förderband und Fußweg (rechts) [34]

5.2.3 Dokumentation und Optimierung durch 3D-Laserscanning

Die Digitalisierung ermöglicht, dass verschiedene Projektbeteiligte zeitnahe Daten für Ausbruch und Ausbau im Zuge des Vortriebs und auch nach Bauabschluss für die Abrechnung und die Qualitätskontrolle gewinnen und nutzen können. Ein innovatives Messverfahren stellt das 3D-Laserscanning dar. Dieses macht durch die flächenhafte Aufnahme der Hohlraumgeometrie und die Analyse der dabei gewonnenen Daten und Informationen eine große Bandbreite von Anwendungen möglich. Unter anderem kann 3D-Laserscanning folgende Funktionen unterstützen bzw. erfüllen:

- Informationsgewinn über die Ausbruchsgeometrie (Struktur und Textur),
- Dreidimensionales Oberflächenmodell für Fels-, Spritzbeton- und Innenschalen,
- Erstellung von Ausbruchsprofilen,
- Dokumentation des Überprofils,
- Kalkulation der Spritzbetondicke,
- Dokumentation der Sicherungsmittel,
- Berechnung von Deformationen,
- Identifizierung von Diskontinuitäten (z.B. Kluftkörper),
- Aufnahme von Wasserzutritten und
- Informationsbasis für kinematische und numerische Modellierungen [45].

Abbildung 5.10 zeigt in Form von einer Skizze die Funktionsweise des distanzbasierten Messverfahrens 3D-Laserscanning. Grundlage des Verfahrens ist die Laufzeitmessung von Laserstrahlen. Das Gerät sendet dabei Laserstrahlung unter bekanntem Auslenkwinkel aus, die an der Oberfläche des zu untersuchenden Objektes reflektiert und vom Scanner wieder aufgenommen wird. Der 3D-Laserscanner tastet automatisch die Oberfläche in einer 360-Grad-Ansicht ab und erfasst somit in kürzester Zeit die genaue Lage von Millionen Punkten. Die Erstellung einer nahezu sphärischen Gesamtansicht der Umgebung erfolgt sehr rasch und kann bei schlechten Licht- und eingeschränkten Platzverhältnissen eingesetzt werden. Abbildende Laserscanner können durch einen Intensitätswert, welcher die reflektierenden Eigenschaften einer Oberfläche widerspiegelt, Informationen über die Art der Oberfläche liefern. Geeignete Softwareprogramme ermöglichen aus den gewonnenen dreidimensionalen Daten des Scanners die Generierung eines realistischen und praktikablen Oberflächenmodells [45].

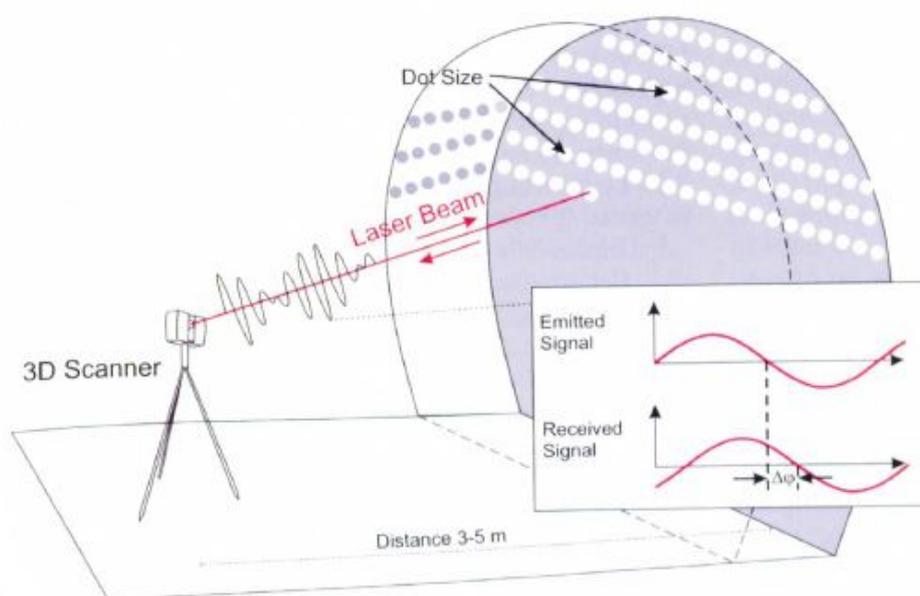


Abb. 5.10: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines 3D-Laserscanners [45]

Ausbruchsprognose und Optimierung des Ausbruchprofils

Im Zuge des Vortriebs des Erkundungsstollen Wolf 2 des Brenner Basistunnels wurde die Anwendung von 3D-Laserscanning für eine Ausbruchsprognose getestet. Im Folgenden werden die Erkenntnisse dieser neuen Auswertungsmethode grob zusammengefasst; Näheres ist dem wissenschaftlichen Text „Ausbruchsprognose beim Sprengvortrieb mittels 3D-Laserscanning“ [45] zu entnehmen.

Die Erstellung einer Prognose zukünftiger Ausbruchsquerschnitte bzw. des zu erwartenden Über- und Unterprofils für zukünftige Abschlüge in Bereichen gleichartiger Gebirgsverhältnisse bringt eine wirtschaftliche Optimierung des Sprengvortriebs mit sich. Grundlage dieser neuen Auswertungsmethode ist die Verknüpfung der dreidimensional gewonnenen Daten der Tunnelloberfläche durch den 3D-Laserscanner mit der geologischen Ortsbrustaufnahme durch den Geologen [45]. Die geologische Aufnahme der Ortsbrust vor Ort erfährt derzeit durch die Digitalisierung einen großen Wandel. Sie bewegt sich immer mehr in Richtung computergestützter dreidimensionaler Aufnahmen, die direkt an der Ortsbrust erstellt und analysiert werden können. Digitalkameraaufnahmen sowie Softwarekomponenten zur Generierung von 3D-Bildern und geologischen

Kartierungen gehören zum Stand der Technik. Die digitale Zukunft bringt den regulären Einsatz von Tablet-Computern für die automatische und analytische Charakterisierung des Gebirges vor Ort mit sich. Die durch eine hochauflösende Kamera gewonnenen Fotos können direkt am Tablet skaliert und georeferenziert werden und dienen als Grundlage für die geologische Kartierung. Fotogrammetrische Techniken erlauben die direkte Übertragung der Daten mittels WiFi in Echtzeit auf das Tablet. Mit einem Digitalisierungsstift auf dem Foto ergänzte Informationen geben später Auskunft über mögliche dreidimensionale geologische Strukturen. Des Weiteren sollen in näherer Zukunft die Verwendung von Videogrammetrie zur Datengewinnung und -aufbereitung sowie der Einsatz von „Mixed-Reality-Brillen“ für die Erweiterung der realen Welt mit kontextsensitiven Zusatzinformationen (z.B. Messergebnissen) in Form von virtuellen Daten in Echtzeit möglich sein [4, 24].

Die Prognose des zu erwartenden Überprofils erfolgte beim Erkundungsstollen Wolf 2 des Brenner Basistunnels mit dem dafür zur Auswertung entwickelten Tunnel Control System (TCS). Die Abschlagsprognose des folgenden Tunnelabschnittes sowie deren Optimierung basieren auf der geometrischen Analyse der vorhergehenden Abschlüge durch den 3D-Laserscanner bei mittlerweile bekannten geologischen Verhältnissen. Es handelt sich somit um eine statistische Auswertung vorangegangener Abschlagsaufnahmen unter Berücksichtigung der geologischen Dokumentation durch den Tunnelgeologen. Bei gleichbleibenden geologischen Gebirgsverhältnissen ist bereits nach etwa fünf bis zehn Abschlügen die Erstellung einer Abschlagsprognose möglich. Das Analyseprogramm TCS entspricht einem Lernprozess und wird mit zunehmenden Messdaten entlang des Tunnelvortriebs hinsichtlich der Ausbruchprognose genauer. Abbildung 5.11 zeigt den Vergleich von Tunnelabschnitten des Bauloses Wolf 2 mit und ohne Einsatz des Ausbruchprognosemodells. Der zeitliche Aufwand der Berechnung des Prognoseprofils beträgt etwa 30 Minuten. Das auf Grundlage der Scan-Aufnahme des vorhergehenden Abschlags und unter Berücksichtigung der aktuellen geologischen Ortsbrustdokumentation erstellte Prognoseprofil dient der Optimierung des Sprengbilds. Die digitale Weitergabe des Ausbruchprognoseprofils an den Bohroperator ermöglicht durch die Optimierung des Sprengplans (v. a. der Kranzlochpositionen) einen profiltreuen Ausbruch. In weiterer Folge kann durch die Reduzierung der Ausbruchsmenge der Spritzbetonverbrauch gesenkt werden. Der profiltreue Ausbruch gewährleistet eine gleichmäßigere Hohlraumgeometrie, die durch den Auftrag einer einheitlichen Spritzbetondecke zu einer Verbesserung der Hohlraumstabilität führt. Die optimierte Tunnelgeometrie führt zu homogeneren Spannungsverteilungen in der Tunnelschale und dadurch zu einer Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Bauwerks. Die durch 3D-Laserscanning unterstützte Ausbruchprognose beim Sprengvortrieb schafft somit höhere Vortriebsleistungen bei gleichzeitig längerer Lebensdauer des Tunnelbauwerks. Des Weiteren erhöhen Rückschlüsse auf das Ausbruchverhalten an der Ortsbrust auf Grundlage der Ausbruchprognose die Arbeitssicherheit im Tunnel [45].

5.3 Digitalisierung des kontinuierlichen Vortriebs

Der kontinuierliche bzw. maschinelle Tunnelvortrieb erfolgt mittels Tunnelvortriebsmaschinen (TVM). TVM werden im Wesentlichen in Tunnelbohrmaschinen (TBM) und Schildmaschinen (SM) unterteilt. Die Einteilung der TVM sowie deren Funktionsweise sind dem Kapitel 2.5 zu entnehmen. Der Vortrieb mit TVM wird durch einen hohen Mechanisierungs- und Automatisierungsgrad ausgezeichnet und ermöglicht größtenteils eine parallele Ausführung der Arbeitsschritte Ausbruch,

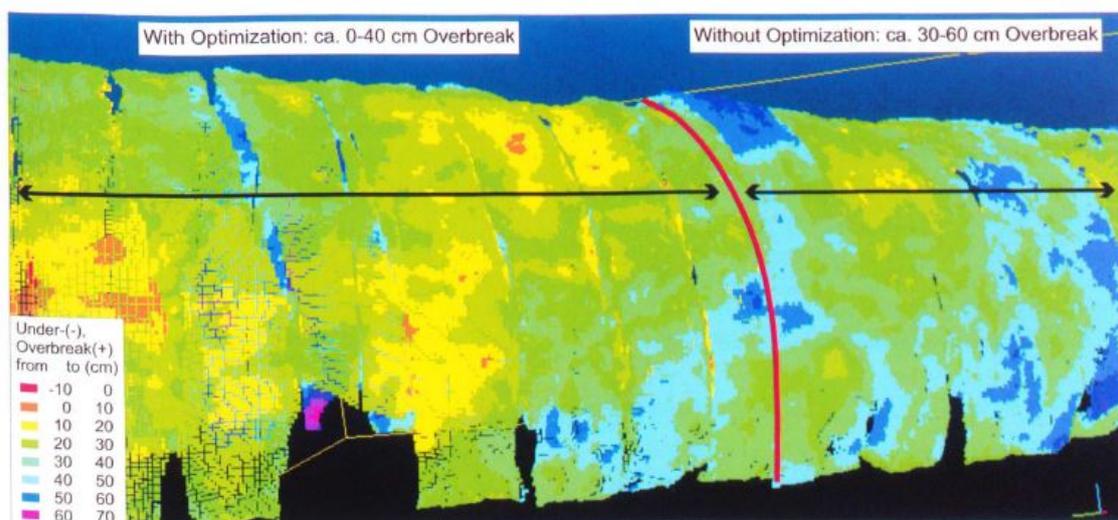


Abb. 5.11: 3D-Konturplot bei einem Testdurchlauf im Zufahrtstunnel Wolf 2: Abweichungen der realen Ausbruchsgeometrie (links) im Vergleich mit der theoretischen, optimierten Ausbruchslinie (rechts) [45]

Laden und Abtransport innerhalb der gewählten TVM. Die Digitalisierung treibt diese bereits weit entwickelte Bauverfahrenstechnik hinsichtlich der folgenden Aspekte weiter voran:

- Optimierung der mechanisierten Prozesse der Vortriebsmaschine,
- Automatisierung der Aufzeichnung vortriebsrelevanter Betriebs- und Vermessungsdaten sowie visuelle Abbildung und Steuerung der Maschinen und Aggregate,
- Automatisierung einer prozessorientierten Steuerung von beispielsweise den Vortriebspresskräften, den Drehmomenten, der Verpressmörtelmenge oder dem Erdstützdruck,
- Automatisierung des Tübbingausbaus [30, 34].

5.3.1 Vortriebsbegleitende Messtechnik im kontinuierlichen Tunnelbau

Die Umsetzung der digitalen Ansätze innerhalb des kontinuierlichen Vortriebs beschäftigt sich unter anderem mit der Gewinnung von Echtzeit-Daten durch die Nutzung des Bohrkopfs als Erkundungswerkzeug. Die dabei gewonnenen Daten und Informationen werden analysiert und bewertet. Sie unterstützen die Prognose des kommenden Vortriebsabschnittes und ermöglichen eine maschinentechnische Anpassung an den gerade zu durchfahrenden Tunnelabschnitt.

Diverse Forschungs- und Pilotprojekte testen in der praktischen Anwendung die Möglichkeit des Einsatzes der Digitalisierung im maschinellen Tunnelbau und analysieren die daraus gewonnenen Erkenntnisse. Im Folgenden wird auf zwei Projekte eingegangen, die durch die Anwendung von digitalen Methoden die Maschinendaten des Bohrkopfs vortriebsbegleitend überwachen, messen und nutzen. Die beiden Projekte sind:

- Erkundungsstollen Baulos Tulfens-Pfons – Brenner Basistunnel und

- EU-Projekt DRAGON.

Erkundungsstollen Tulfes-Pfons - Brenner Basistunnel

Der Brenner Basistunnel (BBT) wird zwischen Österreich (Innsbruck) und Italien (Franzensfeste) den Alpenhauptkamm unterqueren und nach Fertigstellung der längste Eisenbahntunnel der Welt sein. Das Baulos Tulfes-Pfons liegt im österreichischen Abschnitt des BBT und umfasst etwa 40 Kilometer Vortrieb. Es beinhaltet mehrere konventionelle Tunnelvortriebe und einen etwa 15 Kilometer langen Erkundungsstollen(EKS). Der EKS wird mit einer offenen Hartgestein-TBM vorgetrieben, die einen Durchmesser von etwa acht Metern aufweist [16].

Der EKS wird unter den Randbedingungen eines Leistungsvortriebs aufgeföhren und verwendet daher Erkundungsverfahren, die möglichst im Vortrieb integrierbar sind. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen zum einen der Vorauserkundung des EKS-Vortriebs und zum anderen der Erkundung des Haupttunnels. Ortsbrust- und Laibungskartierungen sowie vorauseilende Schlagbohrungen stellen die klassischen geologischen Erkundungsmaßnahmen dar. Die geotechnischen Erkundungen werden neben dem Einsatz von geophysikalischen Erkundungsmethoden durch die versuchsweise Anwendung neuer digitaler Methoden durchgeführt [15]. Folgende zwei vortriebsbegleitende digitale Messtechniken wurden angewendet:

- 3D-Ortsbrustaufnahme durch ein Kamerasystem sowie
- Digitale Messung und Analyse der Parameter der Vortriebsmaschine.

3D-Dokumentation aus dem Bohrkopf durch Installation einer Ortsbrustkamera

Auf Grund des beschränkten Zugangs zur Ortsbrust beim kontinuierlichen Vortrieb ist die geologische Kartierung im Vergleich zum zyklischen Vortrieb (siehe Punkt 5.2.3) weniger fortschrittlich. Eine gemeinsame Forschungsgruppe der Montanuniversität Leoben und der Geodata ZT GmbH entwickelte ein kamerabasiertes Aufnahmesystem um ohne Adaption des Bohrkopfes eine vollflächige Ortsbrustaufnahme zu ermöglichen. Das System wurde in einem über 20-monatigem Einsatz entlang des EKS der Arbeitsgemeinschaft Tulfes-Pfons (Strabag AG und Salini Impregilo S.p.A) getestet.

