

Visuelle 3D-Simulation der Baulogistik im maschinellen Tunnelbau

Simone Willibald, B.Eng

Innsbruck, 18. November 2024

Masterarbeit

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

Diplomingenieurin

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

Beurteiler:

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

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Betreuer:

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

Danksagung

An dieser Stelle danke ich Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthias Flora für die Betreuung und Mitgestaltung der Diplomarbeit. Des Weiteren möchten ich mich bei dem gesamten Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau bedanken und Herrn Dipl.-Ing. Hans Exenberger sowie Frau Dipl.-Ing. Hannah Salzgeber für ihre große Unterstützung besonders hervorheben.

Besonderer Dank gilt ebenso dem Unternehmen Implenia, vertreten durch Herrn Helmut Wannenmacher. Das eingebrachte Wissen, Engagement und die Unterstützung hat maßgeblich zu dem Erfolg der Arbeit beigetragen.

Ein Teil meiner Arbeit hat direkt auf dem Baufeld des Bauloses H41 stattgefunden. Daher möchte ich mich bei allen Mitarbeiter:innen und Baubeteiligten des maschinellen Tunnelbaus am Baulos H41 für die eingebrachte Zeit, die bereitgestellten Daten und die Unterstützung vor Ort bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich auf diesem Werdegang tatkräftig unterstützt und diesen Weg erst ermöglicht haben.

Kurzfassung

Der Umfang und die Komplexität der Arbeitsschritte im maschinellen Tunnelbau fordern eine effiziente und erfolgreiche Logistikplanung. Mit der Implementierung von digitalen Werkzeugen für das Planen, Bauen und Betreiben von Infrastrukturprojekten eröffnen sich neue Möglichkeiten bei der Umsetzung. Im Rahmen dieser Studie wird ein Simulationsmodell in Anylogic entwickelt, das die Logistikprozesse zur Versorgung der Tunnelbohrmaschine im Baulos H41 des Brennerbasistunnels anhand eines idealisierten Bauablaufs sowohl ober- als auch unterirdisch abbildet. In Abhängigkeit des kontinuierlichen Vortriebs und der Ressourcenkapazität innerhalb des Bauvorhabens wird die Baustellenlogistik simuliert. Dafür wird der Gesamtablauf in sieben Prozesse unterteilt, wobei jedem Einzelnen spezifische Arbeitsschritte zugeteilt werden.

Zur realitätsgetreuen Wiedergabe des Prozesses werden tatsächliche Aufwandswerte der jeweiligen Arbeitsschritte quantitativ ermittelt und in das Simulationsmodell integriert. Durch die räumliche und zeitliche Verknüpfung können die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Arbeitsschritten besser verstanden und optimiert werden. Das Hauptziel der Simulation besteht darin, den kritischen Punkt innerhalb der Baulogistik mit dem derzeitigen Ressourceneinsatz zu identifizieren und den allgemeinen Nutzen einer simulanten Abbildung der Baulogistik zu erarbeiten.

Die Simulation basiert auf der Kombination aus agenten- und ereignisorientierter Simulation. Die Agenten, bestehend aus der Tunnelbohrmaschine, der Versorgungslok, den Spezialtransportfahrzeugen, den Tübbingen und den Zementbehältern, stellen unabhängige Elemente dar, die individuelle Verhaltensweisen und Interaktionen innerhalb des Simulationsmodells repräsentieren. Die Ereignisfolge, welche durch Zustände oder Zustandsänderungen der Agenten hervorruft wird, ist der ereignisorientierten Simulation zugrunde gelegt.

Eine vollständige Simulation konnte nicht durchgeführt werden, da das Programm einen Fehler aufwies, welcher nicht behoben werden konnte. Aus zeitlichen Gründen wurde die Simulation abgebrochen. Alternativ wurde eine numerische Berechnung zur Ermittlung des kritischen Punktes durchgeführt. Das Ergebnis aus Ableitungen der Simulation und der numerischen Berechnung zeigt, dass die Kapazitätsplanung der Ressourcen und Transportgüter nicht ausreicht, um eine kontinuierliche Versorgung der TBM sicherzustellen. Der kritische Punkt des Logistikprozesses unterscheidet sich aufgrund ungleicher Arbeitsschritte in den Haupttunnelröhren. In der Haupttunnelröhre Ost wird dieser nach 4,21 Tunnelkilometern erreicht, während die kontinuierliche Versorgung in der Haupttunnelröhre West nach 5,36 Tunnelkilometern nicht mehr aufrechterhalten werden kann. Im Allgemeine kann dem Einsatz von Simulationen im maschinellen Tunnelbau großes Potenzial zugesprochen werden, die Verwendung der Software Anylogic ist kritisch zu hinterfragen.

Abstract

The scope and complexity of work processes in mechanized tunneling demand efficient and effective logistics planning. Implementing digital tools for the planning, construction, and operation of infrastructure projects opens up new possibilities for execution. In this study, a simulation model is developed in AnyLogic to represent the logistics processes involved in supplying the tunnel boring machine for construction lot H41 of the Brenner Base Tunnel, based on an idealized construction sequence both above and below ground. The construction site logistics are simulated depending on the continuous advance of tunneling and the resource capacity within the construction project. For this purpose, the overall process is divided into seven sub-processes, each assigned specific work steps.

To accurately represent the process, actual effort values for each work step are quantitatively determined and integrated into the simulation model. By linking spatial and temporal aspects, the dependencies and interactions between the various work steps can be better understood and optimized. The main objective of the simulation is to identify the critical point within the construction logistics with the current resource deployment and to demonstrate the overall benefits of a simulated representation of construction logistics.

The simulation is based on a combination of agent-based and event-driven simulation. The agents, consisting of the tunnel boring machine, supply locomotive, specialized transport vehicles, concrete segments, and cement containers, represent independent entities with distinct behaviors and interactions within the simulation model. The sequence of events, triggered by the agents' states or state changes, underlies the event-driven simulation.

A complete simulation could not be executed due to a persistent software error that could not be resolved. Given the limited timeframe, the simulation process was terminated. As an alternative, a numerical analysis was conducted to determine the critical point. The results derived from the simulation and numerical calculation indicate that the capacity planning for resources and transport goods is insufficient to ensure a continuous supply to the TBM. The critical point of the logistics process differs due to varying work steps in the tunnel tubes. In the main tunnel east tube, the critical point is reached at 4.21 tunnelkilometers, while in the main tunnel west tube, continuous supply can no longer be maintained at 5.36 tunnelkilometers. Overall, simulations in mechanized tunneling show significant potential, but the use of AnyLogic software should be critically evaluated.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung	2
1.3. Methodik	2
2. Theoretische Grundlagen	5
2.1. Bauablauf	5
2.2. Baulogistik	5
2.3. Digitalisierung	7
2.3.1. Building Information Modelling (BIM)	7
2.3.2. Simulation	8
3. Bauvorhaben	9
3.1. Baubeschreibung	9
3.2. Bauphase	10
3.3. Stationierung und Länge der Objekte	11
3.4. Bauablauf	11
3.5. Baustelleninfrastruktur	12
3.6. Elemente der Baulogistik	12
3.6.1. Haupttunnelröhre Ost und West	13
3.6.2. Knoten NHS Innsbruck	14
3.6.3. Querschläge	16
3.6.4. Zugangstunnel	16
3.6.5. BE-Fläche Ahrental Süd	17
3.7. Bauliche Bestandteile	19
3.7.1. Tübbinge	19
3.7.2. Perlkies	22
3.7.3. Zementmörtel	22
3.8. Dokumentation der Tübbinge	22
4. Simulationskonzept	25
4.1. Grundlagen	25
4.1.1. Prozesskomponenten	25
4.1.2. Modellierung des Systems	26
4.1.3. Prozessabfolge	28
4.1.4. Darstellung	29
4.2. Logistikprozesse	29
5. Simulation	45
5.1. Aufbau der Software	45
5.1.1. Benutzeroberfläche	45
5.1.2. Koordinatensystem	46

5.1.3. Funktionsweise	46
5.1.4. Elementspezifizierung	47
5.2. Rahmenbedingungen	50
5.3. Modellierung	51
5.3.1. Agenten	51
5.3.2. Infrastruktur	53
5.3.3. Lagerstätten	56
5.3.4. Datenimport	58
5.3.5. Interaktionen	59
5.4. Prozessdarstellung	62
6. Diskussion der Ergebnisse	67
6.1. Beantwortung der Forschungsfragen	67
6.2. Erkenntnisgewinnung	69
6.3. Mehrwert	70
6.4. Ausblick	71
Literatur	73
A. Flussdiagramm der Prozessabfolge	75

Abbildungsverzeichnis

1.	Schema des Simulationsablaufprozesses	4
2.	ScanMed-Korridor [7]	9
3.	Querschnitt der Haupttunnelröhren, des Erkundungsstollen und des Querschläge - schematisch [21]	10
4.	Darstellung der Örtlichkeiten - schematisch	13
5.	Regelquerschnitt Haupttunnelröhre - konventioneller Vortrieb	14
6.	Knoten NHS Innsbruck - schematisch	15
7.	Längsschnitt des Zugangstunnels - schematisch	17
8.	Lageplan der BE-Fläche	19
9.	Darstellung der Ringteilung - schematisch	20
10.	Lagerung der Tübbing (1) und Sohlsteine (2) auf der außenliegenden Lagerfläche	21
11.	Übersicht der Dokumentationsanwendungen von SDS [6]	23
12.	Übersicht der Prozessschritte	29
13.	Östliche und westliche Tübbingslagerfläche mit mittiger Durchfahrtsstraße	31
14.	Verladung der Tübbing (1) auf das Transportfahrzeug (2)	31
15.	Beladener Terberg auf der Transportstrecke	33
16.	Lagerfläche der Tübbing im Logistikbereich der NHS Innsbruck	36
17.	Lagerfläche der sonstigen Materialien im Blickrichtung Norden (1) und des Versorgungszuges (2) im Logistikbereich der NHS Innsbruck	37
18.	Gleisgebundene Versorgungsstrecke (1) und gering beladener Zug auf der Versorgungsstrecke zwischen der NHS Innsbruck und der TBM (2)	39
19.	Versorgungszug im Inneren der TBM (1) und Vakuumgreifer mit Tübbing im gedrehtem Zustand (2)	40
20.	Zement (1) - und Perlkiesbehälter (2) an der TBM	41
21.	Grobjustierung der Tübbingsegmente für den lagerichtigen Einbau	42
22.	Feinjustierung der Tübbingsegmente für den lagerichtigen Einbau (1) und eingebautes Sohlfertigteil (2)	43
23.	Benutzeroberfläche der Software Anylogic	45
24.	Funktionsweise von Anylogic	46
25.	Straßennetz der BE-Fläche	54
26.	Straßennetz der NHS Innsbruck	54
27.	Java-Code zur Geschwindigkeitsreduzierung des beladenen Terbergs	55
28.	Schienennetz der NHS Innsbruck	55
29.	Einstellung der Geschwindigkeitsbeschränkungen	56
30.	Lagerhaltung	57
31.	Lagerstätten an der BE-Fläche	58
32.	Lagerstätten an der NHS Innsbruck	58
33.	Datenbank zur Einbaureihenfolge	59
34.	Java-Code zur Koordination der Lagerlogistik und der Ringeinbaureihenfolge	60
35.	Java-Code zur Versendung der Nachricht in der Prozesslogik durch den Agenten Versorgungszug	60
36.	Java-Code zum Empfang der Nachricht durch den Agenten Terberg	61

37. Java-Code zur Berechnung der Position von der TBM	62
38. Java-Code zum Angleich der Geschwindigkeit des Versorgungszuges . .	62
39. Ansichtsfenster der Prozesslogik	64
40. Ansichtsfenster der 2D-Darstellung der BE-Fläche	65
41. Ansichtsfenster der 2D-Darstellung der Logistikfläche der NHS Innsbruck	65
42. Ansichtsfenster der 3D-Darstellung der BE-Fläche	66
43. Ansichtsfenster der 3D-Darstellung der Logistikfläche der NHS Innsbruck	66

Tabellenverzeichnis

1. Prozessschritte der Simulation	3
2. Bauphasen am Brenner Basistunnel	11
3. Stationierung und Länge der Objekte	11
4. Tübbingstypen - Baulos H41	20
5. Prozesskomponenten der Simulation	25
6. Datentypen in Anylogic	47
7. Agententypen in Anylogic	48
8. Beschreibung der verwendeten Blöcke	49
9. Rahmenbedingungen zur Simulation - Teil 1/2	50
10. Rahmenbedingungen zur Simulation - Teil 2/2	51

Abkürzungsverzeichnis

BE	Baustelleneinrichtung
BBT	Brennerbasistunnel
BIM	Building Information Modelling
EKS	Erkundungsstollen
HT	Haupttunnel
HT-O	Haupttunnel Ost
HT-W	Haupttunnel West
IFC	Industry Foundation Classes
QS	Querstollen
MN	Meganewton
NHS	Nothaltestelle
TVM	Tunnelvortriebsmaschine
TIM	Tunnel Information Modelling
TBM	Tunnelbohrmaschinen
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional

1. Einleitung

1.1. Motivation

Die Bauwirtschaft verfolgt eine Effizienzsteigerung durch die Implementierung digitaler Technologien. Die Digitalisierung ist bereits seit einigen Jahren in Wirtschaft und Gesellschaft weit verbreitet, während das Bauwesen nur langsame Fortschritte in diesem Bereich aufweisen kann. Hinzu kommt, dass der Tunnelbau in Bezug auf den Einsatz der digitalen Werkzeuge dem Hochbau noch zurücksteht. Pilot- und Forschungsprojekte werden durchgeführt, um den Prozess zu beschleunigen und eine rasche Implementierung digitaler Planungs-, Bau- und Betriebsmethoden für Tunnelbauprojekte voranzutreiben [5] [15]. Zur digitalen Unterstützung der Planung, Herstellung und des Betriebs von Tunnelbauwerken spielt Building Information Modelling (BIM) eine große Rolle. Die Datenstruktur verhilft zu einer zentralen Informationsverarbeitung, um einen kooperativen und transparenten Austausch mehrerer Fachparteien zu ermöglichen [26]. Die Leistungsfähigkeit der Logistikkette hängt dennoch entscheidend von der Maschinen-technik, der Geologie und der Topografie ab, um einen kontinuierlichen Baufortschritt zu gewährleisten [10]. Im Tunnelbauwesen beruht die Logistik auf einem reibungslosen Zusammenspiel zwischen Beschaffungs-, Produktions- und Entsorgungslogistik. Anspruch ist es, ein störungsfreies Logistikkonzept zu erstellen, um den maschinellen Tunnelvor-trieb in seinem Vortriebsprozess nicht zu behindern. Es existieren eine Vielzahl von Ele-menten, die auf die Leistung der Vortriebsmaschine und die Interaktionen der Elemente untereinander angepasst werden müssen. Die enge Verbindung zwischen Produktions- und Logistikkonzepten führt zu einer hohen Komplexität in der Projektlogistik [10] [12] [26].