Das Kamerasystem liefert die digitalen Daten für eine erweiterte geologische Dokumentation und schafft durch eine transparente Ortsbrustaufnahme eine objektive Beurteilung des Ortsbrustzustandes. Das aus einer Steuereinheit und einer oder mehreren leichten Kameraeinheiten bestehende Kamerasystem ist in den Diskengehäusen der TVM montiert. Abbildung 5.12 zeigt die Lage der Steuereinheit in den Diskenkästen der Doppeldisken nahe dem Rotationszentrum des Bohrkopfes und die Installation der Kameraeinheit im Diskengehäuse [58].

Die in Abbildung 5.12 links dargestellte Steuereinheit benötigt einen Anschluss an die Stromversorgung und einen Steuer-PC und beinhaltet einen einachsialen Neigungssensor. Die Bildaufzeichnung startet automatisch bei eingeschalteter Stromversorgung. Die Steuereinheit ermöglicht durch den Aufbau eines WLAN einen Remotezugriff beispielsweise auf die Datenübertragung auf das Smartphone. Die Frequenz der Bildaufnahme wird über den Steuer-PC geregelt und gewährleistet durch redundante Aufnahmen selbst bei schlechten Sichtverhältnissen genügend Datenmaterial, das automatisch während der fotogrammetrischen Prozessierung ausgesucht wird. Simultan zur Bildaufnahme erfolgt die Aufnahme des Neigungswerts des einachsialen Neigungssensors in jeder Bilddatei. Das dadurch geschaffene Winkelbezugssystem ermöglicht die Feststellung der 3D-Kameraposition zum Zeitpunkt der jeweiligen Bildaufnahme. Die Anwendung des Kame-



Abb. 5.12: Montage der Steuereinheit in den Diskenkästen der Doppeldisken (links) und Installation der Kameraeinheit im Diskengehäuse (rechts) [58]

rasystems findet vor allem gemeinsam mit nebenläufigen Tätigkeiten des Vortriebs, wie z.B. Bandverlängerungen und Vorauserkundungsbohrungen, statt. Die Montage der Kameraeinheiten in den Diskenkästen sowie eine 360°-Aufnahme benötigen im Regelfall neun bis zwölf Minuten. Der Abstand von der Ortsbrust sowie der Öffnungswinkel der Kameraeinheit bestimmen die erforderlichen Kamerafahrten für die vollflächige Aufnahme der Ortsbrust. Die Aufzeichnung von etwa 700 bis zu 1100 Bildern (bei vier bzw. fünf Diskengehäusen) werden in etwa 20 bis 45 Minuten von einem Desktop-PC zu einer dreidimensionalen Abbildung der Ortsbrust verarbeitet. Die benutzte Software (Photoscan von Agisoft LLC) ermöglicht eine automatische fotogrammetrische Prozessierung, welche für die Ausgabe von Orthofoto und 3D-Rekonstruktion keine Nutzerinteraktion erfordert [58].

Die digitale Ortsbrustaufnahme erleichtert die geologische Charakterisierung der Ortsbrust. Die elektronisch entstandene 3D-Rekonstruktion macht Ausbruchstiefen und -volumina sowie Raumstellungen von Diskontinuitäten sicht- und messbar. Auswertungen mittels CAD-Software wie AutoCAD bzw. Civil3d von Autodesk verwenden das dwg-Datenformat und ermöglichen die Erstellung von Geo-Referenzen der Punktwolken. Plugins auf Basis der .NET-API von AutoCAD ermöglichen die Erstellung von Lagekugelprojektionen von Trennflächen. Abbildung 5.13 zeigt einen etwa 8 m^3 großen Ausbruch in der Ortsbrust. Die Tiefe des Ausbruchs wird über den Maßstab farbkodiert dargestellt. Auf Grund von Staubvorkommen während der Aufnahme weist die 3D-Rekonstruktion Fehlstellen auf. Rechts zeigt die Abbildung 5.13 den Ausbruch als monochromes Orthofoto [58].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der über 20-monatiger Einsatz des installierten Kamerasystems beim Vortrieb des EKS Tulfens-Pfons die Praxistauglichkeit sowie die Vorteile der Anwendung einer digitalen Ortsbrustdokumentation gezeigt hat. Der Freiraum in den Diskengehäusen neben der Diske ist ausreichend für eine erfolgreiche Montage des Kamerasystems. Die digitale Ortsbrustdokumentation ermöglicht eine quantifizierbare Charakterisierung von Merkmalen wie Ausbrüchen und deren Tiefe sowie Trennflächen. Sie schafft eine höhere Objektivität und Transparenz zwischen Auftraggeber und -nehmer. Hochaufgelöste Orthofotos (> 200 Megapixel) ermöglichen einen bei herkömmlicher manueller geologischer Kartierung nicht erreichbaren Detaillierungsgrad [58].

Einsatz des Bohrkopfs als Erkundungswerkzeug

Die geotechnische Erkundung entlang des Erkundungsstollen Tulfens-Pfons des Brenner Basistunnels verwendet den Bohrkopf als Erkundungswerkzeug. Die eingesetzte offene Hartgestein-TBM weist einen Abstand von ca. fünfeinhalb Metern zwischen der Ortsbrust und dem Stützmittelbau-

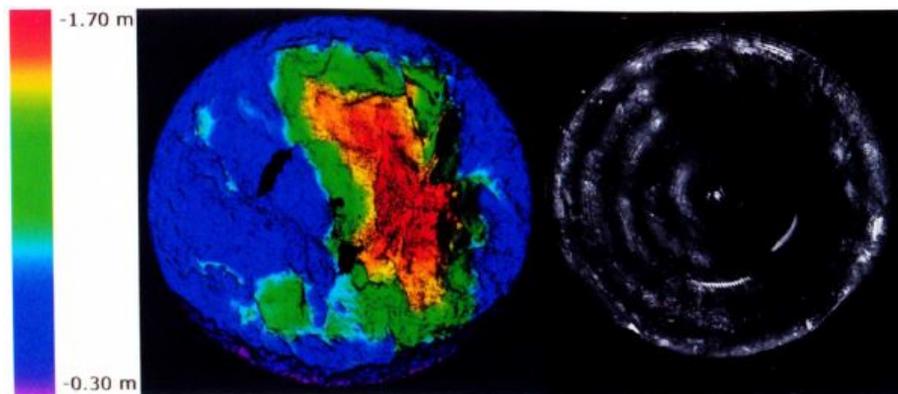


Abb. 5.13: Ca. 8 m^3 großer, entsprechend dem Abstand zwischen Bohrkopf und Ortsbrust farbkodierter Ausbruch (links) und Darstellung als monochromes Orthofoto (rechts) [58]

bereich A1 auf. Diese Distanz ermöglicht eine Vorlaufzeit, in der die erforderlichen Stützmittel in Abhängigkeit der aufgezeichneten Maschinenparameter abgeschätzt werden können. Die Korrelation zwischen den geologisch-geotechnischen Verhältnissen und den Maschinenparametern erlaubt die Identifikation geologisch-geotechnischer Homogenbereiche auf Basis ausgewählter Vortriebsparameter. Eine umfangreiche Analyse der verfügbaren Parameter der TBM hat ergeben, dass zur optimalen Bestimmung von geologischen Schwächezonen das Drehmoment und der abgeleitete Parameter „rotatorische spezifische Energie“ herangezogen werden können. Der rotatorische Anteil der spezifischen Energie entspricht dem spezifischen Energieaufwand für den Abbauprozess. Dadurch gleicht er dem passiven Gewinnungswiderstand und steht somit in direktem Verhältnis mit den geologischen-geotechnischen Verhältnissen an der Ortsbrust. Einfach gesagt ist die spezifische Energie mit dem Energieaufwand für den Abbau von einem Kubikmeter Material an der Ortsbrust gleichzusetzen. Der Parameter „rotatorische spezifische Energie“ wird von der Penetration p (mm/rot), dem Drehmoment M (MNm) und dem Ausbruchsdurchmesser d (m) beeinflusst [15, 46].

Abbildung 5.14 zeigt an Hand des Beispiels einer Störungszone des Erkundungsstollens den Zusammenhang zwischen ausgewählten Maschinenparametern und der Identifikation der geologischen Schwächezone. Die Grafik verdeutlicht die Abnahme der spezifischen Energie unter den (projektspezifisch ermittelten) Grenzwert von 20 MJ/m^3 innerhalb der Störungszone bei nahezu gleich bleibender Penetration von zehn mm/Umdrehung. Es zeigt sich, dass das Drehmoment und dementsprechend auch die rotatorische spezifische Energie bei gleichbleibender Penetration in Bereichen geologischer Schwächezonen abnimmt [15, 46].

Auf Grund des Einflusses der Schildreibung können die Vortriebskraft und der translatorische Anteil der spezifischen Energie nur unzureichend als Erkundungsparameter verwendet werden. Beide Parameter sollten in Störungszone abnehmen, können jedoch bei ausgeübten Druck vom Gebirge auf das Schild durch die zunehmende Schildreibung negativ beeinflusst werden [15].

Analog zu der Auswertung der Vortriebsparameter der TBM wurden während den Erkundungsbohrungen (durch im A1-Bereich fest montierte Bohrlafetten) Daten des Bohrdatenschreibers ausgewertet. Abbildung 5.15 zeigt beispielhaft aus dem Datensatz des Bohrdatenschreibers einer 83 Meter langen Vorausböhrung abgeleitete Bohrparameter, wie die spezifische Penetration

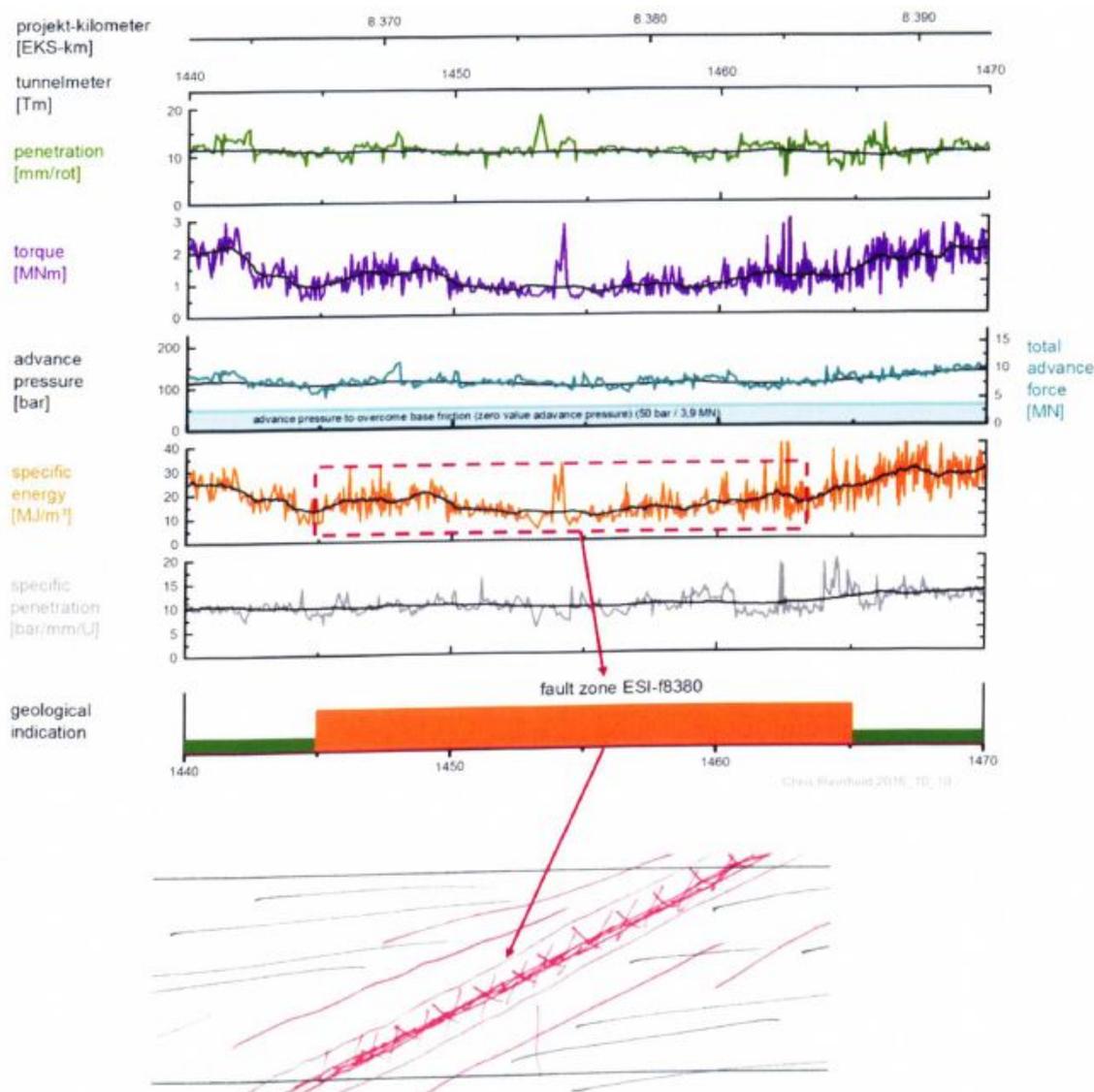


Abb. 5.14: Störungszone ESI-f8380 – ausgewählte Maschinenparameter und geologische Skizzierung der Störungszone [46]

und spezifische Energie. Die überlappenden kernlosen Drehschlagbohrungen in der Länge von 40 bis 100 Metern werden als Vollbohrungen ausgeführt und zur geologischen Beurteilung des Gebirges ausgewertet. Neben der Auswertung des Bohrdatenschreibers zieht der Vortriebsgeologe aus der Analyse des durch die Wasserspülung rücklaufenden Bohrkleins und der Messung der Nettobohrzeit pro Bohrstange Rückschlüsse auf die anstehenden Gesteine. Des Weiteren findet eine Kamerabefahrung nach Fertigstellung der Bohrung zur Erkundung statt [15, 16].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass spezifische maschinentechnische Parameter der TVM erfolgreich zur vortriebsbegleitenden Identifikation von geologisch-geotechnischen Schwäche zonen eingesetzt werden können. Des Weiteren können eine Analyse der gewonnenen Daten sowie die daraus abgeleiteten Erkenntnisse eine Optimierung des Stützmitteleinbaus sowie der für den folgenden Abschnitt benötigten Vorauserkundungen bezwecken. Kostenoptimierung und Zeitersparnis sind positive Folgeerscheinungen [46].