Obwohl die Durchführung von Bauprojekten vorrangig nach den Kriterien der Termintreue und einer minimalen Kostenverursachung ausgerichtet ist, werden in der heuti-gen Baupraxis vorhandene zeitliche und monetäre Nutzenpotenziale durch baulogistisch ganzheitliche Optimierungsansätze nur unzureichend genutzt. Noch immer liegt der Fo-kus in der Bauausführung überwiegend auf der Baustelleneinrichtungsplanung. Eine ganz-heitliche baulogistische Planung der Materialversorgungsprozesse wird bisher nur rudi-mentär berücksichtigt. Mithilfe eines datengestützten Simulationsmodells können kom-plexe Interaktionen und wesentliche Komponenten abgebildet und unsichere Randbe-dingungen berücksichtigt werden [10] [13]. Dynamische 3D-Simulationen können die räumlich-zeitliche Konfliktbeziehung visuell erfassen. Eine Sequenzierung von Vorgangs-ketten ermöglicht eine qualitative Bewertung von Arbeitsräumen, Interaktionen und Be-hinderungen, um strategische Managemententscheidungen zu unterstützen. Das Modell ermöglicht eine kontinuierliche Prozessanalyse und bildet eine Entscheidungsunterstüt-zung bei Großbauprojekten und komplexen Bauvorhaben [24].

Die Arbeit behandelt eine visuelle 3D-Simulation des Brennerbasistunnels (BBT), der als eines der bedeutendsten Infrastrukturprojekte der Gegenwart gilt. Das transnationale Projekt zwischen Österreich und Italien verläuft durch die Alpen und ist zwischen dem Portal Tuffes und dem Portal Franzensfeste in sieben Baulose unterteilt. Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf dem Baulos H41 [1] [7].

1.2. Zielsetzung

Die Masterarbeit verfolgt das Ziel, eine Simulation der Baustellenlogistik zur Versorgung der Tunnelbohrmaschine des Bauloses H41 abzubilden. In der Realität werden logistische Entscheidungen oft vor Ort, zum Zeitpunkt der Notwendigkeit getroffen, wodurch agiles und situatives Handlungsvermögen gefragt ist. Dem Einsatz von digitalen Werkzeugen wird dabei viel Potenzial zugesprochen [5]. Diese Arbeit soll zu einer Erkenntnisgewinnung über die anstehenden Prozessschritte beitragen und das Verständnis für Interaktionen innerhalb der Arbeitsabfolge schärfen [23]. Anspruch ist es, den gegenwärtig möglichen Fortschritt der idealen Ausgangssituation mittels der Simulation zu ermitteln und in einer dreidimensionalen Umgebung darzustellen. Es stellt sich in dem Zusammenhang die Frage:

Welcher Mehrwert kann durch den Einsatz von Tunnel Information Modelling (TIM) Modellen bei Baustellenlogistiksimulationen erzielt werden?

Die Simulation zielt darauf ab, eine aussagekräftige Basis für einen Soll-Ist-Vergleich der Baustellenlogistik zu generieren und der Baustellenlogistik zugrunde gelegten Bauschwierigkeiten aufzuzeigen. Die Analyse beschäftigt sich mit folgender Frage:

Ist die bestehende Ressourcen- und Transportgut Kapazitätsplanung ausreichend, um die Tunnelbohrmaschine (TBM) kontinuierlich zu versorgen?

Anhand dessen wird die grundlegende Frage aufgeworfen:

Inwiefern beeinflusst die Logistiksimulation im maschinellen Tunnelbau den Gesamtablauf?

Es soll geklärt werden, ob und in welchem Maße eine solche Simulation dazu beitragen kann, die Effizienz der Logistikprozesse zu steigern, potenzielle Engpässe frühzeitig zu erkennen und letztlich die Projektdauer und -kosten positiv zu beeinflussen.

1.3. Methodik

Die Methodik dieser wissenschaftlichen Arbeit konzentriert sich auf die dreidimensionale Simulation der Baustellenlogistik für das Baulos H41 und basiert auf einem Multimethodenansatz. Dieser Ansatz kombiniert qualitative und quantitative Methoden, um eine umfassende Analyse der Prozessabfolge zu ermöglichen.

Zunächst wird die Datenerhebung durch Beobachtungen und Erfahrungsberichte beschrieben, welche die qualitativen Aspekte der Untersuchung abdecken. Die Untersuchung umfasst eine Kombination aus direkter Beobachtung und Befragungen zuständiger Personen im Baubereich, um die Arbeitsabläufe und zeitlichen Gestaltungen zu dokumentieren. In Ergänzung dazu stützen eigens gemessene Daten die zeitliche Repräsentation der Arbeiten. Die Arbeitsschritte sind in sieben Prozessschritte gegliedert und durch Tabelle 1 beschrieben.

Tabelle 1: Prozessschritte der Simulation

Prozess	Aufgabe	Prozess	Aufgabe
P1	Anfordern	P5	Tübbingsanlieferung
P2	Transport	P6	Abladen an der TBM
P3	Abladen	P7	Transport & Einbau an der TBM
P4	Aufladen / Zwischenlagerung		

Alle Prozessschritte sind durch definierte Start- und Endpunkte, Ressourcen- und Personeneinsätze sowie durchzuführende Arbeitsschritte charakterisiert. Der Ablauf der Vortriebslogistik ist ein sich wiederholender Zyklus bis zur Fertigstellung des Tunnelabschnittes. Die Zykluszeit eines Prozesses dient als Indikator für die Produktivität und Wirtschaftlichkeit der Baulogistik.

Darauffolgend wird die quantitative Komponente der Methodik erläutert, die auf der Durchführung und Analyse der Simulation zur Versorgung der TBM basiert. Angesichts der Komplexität ist es nicht möglich, alle Systemkomponenten und deren Interaktionen vollständig im Simulationsmodell abzubilden. Daher ist es sinnvoll, die einzelnen Bestandteile in einem Gesamtprozess zu integrieren und wiederkehrende Abläufe in die Vorgangskette einzubinden [23]. Es empfiehlt sich ein Multimethodenkonzept, bestehend aus dem agentenbasierten und ereignisorientierten Ansatz [4]. Dies bezieht sich auf die Darstellung unabhängiger Elemente innerhalb der Vorgangsketten, in einem dynamischen, sich wiederholenden Umfeld [26]. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem kontinuierlich fortschreitenden Standort der TBM und der damit verbundenen zunehmenden Länge der gleisgebundenen Versorgungsstrecke.

Für die Datenanalyse werden sowohl die qualitativen als auch die quantitativen Daten herangezogen. Die qualitative Analyse umfasst die Auswertung der Beobachtungen und Erfahrungsberichte, um zentrale Themen und Muster zu identifizieren. Die quantitative Analyse erfolgt durch die Mittelwertbildung der zeitlichen Daten sowie die Erstellung eines Flussdiagramms, das die Abfolge der logistischen Prozesse visualisiert. Diese kombinierte Analyse ermöglicht es, die Effizienz der Baulogistik im Tunnelbauwerk zu bewerten [23]. Durch diesen methodischen Ansatz ist eine umfassende und detaillierte Untersuchung der Baulogistik für Tunnelbauwerke möglich, die sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Empfehlungen für die Optimierung der Prozesse liefert.

Die Verwendung von *Anylogic*, einer dreidimensionalen Simulationssoftware der Firma *Anylogic Company*, ermöglicht die Modellierung und Datenerfassung von logistischen Prozessen, die eine detaillierte Analyse und Optimierung der Abläufe ermöglichen. Die Erarbeitung des Prozessablaufs in der Simulation ist gemäß dem in Abbildung 1 dargestellten Ablaufschema durchzuführen.

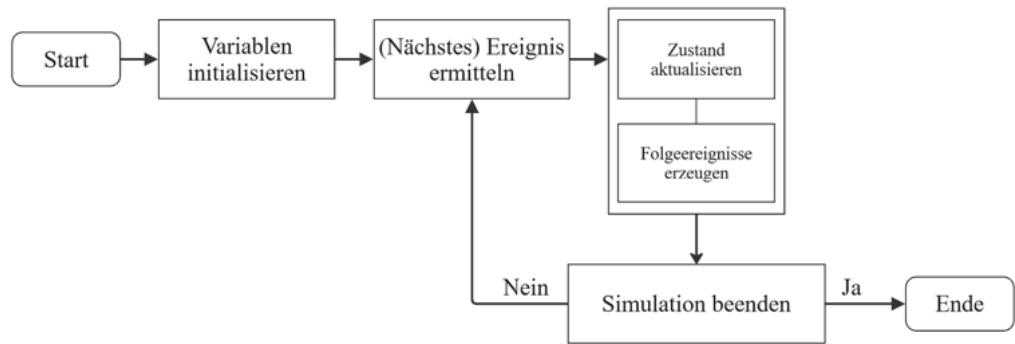


Abbildung 1: Schema des Simulationsablaufprozesses

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Bauablauf

Der Tunnelbau gehört zum Bereich des Infrastrukturbaus und zeichnet sich durch lange, lineare Bauwerksformen mit Bauabschnitten von komplexer Geometrien aus [5]. Aufgrund der sequenziellen Prozessschritte, der begrenzten Platzverhältnisse und des geringen Spielraums für Änderungen im Ablauf ist eine effiziente Bauablaufplanung unerlässlich. Dabei sind zahlreiche Einzeltätigkeiten sowohl zeitlich als auch kapazitiv aufeinander abzustimmen und Wechselbeziehung miteinzubeziehen [16].

Unplanmäßige Einflüsse können erhebliche Auswirkungen mit sich bringen, die sowohl den Bauablauf, die Projektzeit und die Projektkosten umfassen. Zu den häufigsten unvorhergesehenen Herausforderungen gehören geologische Ereignisse, wie unerwartet harte Gesteinsschichten, Wasserzuflüsse oder instabile Bodenverhältnisse. Technische Maschinenausfälle oder mechanische Störungen führen ebenfalls zu Verzögerungen im Fortschritt [22]. Diese Umstände erfordern eine situative Entscheidungsfindung in nur kurzen Vorbereitungszeiträumen. Gleichermaßen wie eine flexible und reaktionsfähige Planung sowie eine enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Ingenieur:innen, Geolog:innen und Bauarbeiter:innen [5]. Die Distanz zwischen der Baustelleneinrichtungsfläche und dem Standort der Arbeiten verändert sich kontinuierlich im Laufe des Bauvorhabens. Die Entfernung kann aufgrund der geometrischen Verläufe und äußerer Rahmenbedingungen durchaus mehrere Kilometer betragen [26].

Tunnelvortriebsmaschinen haben sich vor etwa 60 Jahren für die Durchführung großer Tunnelbauprojekte etabliert. Seither hat sich die Maschinentechnik zu einer der effizientesten Methoden zur Errichtung von Tunnelbauwerken entwickelt [16]. Die Charakteristik des maschinellen Tunnelvortriebs weist folgende Eigenheiten auf: Zum einen die technische Komplexität der Maschinentechnik, zur individuellen Anpassungen an die geologischen Anforderungen, einschließlich einer präzisen Steuerung und ständigen Überwachung. Zum anderen ist der maschinelle Tunnelvortrieb durch einen stetigen Vortrieb gekennzeichnet. Bestandteil der Vortriebsarbeiten ist zudem der manuelle Einbau der Tunnelschale durch die Maschine. Folglich ist das benötigte Material dauerhaft bereitzustellen. Die Auswahl der optimalen Prozessreihenfolge und eine effiziente Materiallogistik sind von zentraler Bedeutung. Ist der maschinelle Vortrieb gestartet, ist aufgrund der Kontinuität der Prozesskette kaum Spielraum für Änderungen im Bauablauf.