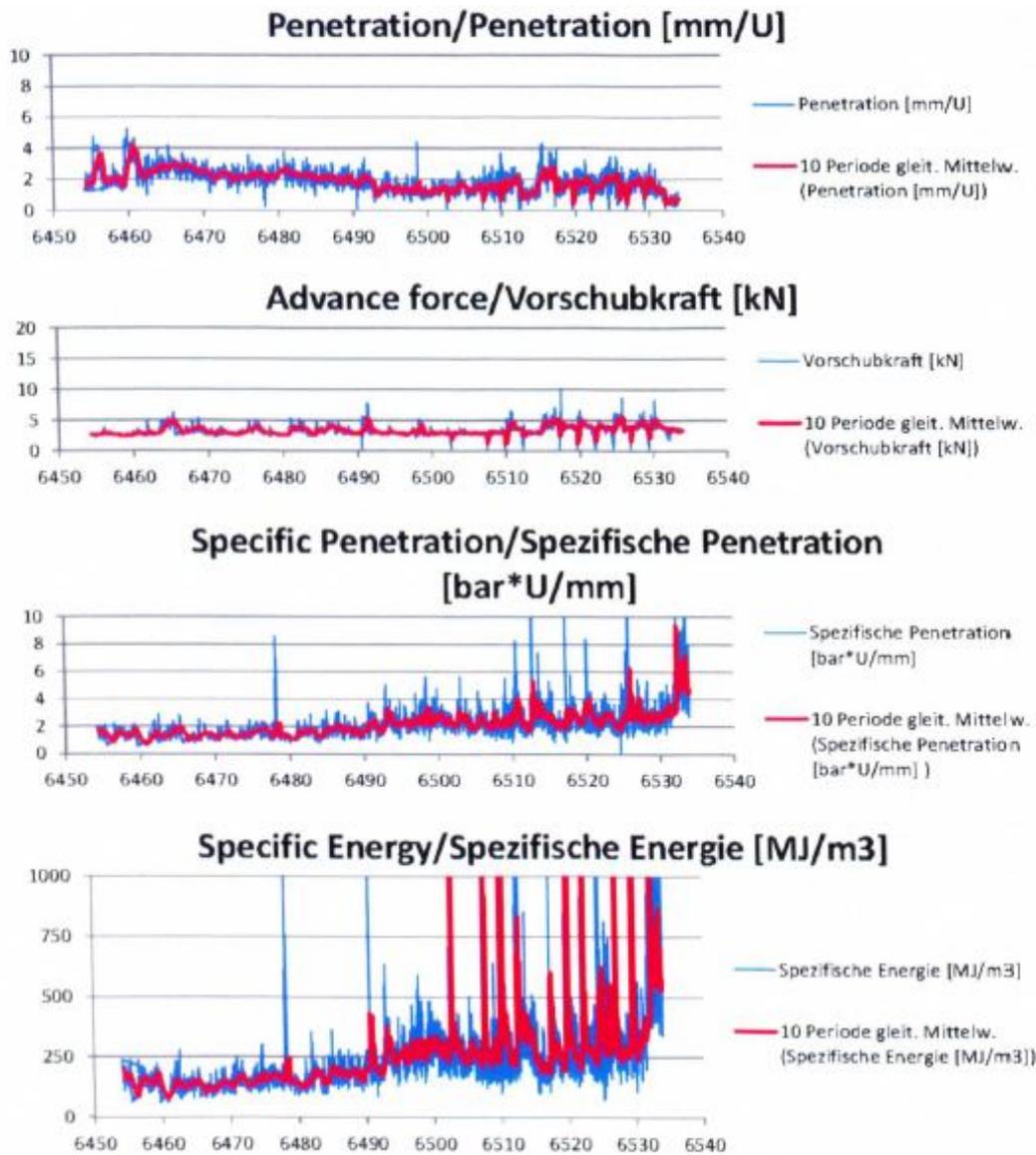


Abb. 5.15: Aus dem Datensatz des Bohrdatenschreibers abgeleitete Bohrdaten einer 83 m langen Vorausböhrung [16]

EU-Projekt DRAGON – Ressourceneffizienter Tunnelbau

Eine hochwertige und vollständige Wiederverwertung des Tunnelausbruchmaterials würde den Tunnelbau hinsichtlich seiner Ressourceneffizienz maßgeblich steigern und zukünftige Zugangsbeschränkungen von Sand- und Kieslagerstätten umgehen. Die Umsetzung muss eine wirtschaftliche Aufbereitung vorsehen und den Bedarf an mineralischen Rohstoffen abdecken. Sollte das Tunnelausbruchmaterial nicht verwertet werden können, so ist es in Form von sortenreiner Ablagerung zu deponieren. Ein weiterer Ressourcenaufwand zur Aufbereitung des Ausbruchmaterials in bestimmten auf Industriemineral spezialisierten Aufbereitungsanlagen soll unterbunden werden [57].

Die Verwendung digitaler Technologien soll höhere Verwertungsquoten des Tunnelausbruchmate-

rials bewirken. Ansatz dafür ist die Digitalisierung vorhandener Materialdaten und die dadurch entstehende Verfügbarkeit ausgewählter Informationen für einen über die Baubranche hinausreichenden Interessentenkreis. Ein web-basiertes Datenbanksystem ermöglicht Interessenten, über einen Online-Zugang relevante Informationen zu konkreten Projekten einzusehen. Während der Erkundungsphase erfolgt die Betreuung der Datenbank durch den Auftraggeber. Mit zunehmendem Projektfortschritt können die Daten und Informationen abhängig vom Bauvertrag weiterhin durch den Bauherrn oder von Seiten des Auftragnehmers aktualisiert werden. Gesetzliche Regelungen müssen einerseits den Zugang und die einzusehenden Daten der webbasierten Datenbank regeln und andererseits auch allgemein die vereinfachte Verwertung des Tunnelausbruchmaterials ermöglichen. Die Weiterverwendung des Ausbruchmaterials beispielsweise für Betriebe der Mineralrohstoffindustrie hätte ein großes Potential, bestehende Lagerstätten zu schonen.

Da die geologische Vorerkundung niemals die tatsächlich anzutreffenden Gebirgsverhältnisse gesamtheitlich abbilden kann, ist die laufende Aktualisierung der Datenbank während des Vortriebs von großer Bedeutung. Dazu soll eine automatische Analyse des Ausbruchmaterials hinsichtlich tatsächlicher chemischer und mineralogischer Zusammensetzung sowie Korngrößenverteilung und Massenstrom stattfinden. Die gewonnenen Informationen werden ständig digital an die Datenbank weitergegeben, die sie sortiert und den Interessenten transparent zugänglich macht. Abbildung 5.16 veranschaulicht die Auslegung des Prototypen des europäischen Projekts DRAGON, welches im 7. Rahmenprogramm für Forschung, Technologieentwicklung und Demonstration Finanzierungsunterstützung von der Europäischen Union erhalten hat. Das Projekt DRAGON ist somit Teil des größten transnationalen Forschungsprogramms weltweit und soll einen zukunftsfähigen, innovativen, ressourceneffizienten Tunnelbau fördern [57].

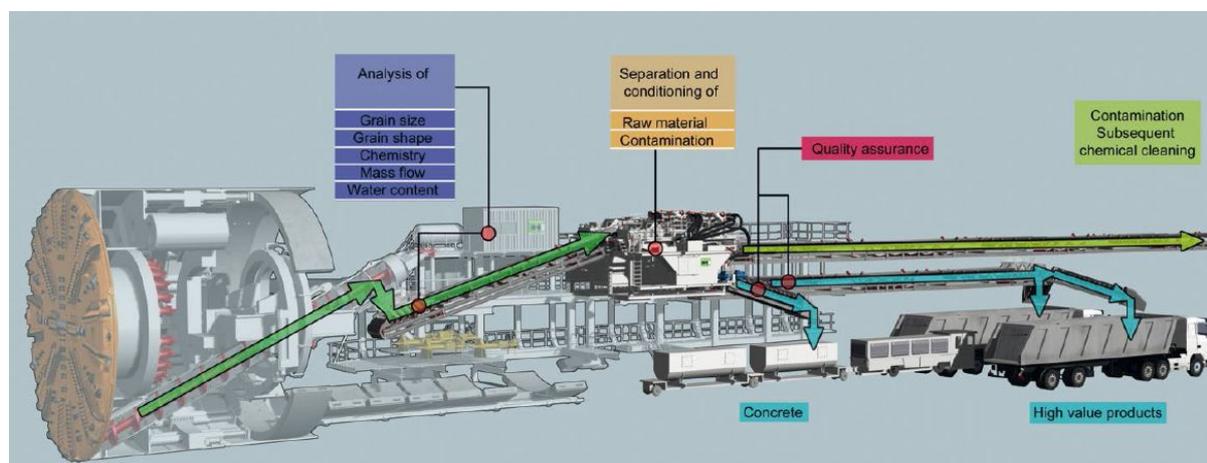


Abb. 5.16: Auslegung des DRAGON Prototypen [57]

5.3.2 Überarbeitung der ÖNORM B2203-2

Die Möglichkeiten der vortriebsbegleitenden digitalen Aufzeichnung und Analyse von Maschinenparametern hat die Diskussion der Einführung von Penetrationsklassen für den Regelvortrieb angestoßen. Grundgedanke dafür ist, die erste Ordnungszahl der Matrix aus ÖNORM B2203-2 (siehe Punkt 3.2.1.2) nach Penetrationsbandbreiten einzustufen.

Im ersten Schritt soll der AG den Tunnel in Vortriebsabschnitte einstufen. Diese legen die charakteristischen, für die Ermittlung einer Vortriebsgeschwindigkeit relevanten Parameter je

Vortriebsabschnitt für einen Regelbetrieb mit Rechenwert und Standardabweichung fest. Die Vortriebsabschnitte entsprechen normalerweise den geologischen Bereichen und enthalten beispielsweise Angaben zu CAI (Cerchar-Abrasivitäts-Index), Trennflächenorientierung und Bergwasserzutritte. Im zweiten Schritt erstellt der AG die Vortriebsklassifizierung. Die Einteilung der Matrix je Vortriebsabschnitt erfolgt ähnlich dem System der ÖNORM B2203-1, ist inhaltlich jedoch nicht vergleichbar. Abbildung 5.17 zeigt die Einstufung nach Penetrationsbandbreiten. Die

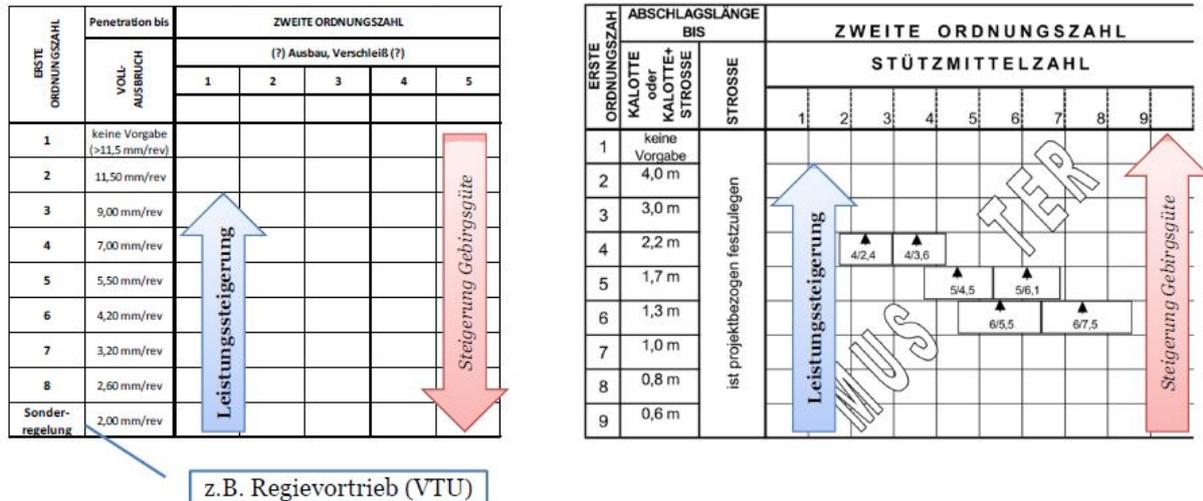


Abb. 5.17: Vergleich der Penetrationsbandbreiten-Einstufung für die 1. Ordnungszahl (rechts) mit der Matrix aus ÖNORM B2203-1 (links) [29]

Einteilung erfolgt auf Basis einer „Norm-Maschine“ und eines vom AG gewählten Prognosemodells. Die „Norm-Maschine“ muss folgende Parameter aufweisen:

- Meißelringdurchmesser [mm],
- Schneidringbreite [mm],
- Schneidspurabstand [mm],
- Meißelandruckkraft 80% [kN].

Der Zusammenhang zwischen Penetration und der „Norm-Maschinenparameter“ ist folgender: Die Penetration ist umso größer je kleiner Meißelringdurchmesser, Schneidringbreite und Schneidspurabstand sind und höher die Andruckkraft ist.

Im Zuge der Ausführung müssen AG und AN die tatsächlich zum Einsatz kommende Maschine definieren und ihre Abweichungen gegenüber der „Norm-Maschine“ feststellen. Der Umrechnungsfaktor f_k sollen dies rechnerisch berücksichtigen. Die Auswirkungen der tatsächlich vor Ort auftretenden Maschinenparameter auf die Klassifizierung sollen durch AG und AN gemeinsam festgestellt werden. Die Berücksichtigung folgender Faktoren für die Klassifizierung sind derzeit vorgesehen:

- Penetration
 - falls vorhanden Maschinenaufzeichnungen oder

- erforderlichenfalls über Rückrechnung (Hubdauer, Drehzahl);
- Maschinenauslastung (Andruckkraft)
 - gemäß Maschinenaufzeichnungen;
- Umrechnungsfaktor f_k [29].

Für die erfolgreiche Umsetzung ist eine Eichung der Maschine zu Beginn des Vortriebs notwendig. Reibungsbeeinflussende Faktoren wie das Schild müssen herausgerechnet und die tatsächlich am Meißel umgesetzte Kraft muss festgestellt werden. Die Klassifizierung des Regelvortriebs zieht ausschließlich Hübe heran, in denen die Maschine zwischen 60 und 100% ausgelastet (Andruck) betrieben und die Drehzahl nahezu konstant gehalten werden kann. Der Penetrationswert für die Klassifizierung wird über die Formel 5.1 berechnet. Die Formeln für die Berechnung des Umrechnungsfaktors f_k für die Korrelation der tatsächlichen Maschinenausstattung zur „Norm-Maschine“ müssen noch definiert werden. Formel 5.1 berücksichtigt den Penetrationswert für die Klassifizierung p_{klass} , den Penetrationswert gemäß Maschinenaufzeichnung p_{tats} , den Umrechnungsfaktor f_k und die tatsächliche Auslastung der Maschine (Andruck) gemäß Maschinenaufzeichnung A [29].

$$p_{klass} = \frac{p_{tats} \cdot f_k \cdot 0,80}{A} \quad (5.1)$$

Die Klassifizierung auf Grundlage von Penetrationsklassen erfolgt zeitnahe auf Basis von Maschinendaten und erfordert somit keine Sachverständigen durch Vertreter des AG und des AN. Die Bandbreitenangabe in jeder Penetrationsklasse deckt geringfügige Änderungseinflüsse ab und bildet die Unsicherheit der geologischen Prognose fair im Vertrag ab [29].

Das Vergütungssystem gilt für einen Regelvortrieb. Für folgende Erschwerisse sind Sonderregelungen in Form von Leistungsreduktionen und Regiepositionen zu regeln:

- Hoher Verschleiß
- Klebrigkeit
- Mixed Face
- Gewaltschäden
- Blockigkeit
- Verspannbarkeit

Die Begriffe „Regelvortrieb“ und „Regellösevorgang“ müssen in der ÖNORM B 2203-2 definiert werden. Des Weiteren müssen die Berücksichtigung anderer Bodenverhältnisse (Lockergestein) und die notwendige Spezifikation der „Norm-Maschine“ festgelegt werden.

Die zweite Ordnungszahl könnte je nach TBM-Typ unter anderem die Faktoren Ausbau (Tübbing, Ringspaltverfüllung, Stützmittel), Betriebsmodus, Verspannbarkeit, GVT in der Matrix abbilden [29].

Kapitel 6

Diskussion

Die Digitalisierung des Baubetriebs im Tunnelbau verfolgt das Ziel einer optimierten Planung und Ausführung, die in weiterer Folge eine effiziente Erhaltung und Nutzung des Bauwerks ermöglichen. Die Aspekte der Digitalisierung beeinflussen somit die Gesamtheit der Bauprozesse und verändern ganzheitlich die bisherige Abwicklung von Tunnelbauprojekten. Die Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau sieht den Einsatz neuer autonom arbeitender Technologien vor, die sich selbst organisierende Systeme schaffen. Die Vernetzung und Synchronisation bisher voneinander getrennter Prozesse sowie die elektronische Sammlung, Analyse und Bewertung von prozessinternen Daten führen zu einer Eigenoptimierung des digitalen Netzwerks und zu einer Produktivitätssteigerung. Es entsteht ein sich selbst steuerndes System, das physische und virtuelle Elemente miteinander vereinigt und durch einen digitalen Zugang jederzeit greifbar ist.

Building Information Modeling (BIM) ist ein wichtiger Bestandteil der Digitalisierung im Tunnelbau und begleitet als eine neue, integrative und digitale Arbeitsmethode alle Lebenszyklusphasen eines Tunnelbauwerks. BIM vereint in sich alle Ansätze der Digitalisierung und wird die bisherige Tunnelbauabwicklung revolutionieren. Deswegen wird in diesem Kapitel vorrangig auf die Auswirkungen der Digitalisierung unter der Federführung von BIM eingegangen. Die folgenden Abschnitte werden die mit BIM einhergehenden neuen Arbeitsstrukturen, deren Vorteile und Herausforderungen in der Umsetzung sowie eine Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Baubetriebs im Tunnelbau beschreiben und diskutieren.

6.1 Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs

Die Digitalisierung beeinflusst alle Prozesse der Tunnelbauabwicklung. Der digitale Baubetrieb verändert die bisherige Planung, Vorbereitung und Ausführung des Tunnelbauwerks. Abbildung 6.1 zeigt schematisch den elementaren Unterschied zwischen dem klassischen und dem digitalen Ansatz der Projektentwicklung.

Die klassische Durchführung des Tunnelbaubetriebs trennt strikt Planungs- und Ausführungsphase. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass oftmals negative Auswirkungen wie Informationsverluste, Konflikte zwischen unzureichend definierten Schnittstellen sowie Qualitätsmangel bei gleichzeitiger Kostensteigerung und Terminüberschreitung die Folgen des klassischen Konzepts sind. Im Tunnelbau kommt insbesondere erschwerend die unzureichende Kenntnis über den tatsächlich

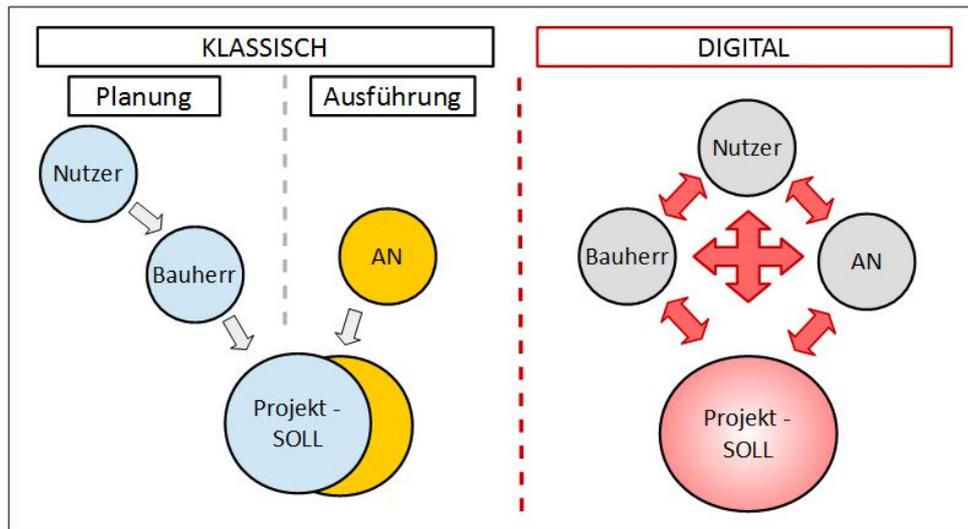


Abb. 6.1: Gegenüberstellung der klassischen und der digitalen Projektentwicklung, adaptiert nach [63]

anzutreffenden Baugrund hinzu, da die Voruntersuchungen jeweils nur einen Einblick in die Geologie des aufzufahrenden Gebirges geben können. Das Antreffen unerwarteter geologischer Bedingungen während der Bauausführung erfordert schnelle Entscheidungen und verhindert die Ausführung auf Basis der ursprünglich festgelegten Planung.

Die Digitalisierung sieht eine partnerschaftliche Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten während des gesamten Baubetriebs vor. Die Planung erfolgt gemeinschaftlich unterstützt durch digitale Technologien und nutzt bereits in der Phase ihrer Entwicklung die Kompetenzen der Ausführungs- und Betreiberseite. Die Arbeitsmethode BIM ermöglicht den Abbau der bisherigen Schnittstelle zwischen Planung und Ausführung und bildet eine transparente Plattform für den Umgang von digitalen Daten und Informationen. Simulationen und Visualisierungen sowie der allgemein interdisziplinäre Ansatz erhöhen die Planungsqualität und -sicherheit in Richtung einer ausführungsfähigen Planung. Des Weiteren ermöglicht der Einsatz von BIM, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, vortriebsbegleitende Simulationen zur Optimierung des Vortriebs während der Bauausführung sowie zur Erhöhung der allgemeinen Arbeitssicherheit.

Abbildung 6.2 zeigt grob die für eine erfolgreiche Projektabwicklung notwendigen Phasen. Die Phasen sind als Zeitabschnitte zu verstehen, in welchen bestimmte Leistungen durch die Projektbeteiligten zu erbringen sind. Im weiteren Kontext wird die Phasengliederung auf die Meilensteine Projektvorbereitung – Planungsphase – Ausführungsphase – Projektabschluss heruntergebrochen. Die Tabellen 6.1 bis 6.4 vergleichen den klassischen und digitalen Tunnelbaubetrieb unter Verwendung des Projektablaufschemas aus Abbildung 6.2. Die Gegenüberstellung zeigt überblicksartig die in den jeweiligen Projektphasen erforderlichen Tätigkeiten sowie auszugsweise deren Auswirkungen. Die Spalte „Neue Aufgaben“ zeigt die durch die Digitalisierung neu geschaffenen Anforderungen an die Projektbeteiligten während der jeweiligen Projektphasen. Die Auflistung verdeutlicht den Mehrwert durch die Digitalisierung des Tunnelbaubetriebs. Die Anwendung von digitalen Techniken unter der Anleitung der Arbeitsmethode BIM nimmt den Gesamtprozess Planen, Bauen und Betreiben ein und erfordert besonders in ihren Anfängen für ihre Umsetzung Aufgeschlossenheit und Motivation aller Projektbeteiligten. Klare Vorgaben und eine vorgegebene Projektstruktur zu Beginn bilden einen Leitfaden und sind Basis für die digitale, interdisziplinäre

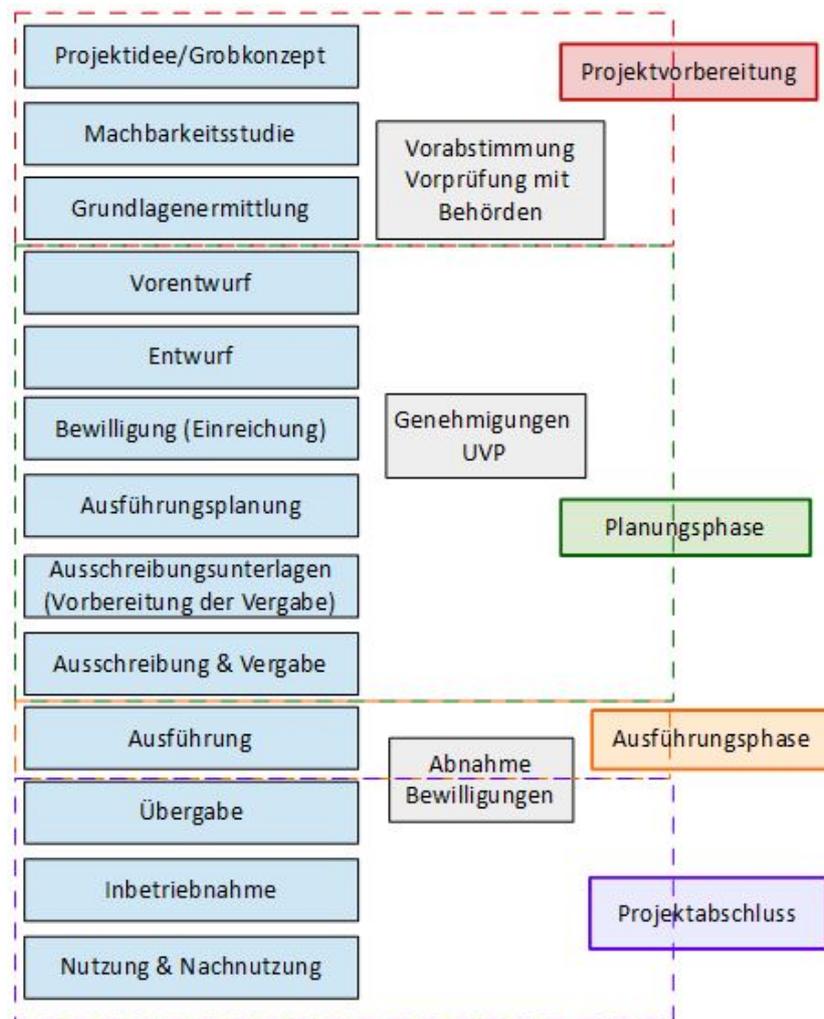


Abb. 6.2: Projektablauf von der Projektidee bis zur Nachnutzung

Projektentwicklung.

Die Literaturquellen „Bauwirtschaft und Bauprojektmanagement 1“, „Management und Abwicklung von Bauvorhaben“, „BIM in der Praxis – Fokus Tiefbau und Infrastruktur“ und „Ablauf der Planung“ [5, 7, 17, 66] wurden zur Erstellung der Tabellen 6.1 bis 6.4 sowie der Abbildungen 6.2 und 6.3 als Hintergrundwissen und Grundlage herangezogen.

Tab. 6.1: Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs während der Projektvorbereitung

PROJEKTVORBEREITUNG		
Klassisch	Digital	Neue Aufgaben
Projektidee/Grobkonzept <ul style="list-style-type: none"> • Definition der Funktion, der Architektur und der Nutzungsdauer des Bauwerks durch den Bauherrn • Feststellung der ökonomischen und ökologischen Projektrahmenbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Angaben zum Betrieb und daraus folgende Vorgaben für die Planung • Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus: Überlegungen hinsichtlich Betrieb, Wartung, Instandsetzung sowie Um- oder Rückbau fließen ein 	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung und Aufzeichnung des Betriebsumfangs sowie der für die Umsetzung erforderlichen Hauptindikatoren • Rahmenbedingungen für Datenstrukturen und Informationsanforderungen • Grundpflichtenheft für den Bauherrn, erstellt von diesem und dem Planer
Machbarkeitsstudie/Grundlagenermittlung <ul style="list-style-type: none"> • Projektzieldefinition (Funktion, Qualität, Termine, Kosten) • Variantenstudie zur Entwicklung des optimalen Modells • Freigabe des optimalen Modells zur Planung → Definition der erforderlichen Leistungsbilder für Planungs- und Beratungsleistungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierte Variantenstudie durch 3D-Visualisierungen und 3D-Simulationen • Interaktionen zwischen 3D-Modell, Tragwerkplanungssoftware und geologischem Baugrundmodell • Interdisziplinarität beschleunigt die Identifikation von Ausschlusskriterien und Problemstellen • Einbezug der Faktoren Zeit und Kosten zur Erstabschätzung der Lebenszykluskosten unterstützen die Entscheidungsfindung 	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit digitaler Arbeitsmethoden zur Erstellung eines 3D-Arbeitsmodells • Qualifikationen des Personals für den Softwaregebrauch und die Anwendung von Plausibilitätsprüfungen auf die Variantenvisualisierungen • Definition der erforderlichen Eingabeparameter des Bauwerks und der Umgebung für den Bau und Betrieb • Zusammenarbeit aller erforderlichen Disziplinen bereits in der Phase der Projektvorbereitung

Tab. 6.2: Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs während der Planungsphase

PLANUNGSPHASE		Neue Aufgaben	
Klassisch	Digital		
Vorentwurf bis Ausführungsplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Das in der Projektvorbereitung ausgewählte Modell wird weiterentwickelt und einer detaillierten Planung und Koordination aller Disziplinen unterzogen (ein gesamtheitliches Modell) • Betrachtung des Lebenszyklus und Verknüpfung des Modells mit den Dimensionen Zeit und Kosten • Modell beinhaltet intelligente Bauteile, die alle Merkmale der Baustoffe abbilden • Automatische Aktualisierung aller mit einer Modelländerung zusammenhängenden Ansichten/Schnitte und Teilprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Planungsqualität und -sicherheit erfordert einen höheren zeitlichen und finanziellen Aufwand in dieser Projektphase • Detaillierte Betrachtung und Planung aller Schnittstellen sowie ihre Darstellung im Modell • Festlegung der Modellparameter für Bau und Betrieb sowie der erforderlichen Informationen • Effizientes Datenmanagement (Aktualisierungen, Zugriffsberechtigungen, Datenaustausch, Zeitplan, Detailtiefe etc.) 	
Ausschreibung & Vergabe	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung zweidimensionaler und bauelementweiser dreidimensionaler CAD-Zeichnungen • Aktualisieren und Zusammentragen aller Planungsunterlagen scheidert auf Grund mangelnder Verlinkungen und unzureichend definierter Schnittstellen • Planung dient als Grundlage für Ausführung und späteren Betrieb • Ermittlung der Errichtungskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Das digitale Modell umfasst die Phasen Planung, Ausführung und Betrieb • Interdisziplinarität führt zu einer genaueren Mengenermittlung und minimiert das Nachtragsmanagement • Kenntnis über den durch Simulationen optimierten Bauablauf und die Auswirkungen des späteren Baubetriebs • Genaue Studie über die Auswirkung von Varianten des Angebots 	<ul style="list-style-type: none"> • Genormte Datenstruktur für das digitale Ausschreibungsmodell • Digitaler Zugang der Bieter während des Angebotszeitraums • Vergabekriterien und Berechnungsmethoden für die digitale Vergabe • Vertragsmodell (nach Erteilung des Zuschlags an den Bieter) ist Basis für die weitere Ausführung und Dokumentation sowie das Controlling

Tab. 6.3: Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs während der Ausführungsphase

AUSFÜHRUNGSPHASE		
Klassisch	Digital	Neue Aufgaben
<p style="text-align: center;">Bauausführung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausführung auf Basis des LV (nur Planung) • Massenänderungen auf Grund der tatsächlich angebotenen Verhältnisse • Terminsicherheiten, da oftmals während der Ausführung Planänderungen anfallen und/oder mehrfach Planverzug herrscht • Nachtragsmanagement auf Grund von mangelnder Schnittstellendefinitionen • Variantenänderungen während der Ausführung können hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Langzeitwirkungen nur unzureichend geprüft werden • Dokumentation erfolgt gemischt manuell und automatisch → Informationsverluste, mangelnde Übersicht, kein einheitlich aktualisiertes Modell 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausführung auf Basis des digitalen Vertragsmodells (Planung, Ausführung und Betrieb) • Variantenstudien, die wegen im Zuge der Ausführung auftretender Probleme notwendig werden, können technisch und wirtschaftlich simuliert und analysiert werden • Arbeitsvorbereitung (Personal, Geräte, Material) ist optimiert • autonome, baubegleitende Überwachung und Erfassung des Fortschritts durch neue Technologien (→ As-Built-Model) • Lieferscheine, Fotos etc. sind direkt im Modell den smarten Bauteilen zuordenbar • Laufende Soll/Ist-Vergleiche verdeutlichen Abweichungen direkt im Modell und behalten die Gesamtbetriebskosten im Auge • Digitale Abrechnung nach einem detailliertem und hochwertigem Modell (Massenechtheit) • Einsatz neuer Technologien wie IoT zur Verknüpfung und Selbststeuerung von Prozessen und Systemen • Echtzeitdatenerfassung zur Optimierung während des Baufortschritts (Beispiel Bohrkopf) → Einsatz von selbstlernenden Algorithmen in Prognosemodellen • Digitale Aufzeichnung der Kennwerte des Ausbruchmaterials sorgt für dessen optimierte Nachnutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Ergänzung der Modellparameter um die im Zuge der Bauausführung festgestellten erforderlichen Varianten • Erstellung und Verwaltung einer fortlaufenden, autonomen baubegleitenden Dokumentation und Abrechnung • Echtzeitdatenerfassung und -verarbeitung während des Baufortschritts für die Live-Anpassung des Modells (→ As-Built-Model) • Effizientes Datenmanagement (Aktualisierungen, Zugriffsberechtigungen, Datenaustausch, Zeitplan, Detailtiefe etc.)

Tab. 6.4: Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs während des Projektabschlusses

PROJEKTABSCHLUSS			
	Klassisch	Digital	Neue Aufgaben
Übergabe & Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Abweichungen des Planstandes und der Dokumentation von dem tatsächlich übergebenen Bauprojekt • Mühsame und intransparente nachträgliche Bestandserfassung von Mengen und Massen • Unzureichende Mängelzuordnung und -verfolgung • Unzureichende Kenntnis über den tatsächlichen Betriebsverlauf und die daraus erforderlichen Maßnahmen und entstehenden Kosten • Unselbstständige Aufzeichnung, Sammlung und Analyse von Betriebsparametern sowie durchgeführten Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Übergabe des As-Built-Modells auf Basis einer Reihe an Qualitätsstandards -> eindeutiges Mengengerüst • Optimierte Betriebs- und Instandhaltungskosten auf Grund der Lebenszyklusbetrachtung während der Planung • Anweisungen für Betrieb und Wartung auf Basis des Modells -> planbare Parameter und Maßnahmen • Kenntnis über Mängel sowie Handlungsanweisungen sind im Modell verankert • Smarte Bauteile ermöglichen auch in dieser Projektphase ein laufendes Monitoring • Digitale Aufzeichnung des laufenden Betriebs erhöht Transparenz und Dokumentationsqualität und schafft Erfahrungen für zukünftige Projekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Ergänzung der Modellparameter um die im Zuge des Betriebs auftretenden Varianten • Erstellung und Verwaltung einer fortlaufenden, autonomen Dokumentation von Mängeln und durchgeführten Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen • Echtzeitdatenerfassung und -verarbeitung während des Betriebs für die Live-Anpassung des Modells zur Optimierung der Bauweise (Wissenszuwachs für zukünftige Projekte) • Effizientes Datenmanagement (Aktualisierungen, Zugriffsberechtigungen, Datenaustausch, Zeitplan, Detailtiefe etc.)