2.2. Baulogistik

Die hohe Dichte und Komplexität der Arbeitsschritte im Bauprojekt erfordert die Notwendigkeit einer erfolgreichen und effizienten Logistikplanung. In diesem Zusammenhang wird die Baulogistik als „Element zur Bildung von Struktur und Prozessen zum räumlichen und zeitlichen Transfer von Objekten jeder Art“ [18, S.80] verstanden. Sie umfasst die Planung, Steuerung und Optimierung der Material- und Informationsflüsse, die für den Bau und Betrieb eines Tunnels notwendig sind. Da Tunnelbauprojekte häufig unter schwierigen Bedingungen stattfinden und hohe Anforderungen an Präzision und Koordination stellen, ist eine gut organisierte Logistik von entscheidender Bedeutung. Eine zentrale Aufgabe besteht darin, das Abraummateriel unverzüglich zu entsorgen und

das für den Ausbau benötigte Baumaterial zum Vortrieb rechtzeitig bereitzustellen. Es wird zwischen der externen und internen Tunnelbaulogistik unterschieden. Die externe Tunnelbaulogistik erstreckt „sich von den Quellen der Baumaterialien über Zwischenlager bis zum Tunneleingang“ [9, S.34]. Die interne Tunnelbaulogistik umfasst das Be- und Entladen der Transportfahrzeuge sowie die Transportfahrten im Tunnel [9].

Trotz der umfangreichen Planungs- und Ausführungsphase eines Tunnelbauwerks ist die detaillierte Bauablaufplanung im Vorfeld nur begrenzt möglich. Wechselnde Bedingungen erfordern kurzfristige Entscheidungen und schnelles Handeln. Aufgrund der Kurzlebigkeit der Arbeitsschritte ist eine präzise Vorplanung schwierig umzusetzen. Zur Optimierung der Ressourcennutzung werden Maßnahmen, wie Fahrzeugaufstockungen oder Geschwindigkeitserhöhungen ergriffen, um Spalten im Ressourcenbedarf zu reduzieren und einen kontinuierlichen Einsatz zu gewährleisten.

Zur Darstellung der aktuellen Logistikplanung werden neben den Vorgängen auch die verwendeten Ressourcen erfasst und in einem Weg-Zeit-Diagramm, dem Netzplan, zusammengefasst. Aufgrund der Vielfalt an Vorgängen führt diese Darstellungsart häufig zu Unübersichtlichkeit. Das allgemeine Ziel, auch bei Störungen im Bauablauf schnell und flexibel zu reagieren und wirtschaftlich umsetzbare Lösungen zu finden, ist mit der derzeitigen Herangehensweise nur schwer erreichbar [26]. Die Planunterlagen basieren auf 2D-Darstellungen mit begrenzten signifikanten Bauzwischenständen. Die Erstellung verschiedener Szenarien mit unterschiedlichen Abläufen, Baustellenlayouts oder einem veränderten Ressourceneinsatz ist aufgrund der Planungsvoraussetzung nur äußerst aufwendig.

Das zu lösende Problem ist komplex: Einerseits muss das Bauwerk in einzelne Fertigungsschritte unterteilt werden, wobei die Fertigungsreihenfolge meist vorgegeben ist, die zeitliche Abwicklung jedoch häufig flexibel bleibt. Andererseits wird die Planungsfreiheit durch die zeitliche Repräsentation, die Personalstärke, den Ressourceneinsatz und die Vorhaltemenge der verschiedenen Geräte eingeschränkt. Ein weiterer entscheidender Planungsparameter ist die Wirtschaftlichkeit. Die optimale Produktionsplanung unter Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen erfordert die Minimierung der Kosten bei gegebenen Freiheitsgraden und Randbedingungen. Die Auswahl der optimalen Ausführungsvariante erfolgt häufig mühsam durch das Verschieben von Vorgängen unter der Berücksichtigung von Pufferzeiten und Kapazitätsgrenzen. Es wird nicht berücksichtigt, dass sich durch Prozessverlängerungen kritische Pfade im Ablauf ergeben können und dadurch potenziell die Bauzeit verlängert wird. Die Einbindung wiederkehrender Elemente in die Ablaufplanung ermöglicht die Bestimmung der Gesamtdauer des Projekts unter Berücksichtigung technischer und produktionspezifischer Abhängigkeiten. Den einzelnen Vorgängen werden die jeweiligen benötigten Einsatzmittel und Materialien zugewiesen, um eine detaillierte Einsatzmittelplanung und Disposition zu ermöglichen [25].

Die reale Bauproduktion im Tunnelbau zeichnet sich durch hohe Flexibilität aus. Die dynamische Interaktion zwischen äußeren Einflüssen, geologische Randbedingungen, bereitgestellte Einsatzmittel und einer zwingenden Durchführungsreihenfolge wird in der Netzplantechnik nicht adäquat berücksichtigt. Eine verbesserte Methodik für die Produktionsplanung im Tunnelbau erfordert eine realitätsnahe und dynamische Abbildung der Interaktion zwischen der Fertigungsabfolge und den vorgehaltenen Einsatzmitteln, wie Geräte, Fahrzeuge und Personal.

2.3. Digitalisierung

Die Digitalisierung im Tunnelbau revolutioniert eine der traditionsreichsten Ingenieurdisziplinen. Diese Innovation bringt eine Vielzahl von Vorteilen mit sich, die Effizienz, Sicherheit und Präzision erhöhen. Insgesamt wird von der Digitalisierung eine optimierte Bauqualität und eine Reduzierung der Baukosten und Bauzeit erwartet [13]. Der interdisziplinäre Ansatz zum „digitalen Planen, Bauen und Betreiben“ [5, S.5] von Bauvorhaben wird im Bereich des Tunnelbaus nur zögerlich angenommen. Aufgrund der anspruchsvollen Natur des Tunnelbaus steht die Umsetzung der Digitalisierung hier sowohl zeitlich als auch technologisch dem Hochbau nach. Forschungs- und Pilotprojekte tragen durch deren Testungen und Analysen zur schrittweisen Implementierung bei [27].

2.3.1. Building Information Modelling (BIM)

Der Begriff BIM hat sich mittlerweile im Sprachgebrauch der Ingenieur:innen umfassend etabliert und steht für die „Digitalisierung und strukturierte Informationsverarbeitung im Bauwesen insgesamt“ [14, S.57]. Diese Methode basiert auf einem kooperativen Ansatz zur Planung, Realisierung und Bewirtschaftung von Anlagen über deren gesamten Lebenszyklus. Im Bereich des Tunnelbaus wird Tunnel Information Modelling (TIM) als spezifische Methode angewendet. Im Vergleich zu anderen Infrastruktursektoren ist der bestehende wissenschaftliche Kenntnisstand in diesem Bereich trotz des hohen Umsetzungs- und Entwicklungspotenzials unzureichend ausgearbeitet [3].

Die Nutzung von BIM-gestützter Planung und Ausführung hat seit ihrer konsequenten Einführung Mitte der 2000er Jahre zu erfolgreichen Ergebnissen in großen Teilen der amerikanischen und großbritannischen Industrie geführt. Der *National BIM-Standard*, sowie eine Vielzahl lokaler Richtlinien regeln die Erstellung digitaler Gebäudemodelle für unterschiedliche Anwendungsfälle. In Europa ist die Verwendung von BIM im Vergleich zu Amerika und Großbritannien im Jahr 2021 noch weniger weit verbreitet und nationale Standards sind noch nicht ausreichend definiert [2]. Die DAUB-Empfehlung dient seither als Impulsgeber auf Basis von Empfehlungen im Untertagebau, um die bevorstehenden Entwicklungsschritte auszurichten und zu beschleunigen [5].

Die Nutzung digitaler Methoden ist eine zentrale Forderung der Reformkommission *Bau von Großprojekten* der Bundesrepublik Deutschland. Das Ziel lautet: „Erst virtuell, dann real bauen“. Ein Stufenplan wurde eingerichtet, um die Nutzung von BIM zu unterstützen und Infrastrukturprojekte in Zukunft erfolgreicher zu gestalten [11]. Bisher ist im europäischen Raum im maschinellen Tunnelbau ausschließlich eine dreidimensionale Modellierung des Tunnelrohbaus Standard [11]. Eine besondere Herausforderung besteht darin, die langen Lebensdauern von bis zu 100 Jahren und die damit verbundenen Lebenszyklen der Bauwerke sowie deren volkswirtschaftlichen Wert ganzheitlich in einer Datenstruktur zu erfassen. Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen Bodeneigenschaften, Bauverfahren und dem daraus resultierenden Festigkeits- und Verformungsverhalten ist eine präzise Prognose des endgültigen Bauwerks herausfordernd [5] [14].

Die Implementierung digitaler Methoden erfordert eine sinnvolle Integration in die Planungs- und Ausführungsprozesse sowie eine Anpassung der bestehenden Prozessabläufe. Aufbauend auf der detaillierten Analyse der bedeutendsten Planungs- und Ausführungsprozesse werden die notwendigen Informationen, Verantwortlichkeiten und Rollen für die einzelnen Aufgaben definiert. Die verschiedenen Prozesse benötigen je nach Leis-

tungsphase unterschiedliche geometrische und semantische bzw. alphanumerische Informationen, die im Einzelnen projektspezifisch festgelegt werden müssen. Bei der Definition der Informationsdichte ist es wichtig, nur die relevanten Faktoren der verschiedenen Phasen und Anwendungen zu berücksichtigen [20]. Die Erstellung von digitalen Zwillingen ermöglicht eine bidirektionale digitale Repräsentation eines realen Objektes. Der Übergang von einem digitalen Modell zu einem digitalen Zwilling verläuft in drei Stufen: Das digitale Modell verknüpft die physischen und virtuellen Objekte miteinander, während ein digitaler Schatten eine automatisierte Übertragung von Daten durch beispielsweise Sensoren vom physischen zum virtuellen Objekt ermöglicht. Die dritte Stufe umfasst die Abbildung des digitalen Zwilling. Die Verknüpfung von Geometrie und Informationen über alle Projektphasen sorgt für die Einzigartigkeit und Wirtschaftlichkeit von BIM [26]. Die Daten werden aus verschiedenen Quellen und Modellen extrahiert, miteinander verknüpft und in einem Koordinatensystem basierend auf Position und Abmessungen integriert. Dabei sind die gemeinsamen Maßstände und Koordinatensysteme in der Regel über Referenzpunkte definiert. „Zur Vermeidung von Abweichungen wird häufig in Abschnitten gearbeitet, die sich auf ein kartesisches Koordinatensystem beziehen“, so im Bericht zu BIM Anwendungen im Tunnelbau [20]. Neben den geometrischen und modellbasierten Informationen werden im maschinellen Tunnelbau darüber hinaus noch Monitoring- und Maschinendaten implementiert. In den meisten Fällen erfolgt der Austausch der Datensätze und der externen Webanwendungen über das Datenaustauschformat IFC (Industry Foundation Classes) [14] [5].

Die digitale Abbildung des Bauablaufs nimmt in Anbetracht des leistungsbestimmenden Charakters eine entscheidende Rolle ein. Die modellbasierte Logistikplanung verspricht durch die direkte Verknüpfung von Ort, Zeit und Information erhebliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Ansätzen [5] [26]. Trotz des hohen potenziellen Nutzens einer Simulation sind die verursachten Kosten häufig nur schwer monetär zu quantifizieren [24].

2.3.2. Simulation

Simulationen ermöglichen „eine leicht begreifbare Navigation durch die Projektinformationen“ [13, S.126]. „Beteilige und Betroffene bekommen ein realistisches Bild des [Geplanten] [...], eine räumliche Darstellung und sogar die Möglichkeit verschiedenste Blickwinkel einzunehmen“ [5, S.24]. Aufgrund der orts- und zeitlichen Verknüpfung erhält man ein transparentes, ganzheitliches digitales Modell des Tunnelbauprozesses und des Tunnels, mit dem sich die unterschiedlichsten Aufgaben effizient erledigen lassen. In der VDI Richtlinie 3633 heißt es, dass eine BIM basierte Simulation des Bauablaufs eine Nachbildung des Systems mit seinen dynamischen Prozessen sei, um Erkenntnisse zu erlangen, welche auf die Wirklichkeit zu übertragen sind [26].

Zur Darstellung der Logistik legen Erfahrungsberichte nahe, neben der Hauptmodellierung ein separates Modell vorzusehen. Durch eine vollständige Parameterzuweisung können die Logistikprozesse im Modell abgebildet und bewertet werden [14]. Aufgrund der Verknüpfungen der einzelnen Elemente miteinander, sind Untersuchungen zu Optimierungsansätzen möglich. Es empfiehlt sich, schlanken Abbildungen der Abläufe nach den Prinzipien der *Lean-Production* im Sinne der Null-Fehler-Politik und Prozessoptimierung sowohl im Vortrieb als auch in der Entsorgung zu integrieren [15].

3. Bauvorhaben

3.1. Baubeschreibung

Der Bau des Brennerbasistunnels stellt eines der bedeutendsten europäischen Infrastrukturprojekte der Gegenwart dar. Das Tunnelbauwerk ist Kernelement im Ausbau des europäischen Verkehrsnetzes (TEN-T). Es ist, wie in Abbildung 2 ersichtlich, Bestandteil des Skandinavisch-Mediterranen Korridors (ScanMed) von Helsinki (Schweden) nach Valletta (Italien).