Die Digitalisierung des Tunnelbaubetriebs zeichnet sich durch einen durchgängigen Informationsfluss über alle Projektphasen und eine Nutzung der durch die Anwendung von digitalen Medien gewonnenen Daten zur Optimierung des Bauwerks aus. Essentiell für die digitale Abwicklung ist eine für alle Projektbeteiligten zugängliche Datenbank, welche in Form eines digitalen Informationsmodells alle pro Projektphase anfallenden Informationen und Daten sammelt, sortiert, speichert und analysiert. Der dadurch gewonnene Wissenszuwachs optimiert die Bau-, Planungs- und Betreiberprozesse und aktualisiert das Informationsmodell. Eine begleitende Überwachung und Dokumentation schließt den Kreislauf des digitalen Systems und ermöglicht eine Lernkurve für folgende Bauprojekte.

Der Ansatz der Lebenszyklusbetrachtung benötigt einen erhöhten zeitlichen und finanziellen Aufwand in der Projektphase der Planung, führt jedoch gesamtwirtschaftlich auf lange Sicht betrachtet zu mehr Effizienz in Planung, Bau und Betrieb. Abbildung 6.3 stellt zusammenfassend die wichtigsten Eingriffe und damit einhergehenden Vorteile eines digitalen Tunnelbaubetriebs dar. Die Digitalisierung erfasst dabei – unter Anleitung der Arbeitsmethode BIM – die gesamte Prozesskette der Tunnelbauabwicklung. Die integrierte Gesamtplanung aller Gewerke im digitalen Modell erfordert die frühe Beteiligung und Zusammenarbeit verschiedenster Projektbeteiligter, ist jedoch ausschlaggebend für eine statische, bauphysikalische und energetische Optimierung des Bauwerks. Simulationen und Visualisierungen unterstützen die Entscheidung der Trassenwahl und ermöglichen die Vorwegnahme von Baustellenabläufen oder Nutzungsszenarien.

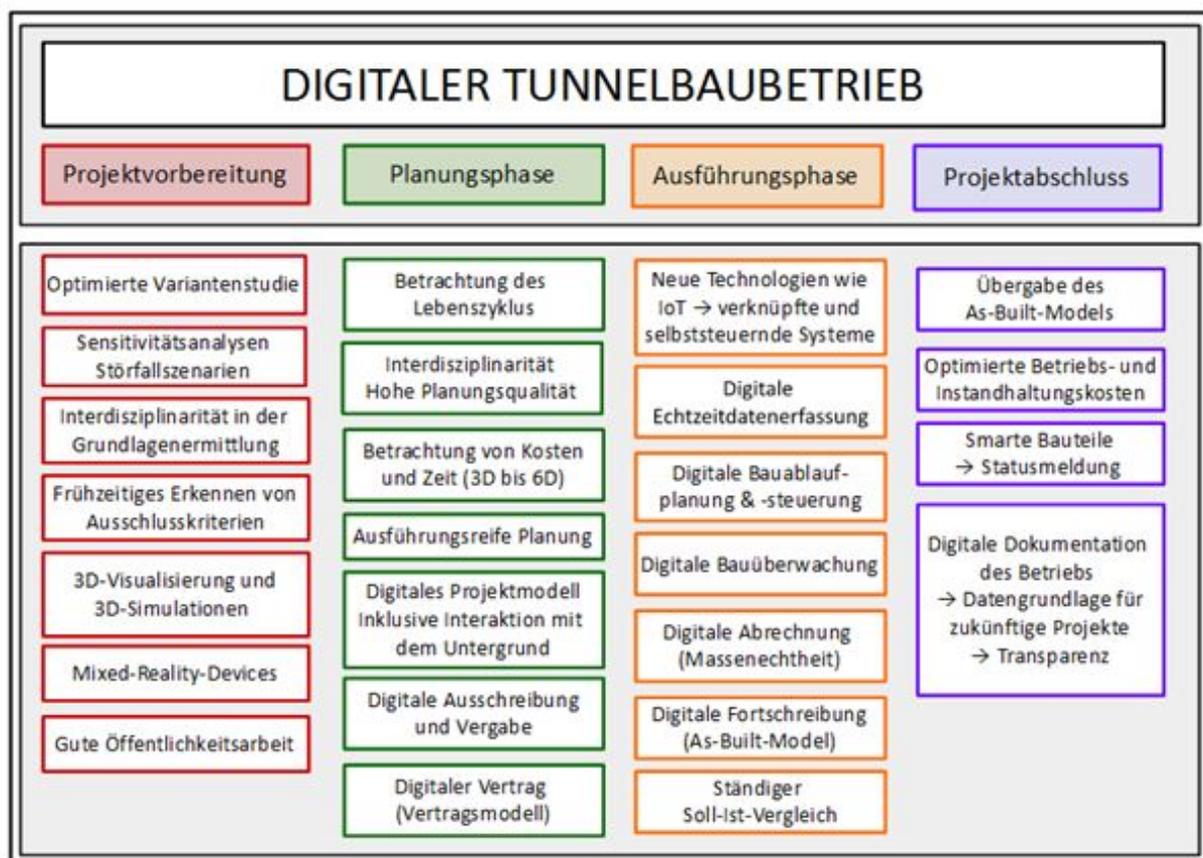


Abb. 6.3: Digitalisierung des Tunnelbaubetriebs von der Projektvorbereitung bis zum Projektabschluss

6.2 Herausforderungen in der Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau

Die Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau ist erst in ihren Anfängen und benötigt noch viele Schritte für ihre vollendete Implementierung im Arbeitsalltag der Projektabwicklung. Arbeitskreise, Forschungsvorhaben und Experten versuchen derzeit in Pilotprojekten die in der Zukunft notwendigen rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen, neuen digitalen Prozesse in Unternehmen sowie die dafür benötigten digitalen Tools und Softwarelösungen zu erarbeiten, zu definieren und schrittweise in die Praxis umzusetzen. Abbildung 6.4 zeigt beispielhaft die derzeitigen Ansätze zur Implementation der Digitalisierung im Arbeitsalltag. Erfahrungen können nur durch Testung in Pilotprojekten gewonnen werden. Ihre Umsetzung findet derzeit statt, wenn auch noch nicht alle Rahmenbedingungen dafür geschaffen wurden. Der Fokus sollte dabei zur Zeit auf die wesentlichen Komponenten gelegt werden ohne Anspruch darauf, dass ein Pilotprojekt sogleich alle Funktionalitäten der Digitalisierung anwendet und abbildet. Die dabei gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse müssen für eine interdisziplinäre Analyse transparent zugänglich sein. Eine offene Diskussion ermöglicht die Gestaltung und Festlegung neuer Geschäftsbedingungen und fördert die Entwicklung neuer Ansätze und Ideen. Die kontinuierliche Verbesserung erfolgt auf Grund der wiederholten Integration von bisher bewährten Maßnahmen sowie der versuchsweisen Ergänzung durch neue Methoden. Die Umsetzung der Verbesserungen in einem neuen Pilotprojekt startet den iterativen Entwicklungsprozess neuerlich. Das wiederholte Durchlaufen des Entwicklungszyklus (siehe Abbildung 6.4) macht die Akteure der Bauindustrie mit der digitalen Arbeitsmethode vertraut und lässt diese in naher Zukunft zum Stand der Technik werden.

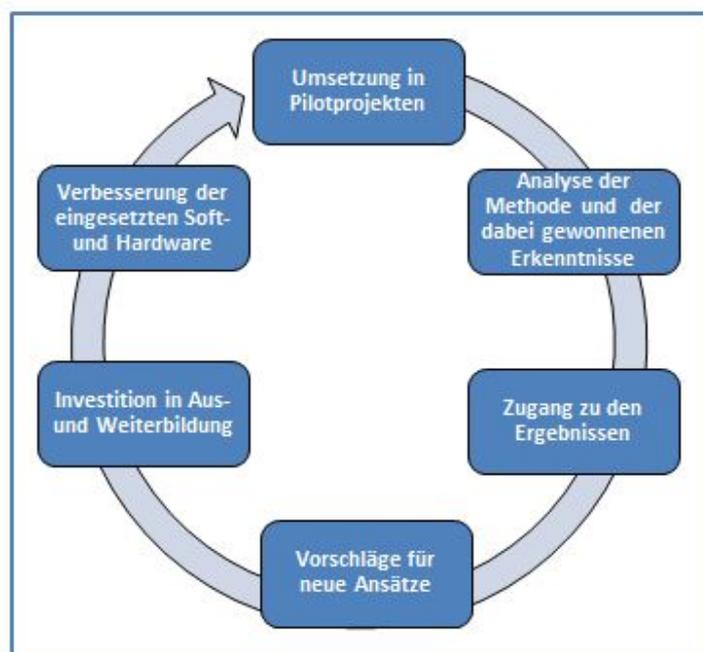


Abb. 6.4: Notwendige Schritte zur Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau

Herausforderungen für die Umsetzung des digitalen Tunnelbaubetriebs stellt derzeit die Entwicklung der erforderlichen Hardware- und Softwareinfrastruktur. Des Weiteren müssen zum

erfolgreichen Einsatz neue unternehmensinterne Strukturen und sich im rechtlichen Rahmen bewegend Methoden geschaffen werden. Die Digitalisierung erfordert somit ein neues Qualifikationsprofil der Beteiligten an Projekten der neuen Technologien und ändert grundlegende Strukturen des Arbeitsumfelds. Tabelle 6.5 zeigt Hard- und Softskillanforderungen der Führungskräfte und Mitarbeiter für eine optimale Umsetzung der Digitalisierung in der Projektentwicklung. Die in Zukunft erfolgreiche von BIM geleitete Prozesskette einer modernen Tunnelbauabwicklung benötigt die Investition in Aus- und Weiterbildung. Dies betrifft alle Ebenen – Forschung, Lehre und Arbeitswelt. Auf Grund der spezifizierenden Ausbildung dürfen jedoch nicht das Grundverständnis und der Bezug zum Grundgedanken des Projekts verloren gehen.

Tab. 6.5: Hard- und Softskillanforderungen an die Projektbeteiligten eines digitalen Tunnelbaubetriebs

HARDSKILLS	SOFTSKILLS
<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung von digitalen Plattformen zur Datenverwaltung • Vertragliche Regelung bezüglich Haftungs- und Eigentumsrecht • Qualifikationen zum Umgang mit Software zur Erstellung, Verwaltung und Fortschreibung des Informationsmodells • Spezielles Fachwissen sowie interdisziplinäre Grundlagenkenntnisse (Schnittstellen) • Projektverständnis (Projektziele im Auge behalten) • Lernfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Teamfähigkeit • Aufgeschlossenheit und Lernwilligkeit • Offene und vertrauensvolle Kommunikation

BIM und Datenmanagement

Die Arbeitsmethode BIM ermöglicht einen durchgängigen Informationsfluss aller Projektbeteiligter über alle Phasen der Projektabwicklung. Die Verknüpfung der einzelnen Gewerke von Anfang an sowie die laufende Aktualisierung der Datenbank während des Projektfortschritts benötigen eine einheitliche Datenstruktur. Rechtliche und politische Rahmenbedingungen legen nationale und internationale Standards in Gesetzen, Verordnungen und Normen fest. Sie sollen konkrete Anweisungen für die aktive Umsetzung der Digitalisierung in Bauprojekten in Form eines Stufenplans geben. Umrüst- und Weiterbildungsmaßnahmen müssen auch kleinen Unternehmen die Chance geben, den Sprung zur digitalen Projektabwicklung zu schaffen. Der neue Ansatz Planen, Bauen und Betreiben erfordert rechtliche Regelungen zur wettbewerbsneutralen Einbeziehung von Fachplanern von Projektbeginn an. Einheitliche Grundregeln lassen ein normiertes Modell entstehen, das unabhängig vom Format des Herstellers in andere Software importiert und nach genormten Prüfprotokollen analysiert werden kann. Der verlustfreie Datenaustausch zwischen den Projektbeteiligten wird durch eine Standardisierung von Datenschnittstellen gewährleistet. Die Eingabe von Informationen nach Art, Umfang und Zeitpunkt sowie deren Regulierung hinsichtlich Zugriffs- und Bearbeitungsrecht müssen frühzeitig in einem BIM-Abwicklungsplan zwischen AG

und AN definiert werden. Abbildung 6.5 zeigt ein Organigramm der durch BIM entstehenden Rollenbilder. Hinsichtlich der Terminologie wird auf das Kapitel 4.2.4 verwiesen.

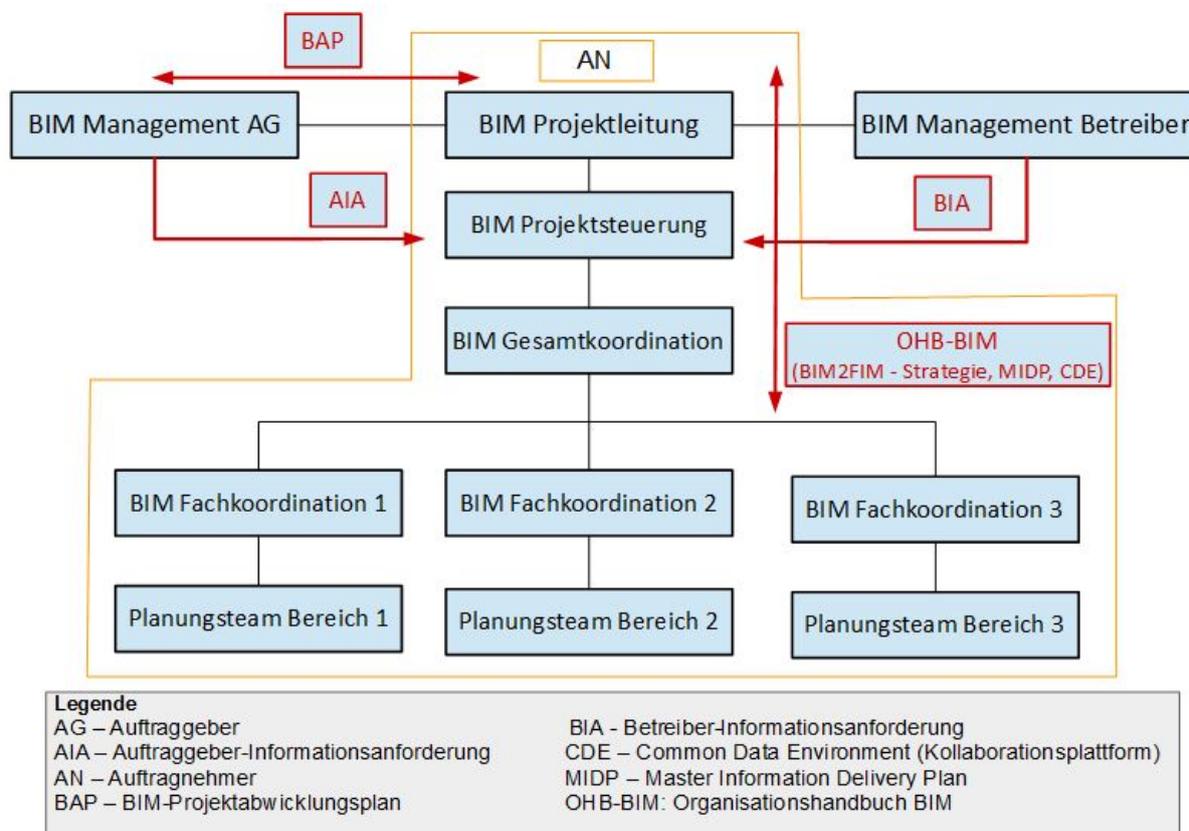


Abb. 6.5: Organigramm der Rollenbilder nach BIM inklusive Weisungsfluss

Zu Beginn der digitalen Projektentwicklung steht die Festlegung der BIA und AIA, sodass Zielvorgaben seitens des AG und des Betreibers für den AN genau deklariert sind. Darauf aufbauend können der BAP als Leitfaden für eine BIM-basierte Zusammenarbeit und das AN-interne Organisationshandbuch-BIM erstellt werden. Auf Basis der vertraglich vereinbarten Bedingungen wird die Datenaustauschplattform errichtet und betrieben. Diese muss allen Projektbeteiligten einen web-basierten Onlinezugriff ermöglichen und muss durch alle Parteien dem Projektfortschritt angepasst werden.