Abbildung 2: ScanMed-Korridor [7]

Das Bauwerk durchquert die Alpen an der Landesgrenze zwischen Österreich und Italien und ersetzt die bisherige Bahnverbindung zwischen Innsbruck (Österreich) und Franzensfeste (Italien). Der Brennerbasistunnel ist ausschließlich für den Güter- und Personenzugverkehr ausgelegt und ist Voraussetzung für die zukünftige Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene. Bei einer Gesamtlänge von 55,0 Kilometern (Tulfes - Franzensfeste) bzw. 64,0 Kilometern (Innsbruck - Franzensfeste) und insgesamt 230,0 Tunnelkilometer zählt das Bauwerk zu der weltweit längsten unterirdischen Eisenbahnstrecke. Der Brennerbasistunnel, wie in Abbildung 3 abgebildet, besteht aus einem System mit zwei eingleisigen Tunnelröhren (HT-O und HT-W) in einem Abstand von 70,0 m. Die beiden Röhren sind alle 333,0 m durch Querschlägen miteinander verbunden. Mittig, rund 11,0 m tiefer, verläuft der Erkundungs- und spätere Dienststollen. Die geologische Erkundung des Gebirges fand vor dem Bau der Haupttunnelröhren statt. Der Innendurchmesser der Haupttunnelröhren umfasst jeweils 8,1 m und dessen des Erkundungsstollens 6,0 m.

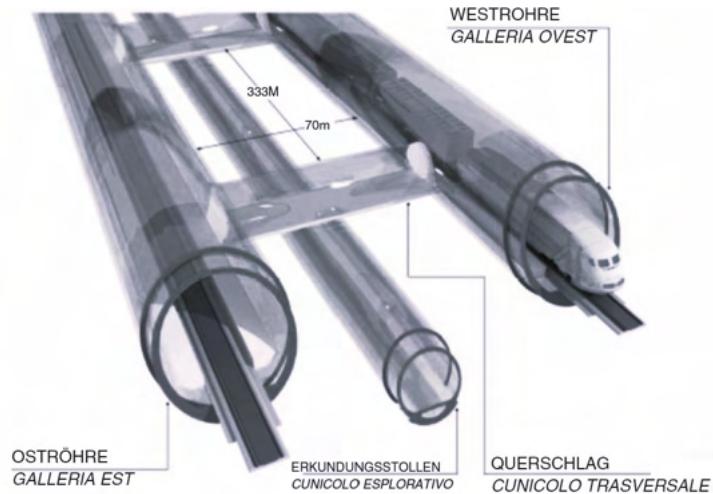


Abbildung 3: Querschnitt der Haupttunnelröhren, des Erkundungsstollen und des Querschläge - schematisch [21]

Das gesamte Bauvorhaben ist in sieben Baulose eingeteilt. Die gegenständige Arbeit beschäftigt sich mit dem Baulos H41 (Sillschlucht - Pfons), was neben vier weiteren Baulosen zur österreichischen Projektverantwortlichkeit gehört. Alle weiteren Baulose sind in der italienischen Verantwortlichkeit.

Das grenzübergreifende Projekt spiegelt die Herausforderungen bei der Planung und Umsetzung aufgrund der divergierenden Planungs-, Ausschreibungs- und Baukulturen der beteiligten Länder Österreich und Italien wider [21]. Im Rahmen der Stiftungsassistenz „Tunnel Information Modelling (TIM)“ zwischen dem Land Tirol und der Universität Innsbruck soll ein „digitaler Zwilling“ des Brennerbasistunnels entstehen, in welcher die Diplomarbeit Bestandteil ist.

3.2. Bauphase

Der Bau des Bauloses H41 ist in insgesamt elf Bauphasen eingeteilt. Diese sind in der nachstehenden Tabelle 2 dargestellt.

Die Gesamtbauzeit des Bauloses ist auf 80 Monate angesetzt. In der gegenwärtigen Arbeit wird ausschließlich die Baulogistik für die Bauphase 3, dem kontinuierliche Vortrieb in den beiden Haupttunnelröhren betrachtet. Die Bauphase 3 umfasst die Montage des Förderbandes zum Abraumabtransport, die Herstellung einer Betonsohle in den Montagekavernen und der Querkaverne und die Montage der Tunnelbohrmaschinen. Ebenso umfasst die Phase die Herstellung der Demontagekaverne sowie die zwei kontinuierlichen Vortriebe in den Haupttunneln (HT-O und HT-W). Da die Baulogistik zur Versorgung der Tunnelbohrmaschine betrachtet wird, ist ausschließlich der kontinuierliche Vortrieb der Haupttunnel in der Bauphase 3 bis zur Baulosgrenze relevant. Der zyklische Vortrieb der Querstollen der Bauphase 4 räumlich versetzt zur Bauphase 3 durchgeführt.

Tabelle 2: Bauphasen am Brenner Basistunnel

Bauphase	Aufgaben
0	Einrichtung der Baustelle, Vorarbeiten und Errichtung Brücke Ahrental
1	Ertüchtigung Erkundungsstollen und Vortriebsnischen EKS
2	Zyklische Vortriebe Knoten NHS Innsbruck und Haupttunnel
3	Kontinuierliche Vortriebe Haupttunnel
4	Zyklische Vortriebe Querschläge
5	Innenausbau HT, QS, und Knoten NHS Innsbruck
6	Innenausbau EKS und Zugangsstollen Sillschlucht
7	Innenausbau Verbindungstunnel (Trennwand und Sprengmittellager)
8	Innenausbau Zugangstunnel Ahrental
9	Innenausbau Rettungsstollen Tulfes
10	Baustellenräumung

3.3. Stationierung und Länge der Objekte

Folgende Stationierungen sind für die Baulogistik des maschinellen Tunnelbaus relevant:

Tabelle 3: Stationierung und Länge der Objekte

	Länge	Stationierung
Südvortrieb Haupttunnel Ost	ca. 8,1 km	km 8.4 + 79.000 bis km 16.5 + 87.000
Südvortrieb Haupttunnel West	ca. 8,3 km	km 8.2 + 29.000 bis km 16.5 + 75.000
Knoten NHS Innsbruck Ost	ca. 2,5 km	km 5.9 + 71.000 bis km 8.4 + 79.000
Knoten NHS Innsbruck West	ca. 2,2 km	km 5.9 + 98.133 bis km 8.2 + 29.000
Logistikbereich NHS Ost	ca. 0,5 km	km 6.2 + 80.000 bis km 6.7 + 50.000
Logistikbereich NHS West	ca. 0,5 km	km 6.3 + 00.000 bis km 6.7 + 70.000
Montagekaverne Ost	ca. 0,04 km	km 8.4 + 00.000
Montagekaverne West	ca. 0,04 km	km 8.1 + 50.000

3.4. Bauablauf

Die Ablaufplanung im Tunnelbau stellt Planung und Ausführung vor logistische Herausforderungen. Die Vielzahl an wiederkehrenden Prozessschritten fordert ein durchdachtes Konzept. Die Errichtung des Bauwerks teilt sich zwischen den beiden Kernprozessen, der Entsorgung und dem Vortrieb auf.

Das Entsorgungskonzept wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Der kontinuierlicher Vortrieb wird mit einer Tunnelbohrmaschine je Haupttunnelröhre gewährleistet. Das zugehörige Vortriebskonzept sieht vor, logistisch alle Herausforderungen zu meistern, um die Tunnelbohrmaschine kontinuierlich zu versorgen. Dafür werden die Stahlbetonsegmente auf dem Baufeld werkseitig vorgefertigt und auf der BE-Fläche zwischengelagert. Außerdem ist eine Lagerstätte im Bereich der NHS Innsbruck vorgehalten, um eine kurzfristige Bereitstellung der benötigten Bauteile zu ermöglichen. Spezialfahrzeuge transportieren die Baumaterialien innerhalb des Baufeldes. Der Transport in den Haupttunnelröhren bis

zur TBM ist mit Versorgungszügen umgesetzt. Es handelt sich bei der Tunnelbohrmaschine um eine Single-Schild Hartgestein-TBM, mit einem Bohrdurchmesser von 10,4 m und einer Gesamtlänge von etwa 160,0 m. Der Aufbau der Maschine findet in der Maschinenkaverne statt. In der anschließenden Startröhre beginnt der Ringbau der Segmente. Das geplante Vortriebsziel je Haupttunnelröhre ist auf 18,5 Meter pro Tag definiert, was einem täglichen Einbau von rund 9,5 Tübbingringen entspricht.

3.5. Baustelleninfrastruktur

Die Baustellenbereiche obertage sind über einen radgebundenen Transport erschlossen. Die Betonfertigteile, Baumaterialien sowie Betriebsstoffe werden mit den Spezialfahrzeugen der Marke TERBERG transportiert. Im Weiteren werden die Fahrzeuge als Terberg's bezeichnet. Die Fahrzeuge weisen eine maximale Traglast von 60,0 Tonnen auf. Die Fahrgeschwindigkeit ist abhängig von dem Gelände und der Beschaffenheit der Straßen. Die durchschnittliche Geschwindigkeit im idealen unbeladenen Zustand beträgt $10,0 \frac{km}{h}$. Je nach Auslastung der Traglast und Gelände reduziert sich die Geschwindigkeit bis auf ein Minimum von $3,0 \frac{km}{h}$. Zur Beförderung von sonstigen Materialien stehen eine Vielzahl an Baustellenfahrzeugen wie Radlader, Bagger, Mischer oder Kipper zur Verfügung. Um die nötigen Materialien und Baustoffe zu verladen, sind Portalkrane an den jeweiligen Umschlagplätzen vorgehalten.

Das Tunnelbauwerk ist bis einschließlich des Bereichs der NHS Innsbruck mit radgebundenen Verkehrsmitteln erschlossen. Im Logistikbereich der NHS Innsbruck ist ein Umschlagplatz zur Zwischenlagerung von Baumaterialien vorhanden. Es besteht die Möglichkeit zur Be-, Ent- und Verladung der Fertigteile und Baustoffe. Ebenfalls wechselt in diesem Bereich das Transportmittel von Fahrzeugen auf Versorgungszüge. Die Strecke zwischen der Nothaltestelle und der Tunnelbohrmaschine ist durch meist zweigleisigen Schienenverkehr erschlossen. Dabei sind mehrere Weichen integriert, um den Wechsel zwischen den Gleisen zu ermöglichen. Die Fahrgeschwindigkeit der Zugstrecke beträgt $20,0 \frac{km}{h}$. Die Streckenteile, die mit Weichen versehen oder durch Hindernisse verengt sind, sind mit einer verminderten Geschwindigkeit von $5,0 \frac{km}{h}$ zu befahren. Im Zuge des Vortriebs der TBM wird die Gleisstrecke kontinuierlich erweitert. Eine konkrete Beschreibung der Arbeitsschritte folgt in Kapitel 4.2.

3.6. Elemente der Baulogistik

Das Baulos H41 im Bereich Sillschlucht - Pfons gehört zum österreichischen Projektabschnitt des BBT. Die im Baulos enthaltenen, auf die Baulogistik Einfluss nehmenden Bestandteile sind nachfolgend aufgelistet und in der Abbildung 4 dargestellt.

- Haupttunnelröhren mit den Hauptröhren Ost und West
- Knoten Nothaltestelle Innsbruck
- Querschläge
- Zugangstunnel Ahrental
- Baustelleneinrichtungsfläche

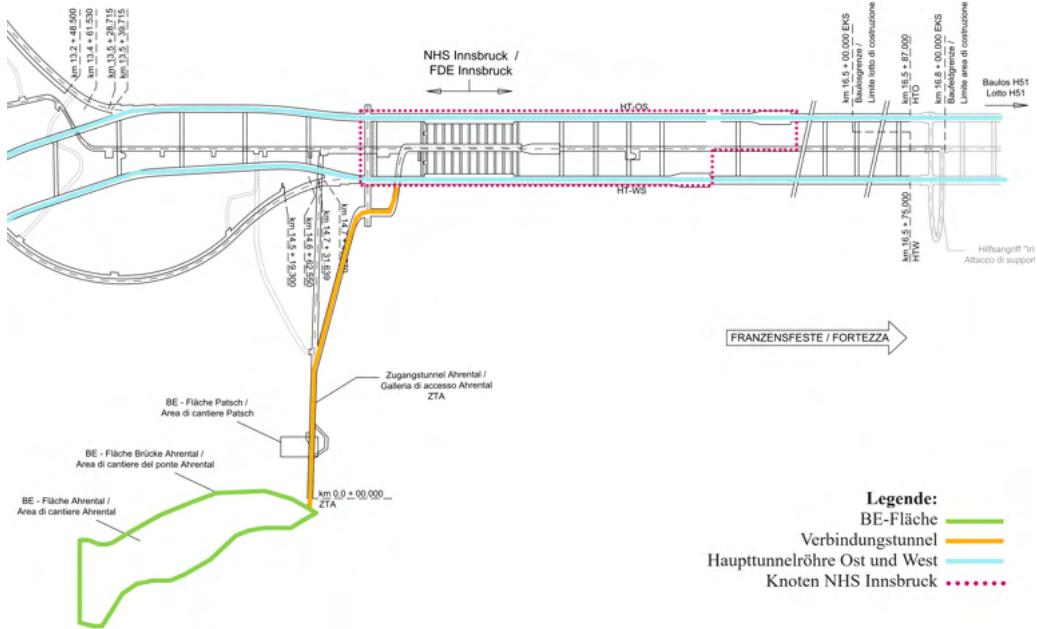


Abbildung 4: Darstellung der Örtlichkeiten - schematisch

3.6.1. Haupttunnelröhre Ost und West

Der Haupttunnel besteht aus zwei Tunnelröhren, Haupttunnelröhre West (HT-West) und Haupttunnelröhre Ost (HT-Ost). Beide Röhren werden nach dem identischen Prinzip im maschinellen Tunnelvortrieb nach der Bauphase 03 gemäß Kapitel 3.2 aufgefahren.