Eine digitale Abwicklung verlangt somit am Beginn nach einer Definition der notwendigen Strukturen und der Anforderungen an den AN durch AG und Betreiber. Modellierungsrichtlinien geben Rahmenbedingungen für die modellbasierte Herangehensweise und fordern somit Modelle zur Visualisierung aller Projektphasen.

Rechtliche Bedingungen sowie IT-Voraussetzungen müssen digitale Plattformen für die Abwicklung von Ausschreibung, Vergabe, Vertrag, baulicher Umsetzung, Abrechnung und Betrieb bereitstellen. Vordefinierte, genormte Datenstrukturen bilden die Basis für eine wettbewerbsneutrale digitale Abwicklung. Die digitalen Prozesse erfordern neu definierte Rollenbilder, Abläufe und Anforderungen an die jeweiligen Parteien. Tabelle 6.6 zeigt überblicksmäßig die wichtigsten Aufgaben der Projektbeteiligten in den unterschiedlichen Phasen einer BIM-Projektentwicklung. Die Aufteilung der Projektphasen erfolgt nach dem in Abbildung 6.2 ersichtlichen Schema. Genau-

re Informationen zu dem digitalen AVVA-Prozess sind in Punkt 4.2.2 ersichtlich. Das Potenzial und die Umsetzung hinsichtlich der Maschinenteknik und IT-Grundlage der baubegleitenden digitalen Optimierung werden im Kapitel 5.1 beschrieben.

Tab. 6.6: Aufgaben der Projektbeteiligten in den unterschiedlichen Phasen einer BIM-Projektentwicklung

	Auftraggeber und Betreiber	Auftragnehmer
Vorbereitung	<ul style="list-style-type: none"> • Auftraggeber-Informationsanforderung (AIA) • Betreiber-Informationsanforderung (BIA) • BIM-Projektentwicklungsplan(BAP) 	<ul style="list-style-type: none"> • BIM-Projektentwicklungsplan(BAP) • Organisationahandbuch BIM (OHB-BIM)
Planung	<ul style="list-style-type: none"> • Bestellung des digitalen Modells vom AN (Vorgabe Datenstruktur) • Reihung und Prüfung der digitalen Angebote • Digitale Erteilung des Zuschlags – Festlegung des Vertragsmodells 	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung und Abgabe des digitalen Angebots (elektronisch zugängliche Produktkataloge etc.) • Vertragsmodell gilt als Grundlage für die weitere Abwicklung
Ausführung	<ul style="list-style-type: none"> • Bezahlung auf Grundlage des fortgeschriebenen Vertragsmodells 	<ul style="list-style-type: none"> • Baubegleitende digitale Überwachung und Fortschreibung des Projekts • Digitale Rechnungslegung (Mengenechtheit, einheitliches Informationsmodell)
Abschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Wartung und Betrieb auf Grundlage des As-Built-Modells • Fortschreibung des As-Built-Modells (Lernkurve für zukünftige Projekte) 	<ul style="list-style-type: none"> • Übergabe des As-Built-Modells

Kapitel 7

Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Fakten und Überlegungen zusammengefasst, die in Kapitel 1.3 definierten Forschungsfragen beantwortet und ein Ausblick zu weiteren möglichen Forschungsthemen gegeben.

Die folgende allgemeine inhaltlich chronologische Zusammenfassung beschreibt die wichtigsten Themenpunkte der Arbeit und stellt Kerngedanken und Ergebnisse kurz vor. Sie baut das Grundverständnis für die Schlussfolgerung und die Beantwortung der Forschungsfragen unter Punkt 7.1 auf.

Am Beginn der Arbeit erfolgt die Auseinandersetzung mit der Nomenklatur des Tunnelbaus. Die Kenntnis über Fachbezeichnungen sowie über die historische Entwicklung der im Tunnelbau angewandten Verfahren und deren Vorgangs- und Wirkungsweisen ist Grundlage für die darauffolgende Beschreibung des klassischen Tunnelbaubetriebs. Der Baubetrieb befasst sich mit der Planung, Vorbereitung und Ausführung von Bauprojekten und verfolgt das Ziel einer wirtschaftlichen Umsetzung der Planung mit angemessener Qualität und Sicherheit. Die direkte Beziehung zwischen Gebirge, Konstruktion und Bauvorgang sowie der Einsatz des Gebirges als Baustoff macht den Tunnelbau zu einer einzigartigen und hochkomplexen Disziplin im Bauwesen. Grundstein für eine erfolgreiche Tunnelbau-Projektanbahnung ist somit die Gebirgsklassifizierung des entlang der Tunneltrasse vorherrschenden Gebirges. Die geotechnische Planung verfolgt dabei das übergeordnete Ziel der Vortriebsklassifizierung, welche nach ÖNORM B 2203-1/2 ein dynamisches Vergütungsmodell für den Untertagebau darstellt. Im Zusammenhang mit der geotechnischen Planung wird das einzusetzende Vortriebsverfahren gewählt, worauf sich die darauffolgende Bauablaufplanung stützt. Diese beinhaltet Bauzeitplanung, Gerätedisposition, Materialdisposition und -bewirtschaftung, Personaldisposition und begleitende Dokumentation. Hauptaugenmerk dieses Arbeitsabschnittes liegt auf den im Tunnelbau spezifischen Prozess der Schutterung, der Arbeitszeitregelung als Dekadenbetrieb und der im Tunnelbau angewandten Beobachtungsmethode, welche eine laufende Anpassung der bautechnischen Maßnahmen an das baubegleitend tatsächlich angetroffene Gebirgs- und Systemverhalten vorsieht. Die Thematik der baugeologischen Dokumentation steht in engem Zusammenhang mit der im Tunnelbau angewandten Vielfalt an Messverfahren. Die Messtechnik begleitet den Baubetrieb im Tunnelbau über alle Phasen und ist Kernelement der baubegleitenden Beobachtung und Einleitung von gegebenenfalls notwendigen gegensteuernden bautechnischen Maßnahmen bei drohender Gefahr. Da die derzeitige technische Entwicklung von Tunnelscannern und Tunnelseismik ihre Funktion und Einsatzmöglichkeiten im Tunnelbau erweitert, werden sie etwas näher beschrieben.

Der zweite große Themenblock der Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen der Digitalisierung auf die Baubranche und im speziellen auf den Tunnelbau. Die Digitalisierung hat die Industrie durch den Einsatz von Technologien und Geräten, die durch virtuelle Computermodelle miteinander interagieren, auf allen Stufen der Wertschöpfungskette revolutioniert. Die digitale Optimierung von Prozessketten führt zu einer Steigerung von Effizienz und Wirtschaftlichkeit bei gleichzeitiger Erhöhung von Flexibilität und Individualisierung. Die digitale Transformation der Prozesse im Bauwesen wird durch vier Hebel vorangetrieben: Digitale Daten, Automation, Netzwerke und Digitaler Zugang. Ein wichtiger Impulsgeber ist die integrative Arbeitsmethode Building Information Modeling (BIM), welche alle Schritte des digitalen Planens, Bauens und Betreibens in sich vereinigt und alle in der Branche tätigen Berufsfelder in Zukunft verändern wird. Herzstück der Methode bildet eine für alle Projektparteien zugängliche web-basierte Datenplattform, die neben den geometrischen Bauwerksdaten auch graphische Daten und Projektinformationen beinhaltet. Das dabei entstehende Informationsmodell ermöglicht durch eine Lebenszyklus-Betrachtung eine hohen Kosten-, Termin- und Qualitätssicherheit bei minimiertem Projektrisiko.

Die reale Umsetzung der digitalen Projektabwicklung erfordert ein Umdenken der Akteure in der Bauwirtschaft und benötigt eine klar vorgegebene Struktur. Der Umbruch vom klassischen zum digitalen Baubetrieb schafft neue unternehmensinterne und -externe Prozesse, die durch einen rechtlichen und politischen Rahmen definiert, reguliert und gesteuert werden müssen. Die mit der Digitalisierung einhergehende Terminologie sowie Rollen- und Leistungsbilder müssen sukzessive durch Musteranwendungen und Pilotprojekte in der Bauwirtschaft umgesetzt und durch eine rechtliche Verankerung zum Standard werden. Wesentlich für eine erfolgreiche schrittweise Implementation ist ein nationaler Forschungsrahmen, der inhaltlich und zeitlich abgegrenzte Vorgaben an Forschungs- und Pilotprojekte richtet. Die Entwicklung und in weiterer Folge der Einsatz neuer Technologien, welche autonom arbeitende, sich selbst organisierende Systeme schaffen, sowie die cyber-physische Vernetzung und Synchronisation bisher voneinander getrennter Aktivitäten fordern die Zusammenarbeit von Maschinentechnik, Informationstechnologie und Bauwirtschaft. Die geforderte durchgängige Datenkette für den verlustfreien Datenaustausch zwischen allen Projektbeteiligten verlangt Standardisierungen von Datenschnittstellen und die Weiterentwicklung und Festlegung von offenen Datenformaten für die zukünftige digitale Bauprojektabwicklung.

Der interdisziplinäre Ansatz des digitalen Planens, Bauens und Betreibens wird derzeit in Forschungs- und Pilotprojekten im Tunnelbaubetrieb getestet und analysiert. Die Umsetzung beschränkt sich zur Zeit in der Regel auf den abschnittweisen Einsatz (z.B. entlang eines Erkundungsstollens) neuer digitaler Technologien während der Bauausführung sowie auf die versuchsweise Verwendung dreidimensionaler Modellierungen von Projekt-Teilobjekten, die phasenweise mit Projektinformationen verknüpft werden und die gesamte Projektabwicklung durchlaufen.

Die Auswirkungen der Digitalisierung des zyklischen Vortriebs sind vor allem in der Optimierung des Sprengvortriebs ersichtlich. Der digital gesteuerte Sprengzyklus, welcher die Prozesse Bohren – Sprengen – Schüttern – Sichern umfasst, zeichnet sich durch einen hohen Roboterisierungs- und Automatisierungsgrad aus. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Einsatz von 3D-Laserscanning für die Erstellung einer Ausbruchsprognose und für die Optimierung des Ausbruchprofils. Das Messverfahren tastet die Tunneloberfläche automatisch in einer 360-Grad-Ansicht ab und erfasst somit in kürzester Zeit die genaue Lage von Millionen Punkten. In Verknüpfung mit geeigneten Softwareprogrammen entsteht aus den gewonnenen dreidimensionalen Daten ein realistisches und praktikables Oberflächenmodell. Das Oberflächenmodell wird zusammen mit der geologischen Ortsbrustaufnahme in einem dafür entwickelten Tunnel Control System (TCS) ausgewertet und dient der Prognose des zu erwartenden Überprofils. Das auf Basis der Scan-

Aufnahme des vorhergehenden Abschlags und unter Berücksichtigung der aktuellen geologischen Ortsbrustdokumentation erstellte Prognoseprofil ermöglicht die Optimierung des Sprengbilds. Die statistische Auswertung durch das Analyseprogramm TCS kann bei gleichbleibenden geologischen Gebirgsverhältnissen nach etwa fünf bis zehn Abschlägen eine Abschlagsprognose erstellen und wird mit zunehmenden Messdaten genauer. Die Optimierung des Sprengplans (v. a. der Kranzlochpositionen) wird durch die digitale Weitergabe des Ausbruchprognoseprofils an den Bohroperator ermöglicht und hat die Reduzierung des Spritzbetonverbrauchs sowie die Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit zur Folge. Die Vortriebsleistung des Sprengvortriebs wird durch die 3D-Laserscanning unterstützte Ausbruchprognose gesteigert.

Die Digitalisierung des kontinuierlichen Vortriebs strebt vor allem eine automatische Aufzeichnung vortriebsrelevanter Betriebs- und Vermessungsdaten an. Die digitale Analyse und Bewertung der Daten und Informationen ermöglichen die Prognose des kommenden Vortriebsabschnittes und führen bei Bedarf zu maschinentechnischen Optimierungen des gerade zu durchfahrenden Tunnelabschnittes. Die Arbeit beschäftigt sich mit der vortriebsbegleitenden, digitalen Aufnahme von Maschinendaten des Bohrkopfs. Dabei wird ein Kamerasystem vorgestellt, das in Diskengehäusen des Bohrkopfs installiert ist und digitale Daten für eine erweiterte geologische Dokumentation aufnimmt. Es ermöglicht die Erstellung von 3D-Rekonstruktionen der Ortsbrust und macht Ausbruchstiefen und -volumina sowie Raumstellungen und Diskontinuitäten sichtbar und messbar. Des Weiteren kann die Aufzeichnung ausgewählter Maschinenparameter (z.B. das Drehmoment und die daraus abgeleitete „rotatorische spezifische Energie“) zur Identifikation von geologischen Schwächezonen herangezogen werden. Die Analyse der Maschinendaten und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse bezwecken beispielsweise eine Optimierung des Stützmitteleinbaus. Die digitale Aufzeichnung von Daten während des Tunnelvortriebs könnte in Zukunft auch eine automatische Analyse des Ausbruchmaterials hinsichtlich tatsächlicher chemischer und mineralogischer Zusammensetzung sowie Kerngrößenverteilung und Massenstrom umfassen. Das europäische Forschungsprojekt DRAGON beschäftigt sich derzeit mit der Umsetzung und der Potenzialanalyse einer Digitalisierung des Ausbruchmaterials. Eine digitale Datenbank soll die Verwertungsquoten des Tunnelausbruchmaterials durch einen web-basierten Informationszugang diverser Interessenten steigern und zu einem ressourceneffizienten Tunnelbau beitragen.

Die digitale Aufzeichnung der Vortriebsmaschinenparameter soll in Zukunft auch im Zuge des Vergütungsmodells der ÖNORM 2203-2 Anwendung finden. Derzeitige Diskussionen betreffen die Schaffung von Penetrationsklassen für die erste Ordnungszahl.

Ein großer Schwerpunkt des zweiten Themenblocks der Arbeit liegt auf dem Einsatz von BIM-Technologien in der Planungs- und Bauphase von kontinuierlich vorgetriebenen Tunnelbauwerken. Das vorgestellte Forschungsbeispiel SMART (Simulation-and-Monitoring-based Assistant for Real-time steering in mechanized Tunneling) des Sonderforschungsbereichs 837 der Ruhr-Universität Bochum stellt die Funktionsweise einer einheitlich referenzierten Datenbank für die nahtlose Kombination von 3D-Geometriemodellierungen, die effiziente numerische vortriebsbegleitende Simulation und die daraus abgeleitete Anpassung von Modell- und Vortriebsmaschinenparametern vor. Die Anreicherung der Datenbank mit Maschinendaten und weiteren Informationen, die während der Bauausführung gesammelt und räumlich und zeitlich in das BIM integriert werden, ermöglichen einen ständigen Soll-Ist-Vergleich des Informationsmodells (Prozesscontrolling). Des Weiteren wird der web-basierte Zugriff auf die Datenbank sowie die Integration von anderen Softwaremodulen in das Informationssystem diskutiert. Beispielsszenarien veranschaulichen den Einsatz und Mehrwert des digitalen Prozesscontrolling-Systems im kontinuierlichen Tunnelbau.

Der dritte und letzte Themenblock der Arbeit setzt sich mit den durch die Digitalisierung (unter Anleitung von BIM) im Tunnelbau neu geschaffenen Arbeitsstrukturen, deren Vorteilen und Herausforderungen in der Umsetzung auseinander. Er zieht einen Vergleich zwischen dem klassischen und dem digitalen Tunnelbaubetrieb und steht im Fokus der für die Arbeit definierten Forschungsfragen.

7.1 Beantwortung der Forschungsfragen

1. Forschungsfrage

Welche Auswirkungen hat die Digitalisierung auf den Baubetrieb im Tunnelbau?

Die Digitalisierung des Tunnelbaubetriebs erfasst alle Phasen der Projektabwicklung. Die digitale Transformation verändert durch die vier Hebel „Digitale Daten, Automation, Netzwerke und Digitaler Zugang“ die Gesamtheit der Tunnelbauprozesse. Impulsgeber ist die neue integrative Arbeitsmethode Building Information Modeling (BIM), die durch ein dreidimensionales digitales Informationsmodell eine lebenszyklische Analyse des Tunnelbauwerks ermöglicht. Herzstück dabei ist eine digitale Datenplattform, die geometrische und semantische Projektinformationen und -daten über alle Projektphasen hinweg speichert, sortiert, analysiert und aktualisiert. Die zeit- und ortsbasierte eindeutige Zuordnung der anfallenden Informationen und Messwerte im Laufe des Projektfortschritts zu den entsprechenden geometrischen Beschreibungen aus der dreidimensionalen Modellierung generieren einen detaillierten Soll- und Ist-Zustand des Tunnelbauwerks. Komplexe Visualisierungs- und Simulationsmodelle geben auf Basis der vortriebsbegleitenden aufgezeichneten Maschinenparameter und Messergebnisse in Echtzeit Anweisungen zur Optimierung des gerade zu durchfahrenden Vortriebsabschnittes und erstellen Prognosen für kommende Vortriebsabschnitte. Näheres zu der digitalen vortriebsbegleitenden Messtechnik im kontinuierlichen Tunnelbau sowie zum Einsatz BIM-basierter Technologien wird ausführlich in den Abschnitten 5.1 und 5.3.1 erläutert.

Der Einsatz von BIM im Tunnelbaubetrieb aktiviert alle Hebel der digitalen Transformation (siehe Punkt 4.2.1) und verspricht eine hohe Kosten-, Termin- und Qualitätssicherheit bei minimiertem Projektrisiko. Der interdisziplinäre Ansatz des digitalen Planens, Bauens und Betriebens bringt eine Reihe an Vorteilen, die im Punkt 4.2.3 ersichtlich sind.

Die gesamtheitliche Veränderung der Bauprozesse durch die Digitalisierung erfordert ein Umdenken und Umschulen aller Akteure der Bauwirtschaft. Die reale Umsetzung der digitalen Arbeitsmethoden im Tunnelbau erfordert klar vorgegebene Arbeitsstrukturen, definierte Schnittstellen und Aufgabenverteilungen sowie eine Informationstechnologie und Maschinenteknik, deren Entwicklungsstand den technischen Anforderungen gerecht wird.

2. Forschungsfrage

Wie schaut eine von BIM geleitete Prozesskette einer modernen Tunnelbauabwicklung aus? In welchen Phasen und durch welche Parteien greift BIM in den Projektlauf ein?

Kapitel 6.1 beschreibt die durch BIM angeleitete digitale Abwicklung des Tunnelbaubetriebs. Abbildung 6.1 auf Seite 132 verdeutlicht die partnerschaftliche Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten, die durch den gesamtheitlichen digitalen Ansatz von Planen, Bauen und Betreiben

Schnittstellen abbaut und Transparenz fördert. Die integrierte Gesamtplanung aller Gewerke im digitalen Modell erfordert die frühe Beteiligung und Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen und ist Basis für die Lebenszyklusbetrachtung des Tunnelbauwerks. Die Tabellen 6.1 bis 6.4 zeigen unter Anwendung des Projektablaufschemas aus Abbildung 6.2 auf Seite 133 die Prozesskette einer modernen Tunnelbauabwicklung und die dadurch neu entstehenden Aufgaben in den jeweiligen Projektphasen.

Die BIM geleitete Prozesskette lässt neue Rollen- und Leistungsbilder sowie ein Reglement an Aufgabenbeschreibungen entstehen. Die Terminologie dafür ist unter Punkt 4.2.4 ersichtlich. Tabelle 6.6 zeigt die wichtigsten Aufgaben der Projektbeteiligten in den unterschiedlichen Phasen einer BIM-Projektentwicklung. Abbildung 6.3 auf Seite 138 veranschaulicht zusammenfassend durch welche digitalen Methoden die verschiedenen Projektphasen beeinflusst werden. Der digitale Tunnelbaubetrieb zeichnet sich durch einen durchgängigen Informationsfluss aus, der über eine web-basierte Datenbank abgewickelt wird. Der Einsatz digitaler Technologien zur Synchronisation und Verknüpfung selbststeuernder Systeme und der Wissenszuwachs aus der digitalen Echtzeitdatenerfassung optimieren die Ausführungsphase.

3. Forschungsfrage

Welche Aufgaben zur optimalen Umsetzung der Digitalisierung in der Projektentwicklung erwarten die Projektbeteiligten?

Die Digitalisierung des Tunnelbaubetriebs bedarf einer strategischen Herangehensweise und erfordert Kompetenzen der Projektbeteiligten in den Bereichen der neuen digitalen Technologien. Tabelle 6.5 zeigt beispielhaft die Hard- und Softskillanforderungen an die Führungskräfte und Mitarbeiter. Neben den Anforderungen an das Personal ändern sich auch die Strukturen innerhalb des Arbeitsumfeldes und der allgemeinen Unternehmenskultur. Abbildung 6.5 auf Seite 141 zeigt ein Organigramm der durch BIM entstehenden Rollenbilder. Hinsichtlich der Terminologie wird auf das Kapitel 4.2.4 verwiesen.

Die Umsetzung der Digitalisierung des Tunnelbaubetriebs steht derzeit an ihren Anfängen und erfolgt sukzessive vor allem durch Pilotprojekte. Abbildung 6.4 auf Seite 139 zeigt die notwendigen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung digitaler Technologien im Tunnelbaubetrieb. Die Entwicklung der erforderlichen Soft- und Hardware sowie die Erarbeitung und Definition rechtlicher und politischer Rahmenbedingungen erfolgt derzeit durch Arbeitskreise, Forschungsvorhaben und Experten. Das Ziel dabei ist die Integration digitaler Arbeitsmethoden im Alltag der Tunnelbauabwicklung, sodass sie letztendlich zum neuen Stand der Technik wird. Abschnitt 4.2.2 beschreibt Handlungsempfehlungen für eine erfolgreiche Umsetzung eines digitalen Tunnelbauprojekts. Derzeitige Diskussionen, wie beispielsweise unter Punkt 5.3.2 ersichtlich, verdeutlichen den Mehrwert des digitalen Tunnelbaubetriebs und versuchen dessen notwendige Eingliederung in bestehende Verordnungen und Normen durchzusetzen. Durch die Aktualität der Thematik steht die Umsetzung der Digitalisierung und die mit ihr verknüpften Aufgaben erst an ihrem Beginn und muss in Zukunft weiter behandelt werden. Daher wird auf den Punkt 7.2 verwiesen.

7.2 Ausblick

Dieser Abschnitt gibt einen Ausblick auf künftige Entwicklungen und Handlungsempfehlungen sowie Hinweise auf noch offene und weiterführende Fragen.

Die Weiterentwicklungen der im Tunnelbau eingesetzten digitalen Technologien sowie das digitale Abwicklungsmodell BIM erfahren derzeit eine versuchsweise Umsetzung in Forschungs- und Pilotprojekten. Die ständige Entwicklung der durch die Digitalisierung geprägten Technologien und Methoden, ihre erst punktuelle Umsetzung im realen Tunnelbaubetrieb und der beschränkte öffentliche Zugang zu den Ergebnissen der derzeitigen Forschungs- und Pilotprojekten bedingen, dass diese Arbeit nur einen kleinen Ausschnitt über den derzeitigen Umbruch in der Tunnelbauprojektentwicklung zeigen kann. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Ansätze und Auswirkungen der Digitalisierung im Tunnelbaubetrieb und zeigt grob die neu entstehenden Aufgaben und Herausforderungen. Eine quantitative Analyse der Forschungsfragen würde eine größere Menge von aus vergleichbaren Forschungs- und Pilotprojekten gewonnenen Daten und Fakten erfordern.

Handlungsempfehlungen für die Zukunft liegen in der Festlegung nationaler und internationaler Standards sowie zahlreicher Gesetze und Verordnungen für die Schaffung eines rechtlichen und politischen Rahmens. Ein konkreter Stufenplan mit verbindlichen Zielsetzungen und Zeitrahmen soll die Umsetzung von Forschungs-, Weiter- und Ausbildungsmaßnahmen regeln und die Entwicklung der Digitalisierung des Tunnelbaus gezielt vorantreiben. Die Setzung von Schwerpunkten und Prioritäten erleichtert die schrittweise Umsetzung von Musteranwendungen. Eine effiziente Strukturierung und Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse ist Basis für eine weitergehende Analyse des Entwicklungsprozesses. Der öffentliche Austausch zeigt den Bedarf der Nutzer und verdeutlicht die Erfolge und Misserfolge neuer Methoden. Die laufende Anpassung des Standes der Technik an die in Pilotprojekten erfolgreich umgesetzten digitalen Technologien generiert eine Lernkurve für zukünftige Bauprojekte. Aufbauend auf diesem Wissenszuwachs werden weitere Arbeiten in der Zukunft das Thema der Digitalisierung des Tunnelbaubetriebs detaillierter beleuchten und durch konkrete Zahlen und Fakten analysieren. Die zukünftige Quantifizierung handfester Parameter kann den Mehrwert sowie die Aufwendungen für die Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau transparent in Zahlen abbilden.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Begriffsdefinitionen des Tunnelbaus im Quer- und Längsschnitt [20]	21
Abb. 1.2	Begriffsdefinitionen des Tunnelbaus im Quer- und Längsschnitt [20]	21
Abb. 2.1	Verfahren nach Ausbruchart, Ausbruchmethode und Sicherung [34]	28
Abb. 2.2	Zusammenhang zwischen Verformung und Ausbauwiderstand mittels Gebirgs- und Ausbaukenlinie [20]	29
Abb. 2.3	Belgische Bauweise: Perspektivische Darstellung der Ausbruch- und Ausbauabfolge (links) sowie Phasen des Bauvorgangs a)-d) und Darstellung eines Längsschnittes (e) [30]	32
Abb. 2.4	Deutsche Bauweise: Perspektivische Darstellung der Ausbruch- und Ausbauabfolge (links) sowie Phasen des Bauvorgangs b)-e) und Darstellung eines Längsschnittes (e) [30]	33
Abb. 2.5	Alte Österreichische Bauweise: Perspektivische Darstellung der Ausbruch- und Ausbauabfolge mit vorauseilenden Sohlstollen (Richtstollen), Sohlstellenerweiterung und Firtschlitz (links) sowie a) Ausbruchsschema und b)-f) Phasen des Bauvorgangs [30]	35
Abb. 2.6	Arbeitsablauf einer Tunnelbaustelle bei einem Sprengvortrieb [12]	37
Abb. 2.7	Tunnelbagger mit zweimal 45° um die Längsachse schwenkbarem Arm [55]	38
Abb. 2.8	Aufbau einer Teilschnittmaschine (TSM) – (1) Schrärmarm, (2) Schwenkwerk, (3) Ladeeinrichtung, (4) Kettenförderer, (5) Raupenfahrwerk, (6) Rahmen, (7) Elektrische Ausrüstung, (8) Hydraulische Ausrüstung, (9) Fahrerstand [55]	39
Abb. 2.9	Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) [9]	42
Abb. 2.10	Bohrkopf und Nachläuferbereich einer Tunnelbohrmaschine [12]	43
Abb. 2.11	Aufbau einer Doppelschild-TBM [69]	44
Abb. 2.12	Systemskizze – Natürliche Stützung [55]	46
Abb. 2.13	Systemskizze – Mechanische Stützung [55]	47
Abb. 2.14	Wirkungsweise – Druckluftstützung [55]	47
Abb. 2.15	Schematische Darstellung einer Ortsbruststützung mit Druckluft [55]	48
Abb. 2.16	Schematische Darstellung einer Flüssigkeitsstützung [55]	48
Abb. 2.17	Wirkungsweise einer Flüssigkeitsstützung [55]	49
Abb. 2.18	Aufbau einer Flüssigkeitsstützung [55]	49
Abb. 2.19	Darstellung des Stützdrucks eines Erddruckschildes [55]	50
Abb. 3.1	Wirksame Stützweite l und Klassifizierungsdiagramm nach Lauffer [33]	53
Abb. 3.2	Quality-System-Diagramm: Bezugsgröße für die Sicherungsmaßnahme im Verhältnis zur Gebirgsqualität Q [30]	54
Abb. 3.3	Übergeordnete Kategorien von Gebirgsverhaltenstypen [50]	57
Abb. 3.4	Unterteilung der Bereiche des Systemverhaltens [50]	58
Abb. 3.5	Schematischer Ablauf der geotechnischen Planung für Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb [50]	60

Abb. 3.6	Schematischer Ablauf der Festlegung und Überprüfung von Baumaßnahmen während der Ausführungsphase [50]	61
Abb. 3.7	Schematischer Ablauf der Geotechnischen Planung beim maschinellen Vortrieb [51]	64
Abb. 3.8	Bestimmungsbereiche für das Gebirgs- und Ortsbrustverhalten [51]	65
Abb. 3.9	Schematischer Ablauf der geotechnischen Planung in der Phase 3 (Bauausführung) [51]	69
Abb. 3.10	Vortriebsklassenmatrix für den Vortrieb der Kalotte, der Strosse oder der Kalotte mit Strosse [52]	71
Abb. 3.11	Gültigkeitsbereich der zweiten Ordnungszahl [52]	72
Abb. 3.12	Vortriebsklassenmatrix für offene TBM und TBM mit Aufweitungsbohrkopf [53]	73
Abb. 3.13	Schema des Materialbewirtschaftungsprozesses bei einer Tunnelbaustelle [30]	79
Abb. 3.14	Mannschaftseinsatzliste für den allgemeinen Baubetrieb [28]	80
Abb. 3.15	4/3-Dekadendurchlaufbetrieb - Tagesarbeitszeit [28]	81
Abb. 3.16	Beispiel einer Ortsbrust-Handskizze [49]	83
Abb. 3.17	GIS-Modell der Geologie eines Tunnelabschnitts mit mehreren geologischen Ortsbrustaufnahmen [24]	83
Abb. 4.1	Digitale Transformation nach Jodlbauer; adaptiert nach [38]	90
Abb. 4.2	Vernetzung physischer und digitaler Systeme – Industrie 4.0 [18]	91
Abb. 4.3	Trendradar der Bauindustrie [59]	94
Abb. 4.4	BIM als integrale Datenstruktur über alle Abwicklungsphasen, adaptiert nach [67]	99
Abb. 4.5	Basisbegriffe BIM, adaptiert nach [44]	100
Abb. 4.6	Neue Rollenbilder BIM, adaptiert nach [44]	102
Abb. 4.7	Reglement BIM, adaptiert nach [44]	103
Abb. 5.1	Mehrskaliges Modellierungskonzept: Generierung unterschiedlicher Modellkomponenten und variabler Detaillierungsgrade (LoD) [42]	109
Abb. 5.2	Schema der Echtzeitprognose von vortriebsinduzierten Effekten [42]	111
Abb. 5.3	a) Architektur der Prozesscontrolling-Webapplikation und b) Kommunikationsschema bei der Integration von Projektdatenerfassung und BIM-basierter Projektpräsentation [42]	112
Abb. 5.4	Berechnung bleibender Längskräfte auf Basis von Maschinendatenaufzeichnungen [42]	113
Abb. 5.5	Simulationen via Metamodelle für eine laufende Modellaktualisierung und Anpassung der Vortriebsparameter [42]	113
Abb. 5.6	Elektronisch gesteuerter Sprengzyklus, adaptiert nach [34]	114
Abb. 5.7	Abhängigkeit des Rückpralls von der Neigung der Spritzdüse gegen die Wand (links) bzw. gegen die Horizontale (rechts) [20]	116
Abb. 5.8	Nachläufer-Logistiksysteme beim Sprengvortrieb [34]	117
Abb. 5.9	Trümmerschutz durch einen Kettenvorhang (links), Aufgehängte Plattform: Blick auf Lutte, Förderband und Fußweg (rechts) [34]	118
Abb. 5.10	Schematische Darstellung der Funktionsweise eines 3D-Laserscanners [45]	119
Abb. 5.11	3D-Konturplot bei einem Testdurchlauf im Zufahrtstunnel Wolf 2: Abweichungen der realen Ausbruchsgometrie (links) im Vergleich mit der theoretischen, optimierten Ausbruchslinie (rechts) [45]	121
Abb. 5.12	Montage der Steuereinheit in den Diskenkästen der Doppeldisken (links) und Installation der Kameraeinheit im Diskengehäuse (rechts) [58]	123