Organisation

Der Vortrieb, ausgehend von der Montagekaverne im Bereich der NHS Innsbruck, erfolgt in südliche Richtung bis zur Baulosgrenze zu dem Baulos H51 entsprechend der Stationierung nach Tabelle 3 des Kapitels 3.3. Es ist ein Umschlagbahnhof je Hauptröhre zur Versorgung der TBM im Aufweitungsbereich der Nothaltestelle eingerichtet. Die genauen logistischen Abläufe in den Haupttunnelröhren sind im Kapitel 4.2 ab Prozess 04 nachzulesen. Die Versorgung bis zur TBM erfolgt gleisgebunden über Versorgungszüge.

Die Tunnelröhren weisen einen Bohrdurchmesser von 10,4 m auf und sind mit einem gedichteten Tübbingring mit einer Stärke von 40,0 cm ausgekleidet. Einziger Unterschied zwischen den beiden Tunnelröhren besteht im Bau der Querschläge. Diese Arbeiten sind der Bauphase 4 zuzurechnen und werden zeitlich und räumlich versetzt zu dessen der Bauphase 3 nachgezogen. Diese werden von dem HT-Ost aus hergestellt und über den HT-West durchgebrochen. Infolgedessen müssen an der Versorgungsstrecke der Haupttunnelröhre Ost zwei Ausweichstellen mit einer Länge von 150,0 m eingerichtet werden. In der HT-West beläuft sich dies auf jeweils 50,0 m. Aus Sicherheitsgründen muss die Ankunft des Zuges an den beeinträchtigten Bereichen durch lautes Hupen angekündigt werden und die Fahrgeschwindigkeit auf 5,0 $\frac{km}{h}$ reduziert werden.

Grundsätzlich ist das tunnelaußenliegende Gleis für die Versorgungslok der TBM reserviert, während das tunnelinnenliegende Gleis für sonstige Arbeiten in Verwendung ist. Der Vortrieb in der Haupttunnelröhre Ost ist 8,1 km lang und in der Röhre West 8,5 km.

Regelquerschnitt

Der Tübbingring ist mit seinen Eigenschaften dem einwirkenden Gebirge angepasst. Die Geometrie der Segmente innerhalb der Tübbingtypen bleibt identisch. Eine genaue Beschreibung zu den Betonsegmentteilen folgt in Kapitel 3.7.1. Mit einem Bohrdurchmesser von 10,4 m und einer 40,0 cm starken Verkleidung ist ein liches Raumprofil von 4,5 x 3,0 m nach Abbildung 5 möglich.

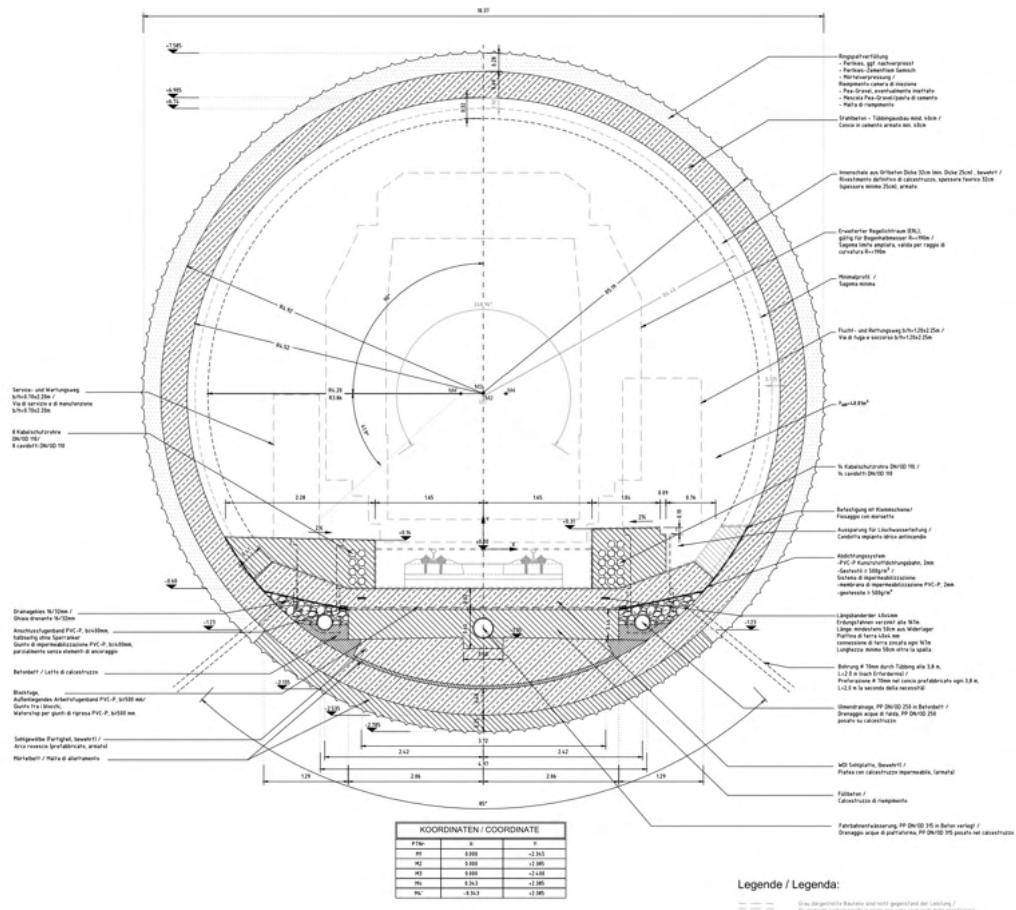


Abbildung 5: Regelquerschnitt Haupttunnelröhre - konventioneller Vortrieb

3.6.2. Knoten NHS Innsbruck

Der Knoten NHS Innsbruck dient in der Bauphase 03 als logistischer Knotenpunkt. Alle Transporte, die in oder aus dem Tunnelbauwerk zu führen sind, passieren die Örtlichkeit. Der Bereich ist über den Zugangsstollen und die Querkaverne erschlossen. Die genaue

Stationierung ist im Kapitel 3.3 nachzulesen. Des Weiteren besteht der NHS Innsbruck aus mehreren Bestandteilen, die nachfolgend genauer erläutert sind.

Bestandteile

Der Bereich der Nothaltestelle befindet sich zwischen den beiden Haupttunnelröhren. Dabei sind die Haupttunnelröhren über elf Verbindungsstollen miteinander verbunden. Parallel zu den Hauptröhren führt mittig, in der Symmetriearchse der Verbindungsstollen ein Mittelstollen. Dieser weist eine Länge von 850,0 Metern auf und wird im Bauzustand als Verkehrsweg benutzt. Nach Fertigstellung dient dieser als Abluft- und Zuluftträger und wird ebenso zur Evakuierung der Passagier:innen im Ereignisfall verwendet. Die Längsneigung ist im Bereich der Nothaltestelle konstant 6,7 %. Der NHS Innsbruck ist ein komplexes Netzwerk, das sich aus verschiedenen Elementen gemäß Abbildung 6 zusammensetzt.

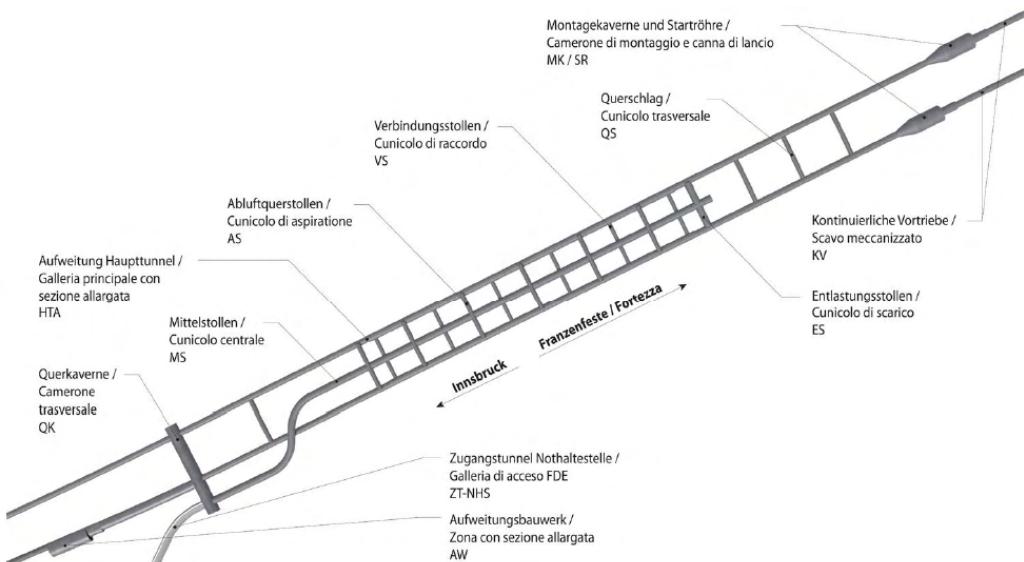


Abbildung 6: Knoten NHS Innsbruck - schematisch

Die Querkaverne hat im Bauzustand einen ausschließlich logistischen Nutzen. Diese wird als Versorgungsknotenpunkt genutzt, indem der Weg zwischen den Haupttunnelröhren und Mittelstollen mit dem Verbindungstunnel erschlossen wird. Südlich der Querkaverne befindet sich zwischen der Aufweitung im Haupttunnel und dem Entlastungsstollen der Logistikbereich der NHS Innsbruck. Bestandteil davon sind zwei Haupttunnelröhren mit aufgeweitetem Querschnitt für die Lagerung und den Transport von Gütern. Ebenso wie der Mittelstollen, welcher oberhalb des Erkundungsstollen und zwischen den Haupttunnelröhren liegt, sowie elf Verbindungsstollen im Abstand von etwa 90,0 m. Der Entlastungsstollen schließt den Logistikbereich ab.

Im Bereich der Nothaltestelle ist eine Lagerfläche je Haupttunnelröhre eingerichtet. Dort finden jeweils zwölf Tübbingringe zu je sechs Segmenten, einschließlich der Sohlfertigteile, Zementsilos, Gleise und sonstige Bau- und Betriebsstoffe für den Unterhalt des Tunnelvortrieb Platz. Des Weiteren befindet sich am südlichen Ende des Mittelstollens

im Bereich des Entlastungsstollens eines der beiden Perlkieslager. Den südlichen Abschluss des Knoten NHS Innsbruck definiert die Montagekaverne.

Organisation

Der Knotenbereich der NHS Innsbruck dient als Transport- und Bereitstellungsfläche. Die Verkehrswege sind für den An- und Abtransport nach definierter Richtung befahrbar. Vom Verbindungstunnel aus kommend, treffen die Fahrzeuge an der Querkaverne ein. Dort befindet sich ein Kreuzungspunkt, von dem aus die östliche und westliche Haupttunnelröhre erschlossen ist. Weiter in südliche Richtung ist der Logistikbereich der NHS Innsbruck eingerichtet. Das Material wird dort wechselweise von den Terbergs oder den Versorgungszügen be- und entladen. Es besteht die Möglichkeit der Zwischenlagerung der Baustoffe in diesem Bereich, wofür der halbseitige Tunnelquerschnitt bereitgestellt ist. Die zweite Tunnelseite ist mit Gleisen versehen und wird als Transportstrecke für Fahrzeuge und Züge verwendet. Nach Abschluss des Be- oder Entladevorgangs setzt der Versorgungszug die Fahrt Richtung TBM fort, während die Terbergs über den Entlastungsstollen, den Mittelstollen und den Querstollen zum Zufahrtstunnel Richtung Tageslicht zurückkehren. Der Mittelstollen dient ebenso als Parkfläche für Autos und zur Lagerung von sonstigen Gegenständen. Das Perlkieslager befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Zwischenlager mittig des Entlastungsstollens. Dieses wird direkt mit Kipper über den Versorgungstunnel beliefert. Es steht ein Behälter für Perlkies am Zug bereit, der mit einem Radlader aus dem Perlkieslager beladen wird.

3.6.3. Querschläge

Gemäß Kapitel 3.2 werden in der Bauphase 04 die Querstrukturen hergestellt. Aus diesem Grund haben die detaillierten Ausführungsschritte keine Bedeutung. Von größerer Relevanz ist allerdings, in welchem zeitlichen Rahmen diese hergestellt werden und mit welchen räumlichen Einschränkungen in den Haupttunnelröhren zu rechnen ist. Zeitlich versetzt zur Bauphase 03, dem kontinuierlichen Vortrieb des Haupttunnels, sind die Querschläge im zyklischen Vortrieb herzustellen. Dabei werden diese in der Haupttunnelröhren Ost aufgefahren und über die Haupttunnelröhre West durchgebrochen. Daraus folgt, dass im Bereich der Querstollen räumliche Einschränkungen in den Haupttunnelröhren aufgrund der zusätzlichen Arbeiten vorhanden sind. In der HT-Ost beläuft sich dies auf 150,0 Meter, in der HT-West ist mit 50,0 Metern zu rechnen. Außerdem werden an zwei Querstollen gleichzeitig Arbeiten vollzogen. In den Bereichen der Querschläge sind die Querschlagstübbinge verbaut.