Abb. 5.13	Ca. 8 m^3 großer, entsprechend dem Abstand zwischen Bohrkopf und Ortsbrust farbkodierter Ausbruch (links) und Darstellung als monochromes Orthofoto (rechts) [58]	124
Abb. 5.14	Störungszone ESI-f8380 – ausgewählte Maschinenparameter und geologische Skizzierung der Störungszone [46]	125
Abb. 5.15	Aus dem Datensatz des Bohrdatenschreibers abgeleitete Bohrdaten einer 83 m langen Vorausböhrung [16]	126
Abb. 5.16	Auslegung des DRAGON Prototypen [57]	127
Abb. 5.17	Vergleich der Penetrationsbandbreiten-Einstufung für die 1. Ordnungszahl (rechts) mit der Matrix aus ÖNORM B2203-1 (links) [29]	128
Abb. 6.1	Gegenüberstellung der klassischen und der digitalen Projektentwicklung, adaptiert nach [63]	132
Abb. 6.2	Projektablauf von der Projektidee bis zur Nachnutzung	133
Abb. 6.3	Digitalisierung des Tunnelbaubetriebs von der Projektvorbereitung bis zum Projektabschluss	138
Abb. 6.4	Notwendige Schritte zur Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau	139
Abb. 6.5	Organigramm der Rollenbilder nach BIM inklusive Weisungsfluss	141

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Tunnelbauwerke von der Jungsteinzeit bis zum Mittelalter [34, 65]	25
Tab. 1.2	Unterschiede zwischen dem Ingenieurtunnelbau und dem Bergbau [13]	26
Tab. 3.1	Gebirgsklassen und zugeordnete Sicherungsmaßnahmen nach Lauffer[33]	53
Tab. 3.2	Bestimmungsbereiche für das Gebirgs- und Ortsbrustverhalten [51]	65
Tab. 3.3	Tunneltvortriebsmaschinen (TVM) – Bereiche [51]	66
Tab. 3.4	Überblick über die im Tunnelbau am häufigsten eingesetzten Messmethoden [30]	85
Tab. 6.1	Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs während der Projektvorbereitung	134
Tab. 6.2	Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs während der Planungsphase	135
Tab. 6.3	Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs während der Ausführungsphase	136
Tab. 6.4	Gegenüberstellung des klassischen und digitalen Tunnelbaubetriebs während des Projektabschlusses	137
Tab. 6.5	Hard- und Softskillanforderungen an die Projektbeteiligten eines digitalen Tunnelbaubetriebs	140
Tab. 6.6	Aufgaben der Projektbeteiligten in den unterschiedlichen Phasen einer BIM-Projektentwicklung	142

Literaturverzeichnis

- [1] *Die vierte industrielle Revolution kommt in der Wirklichkeit an.* <https://www.computerwoche.de/a/die-vierte-industrielle-revolution-kommt-in-der-wirklichkeit-an>, 3096002. Eingesehen am 25.05.2018. URL: <https://www.computerwoche.de/a/die-vierte-industrielle-revolution-kommt-in-der-wirklichkeit-an>,3096002.
- [2] B. Alfons und H. Ernst Andreas. *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. 1. Aufl. Springer Vieweg, 2015. ISBN: 9783662459157.
- [3] B. Andreas. *Skriptum Baugrunderkundungsmethoden und Gebirgsklassifikation*. Technische Universität Wien, 2017.
- [4] G. Andreas, P. Markus und S. Wulf. „Digital rock mass characterization 2017 - Where are we now? What comes next?“ In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - 66. Geomechanics Colloquium* 10.5 (Okt. 2017), S. 561–566.
- [5] K. Andreas. *Skriptum Bauwirtschaft und Bauprojektmanagement 1*. Technische Universität Wien, 2011.
- [6] K. Andreas. *Skriptum Kosten- und Terminplanung*. Technische Universität Wien, 2012.
- [7] K. Andreas. *Skriptum Management und Abwicklung von Bauvorhaben*. Technische Universität Wien, 2017.
- [8] H. Anja. „Logistik eines innerstädtischen EPB-Schildvortriebs“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2018.
- [9] h. a. 0. Arbeitsgruppe Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen <http://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec1/gtcrec11.pdf>. „Empfehlung zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen“. In: *Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB)* (2010), S. 1–48.
- [10] B. Arno, E. Christoph und G. Anton. „Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Bauwirtschaft“. In: *Plattform Planen.Bauen.Betreiben 4.0 - Arbeit.Wirtschaft.Export 1* (Apr. 2017), S. 1–31.
- [11] *Digitalisierung: Die Baubranche erfindet sich neu.* <https://www.karrierefuehrer.de/bauingenieure/digitalisierung-baubranche.html>. Eingesehen am 28.05.2018. URL: <https://www.karrierefuehrer.de/bauingenieure/digitalisierung-baubranche.html>.
- [12] h. a. 2. BBT SE www.bbt-se.com. „Der Brenner Basistunnel - ein neuer Verbindungsweg durch die Alpen“. In: *Galleria di Base del Brennero - Brenner Basistunnel BBT SE* (2012), S. 1–40.
- [13] M. Bernhard. *Faszination Tunnelbau*. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 2018. ISBN: 9783433031131.
- [14] K. C., V. A. und K. M. „A tunnel information modelling framework to support management, simulations and visualisations in mechanised tunnelling projects“. In: *Automation in Construction* 83 (2017), S. 78–90.

- [15] R. Chris, S. Christian und B. Konrad. „Die Entwicklung holistischer Prognosemodelle mit Vorauserkundungen und seismischen Messungen“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - Südbahntagung/Austrian Southern-Railway-Link-Conference* 10.6 (Dez. 2017), S. 767–778.
- [16] S. Christian und S. Heimo. „Einbindung von Reflexionsseismik in die Dokumentation beim Bau des Brenner Basistunnels“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - 66. Geomechanics Colloquium* 10.5 (Okt. 2017), S. 552–560.
- [17] G. Dario, H. Reinhold und I. Peter. „BIM in der Praxis - Fokus Tiefbau und Infrastruktur“. In: *Plattform Planen.Bauen.Betreiben 4.0 - Arbeit.Wirtschaft.Export* 9 (Dez. 2017), S. 1–19.
- [18] *Die denkende Fabrik - Infografik Industrie 4.0*. <https://infothek.bmvit.gv.at/die-denkende-fabrik-infografik-industrie-4-0/>. Eingesehen am 25.05.2018. URL: <https://infothek.bmvit.gv.at/die-denkende-fabrik-infografik-industrie-4-0/>.
- [19] S. Dieter und I. Rolf. „Digitalisierung in der Produktion - Herausforderung und Chance für mehr Flexibilität“. In: *Planen, Errichten und Betreiben - Digitalisierung im Bau - Tagungsband 4*. Internationaler BBB-Kongress 14.09.2017 in Stuttgart (2017), S. 19–41.
- [20] A. Dietmar. *Skriptum Fels- und Tunnelbau*. Technische Universität Wien, 2016.
- [21] *Der Dynamo Primer*. <http://primer.dynamobim.org/de/index.html>. Eingesehen am 06.07.2018. URL: <http://primer.dynamobim.org/de/index.html>.
- [22] *Baustelle 4.0: Erst digital, dann real*. <https://www.bauforum.at/bauzeitung/baustelle-40-erst-digital-dann-real-159521>. Eingesehen am 29.05.2018. URL: <https://www.bauforum.at/bauzeitung/baustelle-40-erst-digital-dann-real-159521>.
- [23] N. Felix, S. Ingo und S. Ludger. „Beobachtungsmethode in der Geotechnik - Verknüpfung von Messung und Simulation“. In: *Tunnel* 3 (2012), S. 40–47.
- [24] W. Franz Peter und P. Gerald. „Baugeologische Dokumentation - Anforderungen, Status quo und zukünftige Entwicklungen“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - 66. Geomechanics Colloquium* 10.5 (Okt. 2017), S. 567–573.
- [25] M. G., F. S. und A. A. „Numerical Simulation in Mechanized Tunneling in Urban Environments in the Framework of a Tunnel Information Model“. In: *Bauingenieur* 89.11 (2014), S. 457–466.
- [26] M. Georg, M. Petra und O. Wolfgang. *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. ISBN: 9783834816146.
- [27] G. Gerald und M. Katharina. *Der gestörte Bauablauf*. Festsaal Landesinnung Bau Wien, Juni 2017.
- [28] G. Gerald und S. Lukas. *Skriptum Einrichtung und Betrieb von Baustellen*. Technische Universität Wien, 2017.
- [29] G. Gerald und B. Tobias. *Internes Besprechungsprotokoll*. Technische Universität Wien, 2018.
- [30] G. Gerald und B. Tobias. *Skriptum Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau*. Technische Universität Wien, 2017.
- [31] G. Gerald und R. Wilhelm. „Roadmap Digitalisierung von Planen, Bauen und Betreiben in Österreich“. In: *Plattform Planen.Bauen.Betreiben 4.0 - Arbeit.Wirtschaft.Export* 1 (Apr. 2018), S. 1–14.

- [32] Z. Gerald. „Vom Lavanttal ins Jauntal - Projektumsetzung und erste Erfahrungen zum Planen und Bauen 4.0“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - Südbahntagung/Austrian Southern-Railway-Link-Conference* 10.6 (Dez. 2017), S. 722–729.
- [33] G. Gerhard. *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau*. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 2008. ISBN: 9783433018521.
- [34] G. Gerhard. *Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus*. 3. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 2013. ISBN: 9783433030479.
- [35] A. Habeb und F. Michael. „Digitale Transformation mit Bauen 4.0 am Beispiel des Albvorlandtunnels“. In: *Planen, Errichten und Betreiben - Digitalisierung im Bau - Tagungsband 4*. Internationaler BBB-Kongress 14.09.2017 in Stuttgart (2017), S. 111–118.
- [36] J. Hans Georg. *Skriptum Bauverfahrenstechnik*. Technische Universität Wien, 2013.
- [37] H. Harald, P. Thomas und U. Robert. „Die Nothaltestelle des Koralmtunnels - Geotechnische Planung und Bauausführung“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - Südbahntagung/Austrian Southern-Railway-Link-Conference* 10.6 (Dez. 2017), S. 711–721.
- [38] J. Herbert. *Digitale Transformation der Wertschöpfung*. 1. Aufl. Stuttgart: W. Kohlhammer, 2018. ISBN: 9783170341029.
- [39] H. Ingo und S. Herwig. *Skriptum Vertragsgestaltung und Abwicklungsmodelle von Bauprojekten*. Technische Universität Wien, 2017.
- [40] N. J., K. C. und S. J. „An integrated platform for design and numerical analysis of shield tunnelling processes on different level of detail“. In: *Advances in Engineering Software* 112 (2017), S. 165–179.
- [41] N. J. und M. G. „Model update and real-time steering of tunnel boring machines using simulation-based meta models“. In: *Tunneling and Underground Space Technology* 45 (2015), S. 138–152.
- [42] S. Janosch, N. Jelena und M. Günther. „Building Information Modeling im maschinellen Schildvortrieb - Ein praxisorientierter Blick in die nähere Zukunft“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - Base Tunnels* 11.1 (Feb. 2018), S. 34–49.
- [43] S. Karl. *Tunnelbau*. 1. Aufl. Wien: Springer Verlag, 1969. ISBN: 9783709182284.
- [44] B. Kevin, P. Dohem und E. Christoph. „Begriffe zu BIM und Digitalisierung“. In: *Plattform Planen.Bauen.Betreiben 4.0 - Arbeit.Wirtschaft.Export* 8 (Dez. 2017), S. 1–39.
- [45] V. Klaus, A. Seraphim und C. Tobias. „Ausbruchsprognose beim Sprengvortrieb mittels 3D-Laserscanning“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - Base Tunnels* 10.3 (Juni 2017), S. 298–316.
- [46] B. Konrad und R. Chris. „Lernen und Optimieren vom Erkundungsstollen - Brenner Basistunnel“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - 66. Geomechanics Colloquium* 10.5 (Okt. 2017), S. 467–476.
- [47] W. Lars. „Zukunft der Facharbeit im Zeitalter Industrie 4.0“. In: *Journal of Technical Education (JOTEC)* (2014), S. 138–160.
- [48] W. Leopold. *Neue österreichische Tunnelbaumethode - Übungsvortrag VU Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau*. Technische Universität Wien, 2017.
- [49] S. Marcus und S. Georg. „Die gute Dokumentation ist stets objektiv“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - 66. Geomechanics Colloquium* 10.5 (Okt. 2017), S. 584–590.

- [50] *OEGG Richtlinie:2008 Auflage 2: Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb*. Salzburg: Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2008.
- [51] *OEGG Richtlinie:2013: Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb*. Salzburg: Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2013.
- [52] *OENORM B 2203-1:2001 12 01: Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm - Teil 1: Zyklischer Vortrieb*. Wien: Austrian Standards, Dez. 2001.
- [53] *OENORM B 2203-2:2005 01 01: Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm - Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb*. Wien: Austrian Standards, Jan. 2005.
- [54] W. Oliver Kai, F. Alfred und S. Thomas. „Semmering Basistunnel - Gebirgsansprache in Ausschreibung und Bau“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - 66. Geomechanics Colloquium* 10.5 (Okt. 2017), S. 574–583.
- [55] P. Panova. „Ressourcenbedarf des innerstädtischen U-Bahnhabus“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2014.
- [56] P. Rainer. *Skriptum Angewandte Felsmechanik*. Technische Universität Wien, 2017.
- [57] G. Robert, W. Robert und G. Paul. „Überblick zu laufenden Forschungsvorhaben am Lehrstuhl für Subsurface Engineering an der Montanuniversität Leoben“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - Tunnelling Research in Austria* 11.3 (Juni 2018), S. 265–275.
- [58] W. Robert, S. Gerhard und G. Robert. „Ortsbrustkameras zur digitalen geologischen 3D-Dokumentation aus dem Bohrkopf von TBM - Stand der Entwicklungsarbeiten“. In: *Journal of Geomechanics and Tunnelling - Südbahntagung/Austrian Southern-Railway-Link-Conference* 10.6 (Dez. 2017), S. 760–766.
- [59] B. Roland. „Digitalisierung der Bauwirtschaft - Der europäische Weg zu Construction 4.0“. In: *Roland Berger GmbH, Competence Center Civil Economics, Energy & Infrastructure* 1 (2016), S. 1–16.
- [60] F. S., C. B.T. und N. J. „Hybrid surgorate modelling for mechanised tunnelling simulations with uncertain data“. In: *International Journal of Reliability and Safety* 9.2-3 (2015), S. 154–173.
- [61] W. Schlosser. „Vortriebsklassifizierung im Konventionellen Tunnelbau“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2005.
- [62] L. Sebastian und T. Kristina. „Die digitale Materialbedarfsermittlung und -bestellung bei einem Generalunternehmen“. In: *Planen, Errichten und Betreiben - Digitalisierung im Bau - Tagungsband 4*. Internationaler BBB-Kongress 14.09.2017 in Stuttgart (2017), S. 223–234.
- [63] S. Steffen. „Partnerschaftliche Zusammenarbeit in der frühen Phase durch BIM“. In: *Planen, Errichten und Betreiben - Digitalisierung im Bau - Tagungsband 4*. Internationaler BBB-Kongress 14.09.2017 in Stuttgart (2017), S. 211–220.
- [64] K. Steven. *JSON Book: Easy Learning of JavaScript Standard Object Notation*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. ISBN: 9781541228122.
- [65] W. Svoboda. „Die geschichtliche Entwicklung des Tunnelbaus“. Dissertation. Technische Universität Graz, 1994.
- [66] M. Thomas. *Skriptum Ablauf der Planung*. FH Joanneum, 2008.

-
- [67] *The top 10 benefits of using BIM*. <http://www.dortek.com/news/the-top-10-benefits-of-using-bim/>. Eingesehen am 29.05.2018. URL: <http://www.dortek.com/news/the-top-10-benefits-of-using-bim/>.
- [68] W. Karl Heinz. *Stand der Bohrtechnik im Tunnelbau*. https://www.baumaschine.de/baumaschine/fachtagungen/bautechnik-und-sicherheit/tunnelbau_dateien/2007/thema5/a279_287.pdf. Eingesehen und heruntergeladen am 28.06.2018. URL: https://www.baumaschine.de/baumaschine/fachtagungen/bautechnik-und-sicherheit/tunnelbau_dateien/2007/thema5/a279_287.pdf.
- [69] L. Winkler. „Vergleich von gleis- und radgebundenen Versorgungslogistiksystemen beim maschinellen Tunnelvortrieb“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2014.
- [70] K. Zilch, C. J. Diederichs und R. Katzenbach. *Bauwirtschaft und Baubetrieb*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2013. ISBN: 9783642418693.