3.6.4. Zugangstunnel

Der Zugangstunnel ist das 2,4 km lange Bindeglied zwischen der Baustelleneinrichtungsfläche und der Tunnelröhren. Das Bauwerk ist zweispurig ausgebaut, besitzt ein Längsgefälle von maximal 11,5 % und weiß einen Innendurchmesser von knapp 9,0 Metern auf. In Abbildung 7 ist der Längsschnitt des Tunnelementes schematisch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass kein konstantes Steigungsverhältnis vorliegt. Nach etwa 0,7 km weitet sich für rund 200,0 m der Tunnelquerschnitt aufgrund eines vertikalen Lüftungsschachtes auf und die Längsneigung sinkt in diesem Bereich auf 0,5 %. Bei km 1,6 weitet

sich der Querschnitt nochmals für 200,0 m und die Längsneigung sinkt auf 6,0 %. Ab km 2,1 sinkt die Längsneigung auf 0,5 % und leitet das Ende des Verbindungstunnels ein.

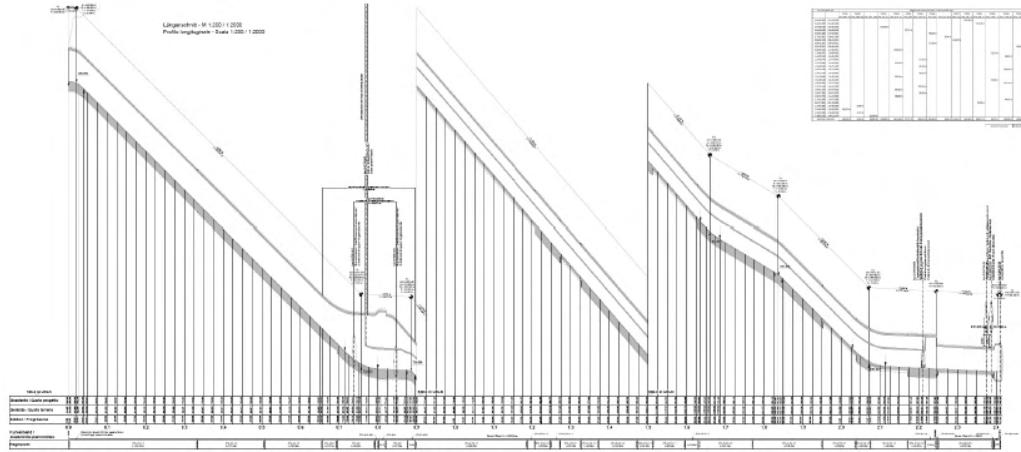


Abbildung 7: Längsschnitt des Zugangstunnels - schematisch

Organisation

Die Transport- und Versorgungsprozesse innerhalb des Tunnelbauprojekts erfolgen über den Zugangstunnel. Verschiedenste Versorgungsleitungen für Wasser und Strom sind an der Tunnelinnenseite angebracht. Die Entwässerung des Bergwassers und der Fahrbahn sind über die beiden Außenkanten der Fahrbahn realisiert. Gemäß der Straßenverkehrsordnung gilt das Prinzip des Rechtsfahrgebots. Es ist auf Höhenbegrenzungen durch Versorgungseinrichtungen durch die Fahrzeuge zu achten und gegebenenfalls zeitweise die Fahrspur zu wechseln. Außerdem wird während der Realisierung der Bauphase 03 die Betonsohle des Zugangstunnels streckenweise, einspurig erneuert. Es kommt zu Ampelschaltungen auf der Versorgungsstrecke. Aufgrund der minimalen Geschwindigkeitsannahme der Fahrzeuge in der Simulation wird die Ampelschaltung vernachlässigt.

Regelquerschnitt

Es gibt mehrere Möglichkeiten der Ausführung des Zugangstunnels, die sich in Art der Innenschale, Geometrie und Größe unterscheiden. Mit einem Durchmesser von 6,1 m im Großteil des Tunnelquerschnitts ist ein liches Raumprofil von 3,5 x 4,0 m bzw. 4,2 x 3,5 m möglich. Die Versorgungseinrichtungen zur Be- und Entlüftung im Tunnelinneren. Diese weisen eine Höhe von rund 1,0 m auf und sind an der Oberkante der Innenschale durch Verdübelungen befestigt.

3.6.5. BE-Fläche Ahrental Süd

Im Bereich der Baustelleneinrichtungsfläche wird ein Großteil der Bauleistung des Bau-loses vorbereitet. Der Bereich Ahrental liegt unmittelbar vor dem Portalbereich des Zugangstunnels Ahrental und erstreckt sich vom Portal des Zugangsstollens entlang der

A13 in nördliche Richtung über eine Fläche von 52.000,0 m² gemäß der Abbildung 8. Die Höhenlage am Portal ist auf 810 m ü. NN definiert.

Bestandteile

Die Baustelleneinrichtungsfläche dient als Herstell-, Lager- und Verladefläche für Bau- und Betriebsstoffe und Anlagen. Im nördlichsten Bereich der BE-Fläche ist die Tübbingproduktion angeordnet. In der Halle der Tübbingproduktion werden die Stahlbetonsegmente in einem halb-automatisierten Verfahren geschalt, bewehrt und betoniert. Es ist eine Mischanlage zur Produktion des Betons im Tübbingwerk inkludiert. Das Material wird südöstlich der Tübbingproduktionshalle angeliefert, in die Halle einbracht und für die Produktion vorbereitet. Die Segmente durchlaufen ein Herstellungsverfahren und werden im frisch ausgehärteten Zustand in der dazugehörigen Lagerhalle zur Aushärtung gelagert. Nach Erreichen der erforderlichen Festigkeit werden die Tübbingteile und Fertigteilsohlen von der Lagerhalle mithilfe von Terberg-Fahrzeugen zu dem Tübbinggaußenlager transportiert. Die Betonfertigteile werden in Reihen aufgestapelt und nach ihrer Art (Segment- oder Sohlteil) gemäß Abbildung 10 gelagert. Die Fläche ist mittig durch eine Versorgungsstraße geteilt, wodurch eine größere und eine kleinere Lagerfläche entsteht. Demnach beträgt die Kapazität der größeren Lagerfläche im Westen 2700 Segmentteile. Dort sind vorrangig Normaltübbinge mit den entsprechenden Sohlstücken gelagert. Die östliche, kleinere Lagerfläche ist für die Lagerung von rund 1200 Sonder-, Mess- und Querschlagtübbinge in Verwendung. Eine genaue Beschreibung der Tübbingteile ist in Kapitel 3.7.1 nachzulesen. Jede der beiden Lagerfläche ist mit einem Portalkran mit einer maximalen Hubleistung von 40,0 Tonnen ausgestattet.

Weiter in Richtung Süden befinden sich Umkleide, Büro, Magazinhalle, Kfz-Werkstatt und Materialwerkstatt. Die Containeranlage ist auf einer asphaltierten Lagerfläche gegründet. Auf der Baustelleneinrichtungsfläche sind die Einrichtungen zur Lagerung von Perlkies und Gleisen sowie eine Magazinhalle, eine E-Werkstatt und Müllcontainer platziert im Südwesten, wie in Abbildung 8 dargestellt. Außerdem ist ein Zementsilo sowie eine Mischanlage zur Herstellung von Spritzbeton auf der BE-Fläche südöstlich angeordnet. Der Zement wird in transportierbare Tanks mit einer Füllmenge von 500,0 kg abgefüllt und luftdicht verschlossen. Je nach Bedarf werden bis zu 16 Tanks gleichzeitig mit dem Terberg zum Logistikbereich des NHS Innsbruck gebracht.

Organisation

Erschlossen ist die Baustelleneinrichtungsfläche über eine befestigte Fahrstraße mit einer geregelten Verkehrsordnung. Die Verkehrsorganisation basiert auf einer Einbahnstraßenstruktur gemäß Abbildung 8. Jegliches Baustellenpersonal bewegt sich auf der BE-Fläche entweder zu Fuß oder mit einem Pkw fort. Die Tübbingteile, die Sohlfertigteile, der Zement und sonstige Kleinbauteile werden zur entsprechenden Lagerfläche mit den Terbergs transportiert. Während der Perlkies mit Kipfern direkt zu den Lagerstätten befördert wird, werden alle weiteren Bauteile mit einem Portalkran auf die Terbergs verladen. Der reguläre Abraumabtransport ist unterirdisch über eine Förderbandeinrichtung Bau-losübergreifend geregelt. Es führt ein Förderband zur Schuttentsorgung auf die befestigte Fläche. Dies wird ausschließlich in Anspruch genommen, wenn im eigentlichen Abraumsorgungskonzept Störungen oder Unterbrechungen auftreten. Der angefalle-

ne Abraum muss daraufhin zügig mit Fahrzeugen manuell zur Schutterdeponie gebracht werden.

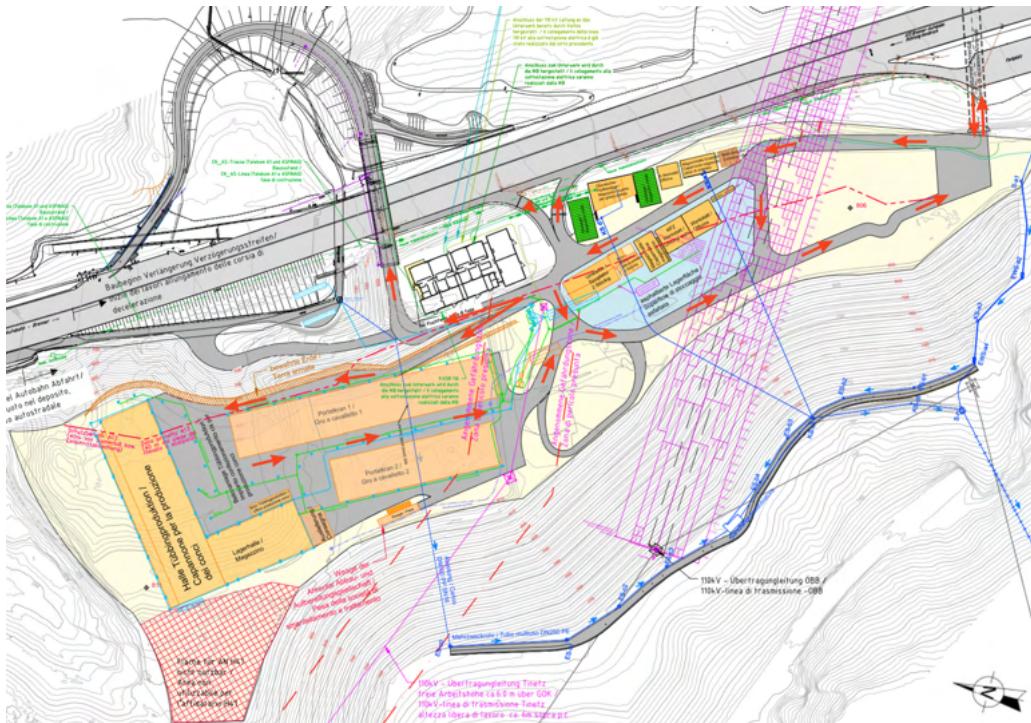


Abbildung 8: Lageplan der BE-Fläche

3.7. Bauliche Bestandteile

Im Nachfolgenden sind die Hauptbestandteile zur Erstellung des Tunnelbauwerks im maschinellen Tunnelbau beschrieben.

3.7.1. Tübbing

Die vorgefertigten Stahlbetonsegmente werden beim maschinellen Tunnelvortrieb zur Sicherung des ausgebrochenen Hohlraums eingebracht. Im Regelfall sind die Tübbinge für die dauerhafte Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit im Endzustand und die Erfüllung der Qualitätsstandards des Tunnelbaus zuständig. Im kontinuierlichen Vortrieb ist ein einschaliger Ausbau mit gedichtetem Tübbing mit Ortbetoninnenschale in Verwendung. Das Ringkonzept besteht aus einem Universalring, der aus sechs Segmentteilen besteht. Diese unterscheiden sich untereinander in Form und Geometrie. Es werden insgesamt sechs Ausführungen (A, B1, B2, C1, C2 und K) hergestellt. Die Unterschiede zeigen sich in der geometrischen Form und der Möglichkeit der Verdübelung und Öffnungen. Dadurch entstehen insgesamt 18 verschiedene Einbaumöglichkeiten. Die individuelle Anordnung wird durch ein Computerprogramm generiert und erfüllt alle Anforderungen an die Standsicherheit und Tragfähigkeit. Leitstein ist dabei das Segment A, gefolgt von Segment C1, B1, C2 und B2. Das K-Segment vervollständigt den Ring. Je

nach Anordnung der Teile im Tunnelquerschnitt sind verschiedene linienartige Geometrien möglich. Die Abbildung 9 zeigt eine mögliche Einbausituation des Tübbingringes ohne Sohlstein.

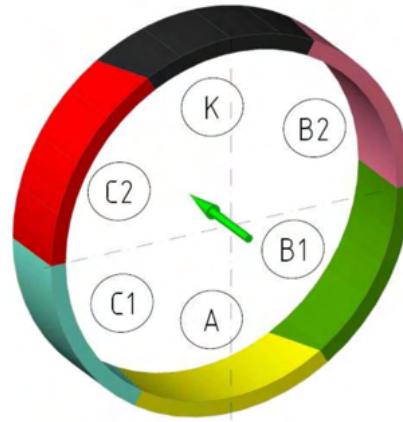


Abbildung 9: Darstellung der Ringteilung - schematisch

Es werden vier Tübbingstypen gemäß Tabelle 4 eingesetzt.

Tabelle 4: Tübbingstypen - Baulos H41

Art	Beschreibung
Normaltübbing	Alle Vortriebssituationen (Gebirge und Störungen) ohne Überschreitung der Gesamtkraft von 120 MN (TBM-S) bzw. 80 MN (TBM-DS) der Vorschubpressen
Sondertübbing	Bereiche mit erhöhter Vorschubkräfte >120 MN (TBM-S) bzw. >80 MN (TBM-DS), mit einer maximalen radialen Belastung von 1200 kPa → erhöhter Bewehrungsanteil
Querschlagtübbing	Bereiche mit erhöhter Vorschubkräfte >120 MN (TBM-S) bzw. >80 MN (TBM-DS), mit einer maximalen radialen Belastung von 1200 kPa, mit Modifikation zur Aufnahme der Schnittfugenumlagerungen bei Öffnung der Querschläge
Messtübbing	Alle Vortriebssituationen (Gebirge und Störungen) mit integriertem Messsystem zur Überprüfung der vertikalen und horizontalen Verschiebungen

Diese unterscheiden sich nicht in Form und Größe, sondern ausschließlich durch deren Bewehrungsanteil und -verteilung. Der Normaltübbing wird für alle Vortriebssituationen verwendet, in der die Gesamtkraft von 120 MN nicht überschritten wird. Basierend auf geologischen Untersuchungen ist dies in der Mehrheit der zu durchquerenden Gesteinsformationen der Fall. Sondertübbinge sind mit einem höheren Bewehrungsanteil versehen, um den erhöhten Einwirkungen in Störzonen und höheren Gebirgseinwirkungen entgegenzuwirken. Querschlagtübbinge werden in Bereichen mit erhöhten Vorschubkräf-

ten verbaut. Dies bedeutet, jene Stahlsegmente werden in Bereichen von Querschlägen verbaut, um die Kräfte durch die Schnittfugenumlagerung der Öffnungen der Querschläge aufzunehmen. In Messtübbing sind mit faseroptischen Messsystemen verbaut bzw. an der Bewehrung angebracht, um das Verhalten der Tübbing im verbauten Zustand zu kontrollieren. Die Tübbing besitzen an den seitlichen Kontaktflächen des Ringes jeweils eine Durchführung, zur Verkabelung des Messsystems. An der Tübbinginnenseite ist dazu jeweils eine zusätzliche Verblasöffnung einbohrt. Diese hat den Nutzen, die Verkabelung nach dem Einbau zu verbinden. Zur vereinfachten Umsetzung ist das Messsystem in Serie geschalten.

Jeder Tübbingsring, unabhängig des Typs, bleibt in seinen Bestandteilen bei der Lagerung und dem Transport zusammen. Dabei sind die Segmente in dreier Kombinationen organisiert. Die Zusammensetzung ist im gelagerten Zustand von oben nach unten folgende: A - B1 - C1 und B2 - C2 - K. In dieser Anordnung werden die Bauteile gelagert, verhoben und transportiert. Die Sohlfertigteile werden in einem separaten Stapel entsprechend deren Art analog zu den Tübbing gelagert, verhoben und transportiert. Jeder Segmentstein wiegt ein Gewicht von rund 10 Tonnen auf. Es sind drei Transportvorgänge mit dem Terberg für die sechs Segmente und das Sohlfertigteil notwendig. Folglich sind für einen Tübbingring insgesamt zwei Fahrzeuge im Einsatz. Der Güterzug ist mit insgesamt drei Waggons für den Transport der Tübbing ausgestattet, welcher analog zu den Fahrzeugen beladen wird. Die Beschreibung zur Dokumentation der Tübbing folgt in Kapitel 3.8.



Abbildung 10: Lagerung der Tübbing (1) und Sohlsteine (2) auf der außenliegenden Lagerfläche

3.7.2. Perlkies

Der Perlkies bzw. das Perlkies-Zementleim-Gemisch übernimmt die Funktion der Gebirgsentwässerung entlang der Tunnelröhren. Im Bereich des Querschlags wird der Ringspalt systematisch dräniert und das Wasser über Umlendrainagen gefasst und in den Erkundungsstollen abgeleitet. Aus diesem Grund ist der Gebrauch von Perlkies unausweichlich und somit Bestandteil der Simulation. Es ist Perlkies mit der Korngröße 4/11 in Verwendung. Der Perlkies wird an zwei Lagerstätten zwischengelagert. Einerseits auf der BE-Fläche als Vorratsstätte und andererseits im Logistikbereich der NHS Innsbruck zur unmittelbaren Verwendung. Der Perlkies wird im Normalfall mit Kipfern direkt zur unterirdischen Lagerfläche gebracht. Die Kapazität ist nach Angaben des:r Verantwortlichen für rund 24 Stunden ausreichend. Nur im Falle eines Leerstandes dieser Lagerfläche wird auf den außen liegenden Lagerplatz zurückgegriffen und der Perlkies mithilfe von Kipfern in das Tunnelbauwerk gebracht.

3.7.3. Zementmörtel

Der Zementmörtel wird zur Verpressung der Tübbinginge mit dem Baugrund an der Sohle eingesetzt. Je nach geologischer Bedingungen und Anforderungen ist die Zementmischung variabel herzustellen. Diese wird in 75,0 Tonnen Silos am südlichen Ende der BE-Fläche gelagert. Nach Bedarf im Tunnelvortrieb wird dieser mit den Terbergs in das Tunnelbauwerk gebracht. Dafür stehen 16 Silos zu je 500,0 kg zur Verfügung. Diese werden befüllt, luftdicht verschlossen und mit den Spezialfahrzeugen zur NHS Innsbruck transportiert, wo die Silos für ihre weitere Verwendung gelagert werden. Aufgrund der luftdichten Lagerung besteht keine Gefahr der frühzeitigen Erhärtung vor dem tatsächlichen Gebrauch. Bei der Kapazitätsplanung der Fahrzeuge muss der Transport von Zementmörtel berücksichtigt werden.

3.8. Dokumentation der Tübbinginge

Zur Dokumentation der Tübbinginge ist ein modulares Produktions- und Logistikmanagementsystem der Software VMT eingesetzt. Das *Segment Documentation System (SDS)* verspricht eine Überwachung der Segmente von der Produktion bis zum Einbau. „Mit seinen Modulen SDS.Production, SDS.Storage und SDS.TBM dirigiert, kontrolliert und dokumentiert das System umfassend alle wesentlichen Vorgänge im Rahmen der Produktion und Lagerung der Tübbinginge und erfasst deren Positions- und Einbaudaten im Tunnel“ [6, S.2] Übergeordnet zu den genannten Anwendungen ist SDS.Baustelle ebenso Bestandteil der Softwareanwendung. Die Tübbinginge werden mit Barcode-Etiketten versehen und zur Dokumentation, Überwachung oder Kontrolle mit einem Handscanner eingescannt. Die digitalen Werkzeuge sind in den relevanten Örtlichkeiten des Bauloses für Herstellung, Lagerung, Transport und Einbau vorhanden. Somit herrscht an überwiegend allen Orten der Baustelle eine permanente Nachvollziehbarkeit und Transparenz aller relevanten Segmentdaten und -informationen nach Abbildung 11.

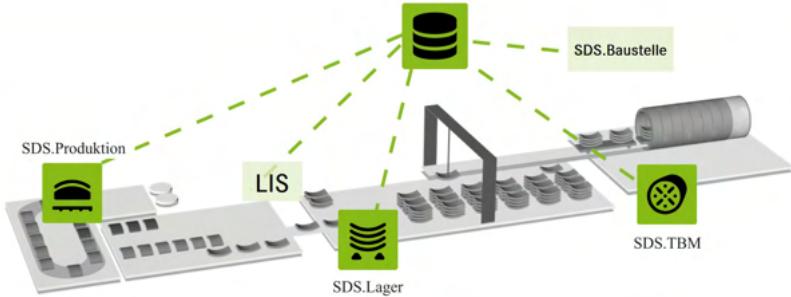


Abbildung 11: Übersicht der Dokumentationsanwendungen von SDS [6]

SDS.Baustelle verwaltet und protokolliert die Bewegungen eines Tübbings und alle damit verbundenen Prozesse während der Herstellung, Einlagerung, dem Transport und der Installation im Tunnel. Jeder Arbeitsschritt wird mit mobilen Geräten gescannt und dokumentiert. Externe Produktionsdaten können über einen CSV-Import übergeben werden. Nach der Installation stellt das System für jeden Tübbing einen Qualitätsnachweis für die gesamte Lebensdauer aus. SDS.Baustelle kann mit anderen Systemen verknüpft werden, um eine eindeutige Identifizierbarkeit sicherzustellen. Die Vorteile bestehen dabei in der vollständigen Transparenz des Lagerbestandes zu jedem Zeitpunkt und der lückenlosen Dokumentation von Schäden, Vorgängen und Einbauten [6].

Zu Beginn der Herstellung erhält jeder Tübbing ein Barcode-Etikett und damit seinen individuellen Datensatz. SDS.Production speichert die Informationen zur verwendeten Bewehrung, dem Werkzeugeinssatz, der Betonmischung und der Geometrie des Segmentes durch das Einstellen des Etikettes an der jeweiligen Produktions- und Herstellungsfläche. Neben der Dokumentationsfunktion ist jeder Arbeitsschritt und alle dafür benötigten Komponenten von Systemen vorgegeben und überwacht, wodurch Produktionsfehler vermieden werden. Entstandene Schäden an den Tübbingen können durch Scannen des Barcodes in der Datenbank erfasst und klassifiziert werden. Die Teilautomatisierung im Dokumentationswesen spart Zeit, da der aktuelle Stand der Produktion jederzeit verfügbar ist. Außerdem führt es zu einer Reduktion der Reparatur-, Ausschuss- und Entsorgungskosten in der Tübbingsherstellung durch die Kontrolle und direktem Feedback der Software. Dank sekundenschneller Auswertungen und vollständiger, lückenloser Bauwerksdokumentation ermöglicht das System ein fundiertes Berichtswesen [6].

Das Modul SDS.Lager verwaltet und organisiert die Lagerhaltung sowie die Ein- und Auslagerungen. Durch die Dokumentation der Produktion ist die Aushärtedauer der Tübbinge ersichtlich. Anhand dessen werden im Sinne eines Blackbox-Lagers die Bestände festgehalten und die Ein- und Auslagerung erfasst. Außerdem werden die genauen Lagerstandorte der Stahlbetonfertigteile auf der außenliegenden Lagerfläche im Baustelleneinrichtungsbereich genau dokumentiert. In der Hand des Lagerplatzpersonals liegt allerdings die Entscheidung, wann welche Tübbingsegmente die Lagerfläche verlassen. Beim Auslagern der Tübbinge prüft SDS die Einhaltung der Aushärtungszeiten sowie die Schadensfreiheit und erzeugt automatisch Lieferscheine. Diese werden über die Prozesskette des Tübbings bis zum Einbau mittransportiert und abschließend in Papierform abgelegt. Mithilfe der Anwendung wird der Lagerplatz- und Personalbedarf minimiert sowie die Belade- und Lieferzeit durch optimale Lagerregeln verringert. Zudem kann ei-

ne Über- oder Unterproduktion der Fertigteile durch die Transparenz der Lagerbestände vermieden werden [6].

SDS.TBM erfasst in Echtzeit die Positions- und Einbaudaten der Tübbinge während des Ringbaus und leitet die Bestellung der Tübbinge für Folgeeinbauten aus der TBM weiter. Alle Daten werden ohne Verzögerung in der SDS-Datenbank zusammengeführt, was eine schnelle und zuverlässige Fehlerdiagnose bei möglichen Schäden im Tunnel ermöglicht. Die Verfügbarkeit der verschiedenen Ringtypen sowie der aktuelle Bestell- und Lieferstatus werden kontinuierlich angezeigt [6].

Zusammenfassend kann durch SDS das Optimum an Planung und Auslastung von Lagerkapazitäten erreicht werden sowie Fehler bei den Lieferungen vermindert werden. Damit ist eine planbare, effiziente und transparente Abwicklung auf der Baustelle möglich und begleitet den Tübbing über dessen Lebenszyklus [6].

4. Simulationskonzept

4.1. Grundlagen

„Die Simulation ist ein Verfahren, bei dem für ein reales oder imaginäres System ein Modell erstellt wird, das experimentell untersucht werden kann, mit dem Ziel, neue Erkenntnisse über das System zu gewinnen.“ [17, S.3]. AnyLogic, eine vielseitige und leistungsstarke Simulationssoftware, bietet umfassende Werkzeuge zur Modellierung von Systemen in einer dreidimensionalen Umgebung. Es lassen sich physikalische Eigenschaften, Interaktionen und Abläufe innerhalb eines Systems detailliert visualisieren [14]. Ein dynamisches System mit unterschiedlichen Parametern und Einflüssen kann als Vorgangs-schema aufgefasst werden. Die Stationen, in diesem Fall die Lagerstätten, stellen Ressourcen dar, die von den mobilen Objekten beansprucht sind. Zustandsänderungen im dynamischen System treten im Falle der Baulogistik des maschinellen Tunnelbaus zu diskreten Zeitpunkten ein. Die Simulation bildet einen diskreten Prozess ab [17]. Ein fundiertes Konzept zur Simulation berücksichtigt alle relevanten Aspekte eines Prozesses und eröffnet neue Möglichkeiten zur Visualisierung und Analyse, die in traditionellen zweidimensionalen Modellen nicht vollständig erfasst werden können.

4.1.1. Prozesskomponenten

Der Logistikprozess ist durch fundamentale Komponenten gegründet, worauf das Grundgerüst der Modellierung aufbaut. Diese Komponenten beeinflussen alle Prozesse innerhalb der Simulation und sind entscheidend für die Genauigkeit und Effizienz der Modellierung. Zu den wesentlichen Prozesskomponenten nach Tabelle 5 zählen:

Tabelle 5: Prozesskomponenten der Simulation

Prozesskomponente	Beschreibung
Agenten	In der Simulation fungieren Agenten als steuernde Einheiten. Die Tunnelbohrmaschine (TBM) stellt das zentrale Versorgungselement dar. Die Terbergs und die Versorgungszüge übernehmen den Transport von Gütern wie Tübbing, Zement und Perlkies.
Lagerstätten	Die temporären Lagerstätten für Baumaterialien auf der BE-Fläche und entlang der Tunnelstrecke können als Stationen zwischen den Material- und Transportflüssen verstanden werden. Die effiziente Lagerverwaltung und die optimale Ausnutzung der Lagerkapazität trägt maßgebend zum Erfolg der Baulogistik bei.
Infrastruktur	Fahrzeugtransport (Versorgungszüge, Spezialfahrzeuge, Lkws) von Baumaterialien zur Versorgung der TBM. Die Analyse dieser Transportsysteme beinhaltet die Untersuchung ihrer Kapazitäten, Fahrwege und möglichen Engpässe.

4.1.2. Modellierung des Systems

Der Aufbau eines Systems verlangt ein angemessenes Vereinfachungsniveau zur Abbildung aller Prozesse. Die elementaren Teile des Prozesses stellen unabhängige Objekte dar, die sich in einem sich wiederholendem Prozess innerhalb einer Systemdynamik bewegen. Daraus lässt sich schließen, dass die dreidimensionale Simulation auf einer Multimethodenmodellierung, zusammengesetzt durch die agentenbasierte Modellierung und der ereignisorientierten Modellierung, basiert [4].

Agenten stellen die grundlegenden Einheiten dar, die individuelle Verhaltensweisen und Interaktionen innerhalb des Simulationsmodells repräsentieren und Abstraktionen und Annahmen vermeiden. Die Funktion der Agenten in der Simulation sind durch mehrere Schlüsselemente zu beschreiben. Agenten dienen als Abstraktionen realer Entitäten innerhalb des Simulationsmodells. Sie sind fundamentale Bausteine des Modells und ermöglichen eine detaillierte und individualisierte Betrachtung des simulierten Systems. Die Regeln werden durch die Anwendung von Entscheidungsbäumen und Algorithmen festgelegt. Jedem Agenten werden Eigenschaften zugewiesen, die individuelle Verhaltensweisen und Interaktionen aufweisen. Die Eigenschaft definiert in diesem Zusammenhang die internen Zustände des Agenten. Inwiefern die internen Zustandsänderungen und die äußeren Einflüsse miteinander agieren, ist unter dem Verhalten beschrieben. Unter den Interaktionen ist die wechselseitige Beeinflussung zwischen den Agenten untereinander und ihrer Umgebung abgebildet [19]. Die modellierten Agenten sind:

- TBM
- Versorgungszug
- Terberg
- Tübbing
- Zementbehälter

TBM

Die TBM transportiert die Tübbingsegmente innerhalb der TBM zur Einbaustelle. Mit Hilfe eines halbautomatisierten Systems werden die Teile in die korrekte Position gebracht und zu einem Ringverband zusammengesetzt. Dabei wird ein Leitsegment platziert, gefolgt von weiteren Segmenten in umlaufender radialer Anordnung.

Eigenschaften Fortbewegung: dynamisch - kontinuierlich
Arbeiten auf der TBM: gleichbleibender Ablauf

Verhalten Kontinuierliche Fortbewegung mit 18,5 Meter pro 24 Stunden bzw.
 $0,007 \frac{km}{h}$

Interaktionen Kommunikation mit der Lok zur kontinuierlichen Materialbeschaffung

Versorgungszug

Der Zug transportiert die Tübbingsegmente, den Perlkies und den Zementmörtel vom Logistikbereich der NHS Innsbruck zum derzeitigen Standort der Tunnelbohrmaschine.

Dabei muss aufgrund von räumlichen und sicherheitstechnischen Einschränkungen die Geschwindigkeit abschnittsweise von 20,0 $\frac{km}{h}$ auf 5,0 $\frac{km}{h}$ reduziert werden.

Eigenschaften Fortbewegung: dynamisch - fluktuierend

Verhalten Bereichsweise Reduzierung der Geschwindigkeit von 20,0 $\frac{km}{h}$ auf 5,0 $\frac{km}{h}$

Interaktionen Direkte Interaktion mit der Tunnelbohrmaschine und der damit verbundenen kontinuierlichen Verlängerung der Transportstrecke. Sekundäre Interaktion zwischen der Lok und den Spezialfahrzeugen im Bereich der NHS Innsbruck aufgrund der Zwischenlagerung sowie der Be- und Entladung der Materialien. Der Zug hat dabei das Vorrangrecht.

Terberg

Das Fahrzeug transportiert die Güter über die Baustelleneinrichtungsfläche, den Verbindungstunnel und den Knoten NHS Innsbruck auf dem definierten Straßennetz. Der Terberg wählt in Abhängigkeit der Ringeinbaureihenfolge den Transportweg und passt seine Geschwindigkeit den Verkehrsbedingungen an. Der Fahrzeugtyp ist ein Transporter zum Befördern von Material.

Eigenschaften Fortbewegung: dynamisch - fluktuierend
Be- und Entladung: gleichbleibender Ablauf

Verhalten Bereichsweise Reduzierung der Geschwindigkeit von 10,0 $\frac{km}{h}$ auf 3,0 $\frac{km}{h}$ und Reaktion auf andere Verkehrsteilnehmer.

Interaktionen Fahrzeuge interagieren miteinander und koordinieren sich untereinander entsprechend der Ringeinbaureihenfolge und der Lagerlogistik. Zudem passen diese sich an die Verhaltensweisen des Versorgungszuges an.

Tübbinge

Die Tübbinge sind die Grundelemente zur Stützung und Auskleidung des Tunnelbauwerks. Die Segmente sind zentraler Bestandteil der Baulogistik und als tragbare Ressource definiert.

Eigenschaften Betonsegmente, welche im eingebauten Zustand einen monolithischen Ring bilden.

Verhalten Transportgut auf den Spezialfahrzeugen, den Zug und der TBM.

Interaktionen /.

Zementbehälter

Der Zement ist Bestandteil bei der Herstellung des Tunnelbauwerks im Bereich der Tunnelsohl. Die mit Zement gefüllten Behälter sind als tragbare Ressource definiert.

<i>Eigenschaften</i>	Zement zur Befüllung des Hohlraums zwischen Gestein und Tübbing im Bereich der Ringsohle
<i>Verhalten</i>	Transportgut auf den Spezialfahrzeugen, den Zug und der TBM
<i>Interaktionen</i>	/.

Die ereignisorientierte Simulation beschreibt eine zeitunabhängige Simulation, die einer Ereignisfolge folgt. Zustände oder Zustandsänderungen innerhalb des Systems rufen neue Aktivitäten hervor [4]. Diese sind aktive Komponenten des Prozesses und können manuell durch eine Zuweisung oder automatisiert durch das System ausgeführt werden. Es besteht die Möglichkeit einer Ereignisinitialisierung zur Festlegung von Ausgangsergebnissen. Folgeereignisse werden abgearbeitet und durch ein Endereignis beendet. Die Abfolge von Ereignissen und dessen logische Verknüpfung definiert einen Prozess. Die Hauptvorteile dieser Simulationsmethode liegen bei der Modellierung komplexer Systeme, insbesondere wenn diese aus einer Aneinanderreihung diskreter Prozesse bestehen, die in unregelmäßigen Abständen auftreten [17].

4.1.3. Prozessabfolge

Die Prozesslogistik beschreibt die Abfolge und Bedingungen der verschiedenen logistischen Prozesse im System. Grundlage dafür ist ein Flussdiagramm nach Anlage A. Der vollständige Prozess besteht aus sieben aufeinanderfolgenden Prozessschritten, die zusammenfassend die durchzuführenden Arbeitsschritte beinhalten. Diese sind unter Kapitel 4.2 beschrieben. Die Infrastruktur des Materialflusses beinhaltet die Bestellung und Lieferung von Baumaterialien innerhalb des Bauprojekts, wobei die Kapazitäten der Transportfahrzeuge und dessen Fahrzeiten berücksichtigt werden. Die Abfolge des Materialtransports richtet sich nach den Vorgaben des Ringeinbaus, wonach die Arbeitsabfolge abgestimmt werden muss. Die Lagerverwaltung umfasst die Annahme, Lagerung und Ausgabe von Materialien in den Lagerstätten. Hierbei werden die Umschlagzeiten erfasst und der Lagerbestand beachtet.

Die Agenten interagieren innerhalb der dreidimensionalen Umgebung zwischen den Prozesskomponenten. Die Tunnelbohrmaschine ist autark zu bewerten. Aufgrund des kontinuierlichen Vortriebs bewegt sich der Vorgang ausschließlich in südliche Richtung, während alle verbleibenden dynamischen Prozesskomponenten in einem Kreislaufsystem um die Lagerstätten am Baufeld agieren. Die Führerkabine des Zuges ist nach Norden gerichtet. Daraus folgt, dass die Versorgungslok rückwärts in Richtung Süden zur Tunnelbohrmaschine verkehrt und vorwärts zur NHS Innsbruck zurückkehrt. Die Transportrouten sind dabei basierend auf der tatsächlichen Wegführung modelliert, um repräsentative Werte der Fahrzeit zu ermitteln. Die Positionen und Kapazitäten der Lagerstätten sind ebenfalls in dieser Umgebung verortet, was eine genaue Modellierung der Lagerprozesse und des Materialflusses ermöglicht.

4.1.4. Darstellung

Die Integration der dreidimensionalen Elemente in der Simulationsumgebung ist essenziell, um eine realistische Darstellung des zu untersuchenden Systems zu gewährleisten. Durch die Kombination von 3D-Modellen und dynamischen Simulationsprozessen können sowohl die physikalischen Eigenschaften als auch die Interaktionen und Abläufe innerhalb des Systems präzise visualisiert und analysiert werden.

Aufgrund der Lizenzbestimmungen der verwendeten Software ist es nicht möglich, eine CAD-gestützte Datei direkt in das Modell zu importieren. Daher muss die dreidimensionale Darstellung innerhalb der Software Anylogic manuell erstellt werden. Die von Anylogic bereitgestellten 3D-Objekte der Transportfahrzeuge, der Lagerinfrastruktur und der Verkehrswege kann größtenteils verwendet werden. Es steht keine Darstellung einer Tunnelbohrmaschine zur Verfügung, zudem ist der Import einer externen Datei der Maschinendarstellung nicht möglich. Es ist für den Zweck der Simulation ein Provisorium modelliert. Im Zuge dessen ist darauf hinzuweisen, dass eine detailgetreue Darstellung von bestimmten Abbildungen nicht möglich ist. Die Simulation wird mit realen Daten initialisiert. Es folgt eine Festlegung der Startbedingungen und variablen Parameter, wie Ereignisse. Während der laufenden Simulation werden die Ressourcennutzungen analysiert und potenzielle Engpässe identifiziert.

4.2. Logistikprozesse

Der Ablauf zur Versorgung der TBM ist in sieben Prozessschritte unterteilt, wobei jedem Einzelnen, durchzuführende Arbeitsschritte zugewiesen sind. In Abbildung 12 sind diese dargestellt und entsprechend deren Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zueinander farblich gekennzeichnet.



Abbildung 12: Übersicht der Prozessschritte

Der Prozess beginnt mit dem Start von der externen Tübbinglagerfläche und endet mit der Installation der Tübbingsegmente durch die Tunnelvortriebsmaschine (TBM). Im Rahmen dieser Betrachtung werden die verschiedenen Schritte analysiert, die die Anforderung der Bauteile auf der Lagerfläche, ihren Transport zur NHS Innsbruck sowie das dortige Entladen, Zwischenlagern und Beladen der Materialien umfassen. Darüber hinaus ist die Integration der Tübbinglieferung, das Entladen der Segmente sowie der Einbau der Stahlbetonteile durch die Tunnelbohrmaschine wesentlicher Bestandteil der Prozessabfolge. Ausschlaggebend für die Aufteilung ist die Wahl des Transportmittels. Die Lagerstätte untertage, dient als Entkoppelung des rad- und schienengebundenen Transport und zum Ausgleich von kurzfristigen Änderungen im Ringbau. Es lässt sich schlussfolgern, dass die Prozessschritte 01 bis 04 eine sekundäre Abhängigkeit zueinander aufweisen, ebenso wie die Prozessschritte 04 bis 06. Eine primäre Kopplung besteht zwischen den Prozessschritten 06 und 07 aufgrund der direkten Abhängigkeit der Arbeiten auf

der TBM. Die iterative Wiederholung der Prozessschritte führt zur Fertigstellung der Bauphase 03. Der Prozess der Baulogistik am Baulos H41 werden im Folgenden näher erläutert.

P01 - Anfordern

Start:	Außenliegende Lagerfläche am Tübbingwerk
Ende:	Außenliegende Lagerfläche am Tübbingwerk
Fahrzeug / Maschine:	Portalkran
Personalbedarf:	2 Personen an der Lagerfläche + 1 Terbergfahrer:in
Durchzuf. Arbeiten:	Aufnehmen und Verladen von je drei Betonsegmenten und Beladen der Spezialfahrzeuge
Ø Dauer:	00:30 h

Den Startpunkt der Prozesskette definiert das Eintreffen eines Terbergs an der außenliegenden Lagerfläche neben dem Tübbingwerk. Es wird davon ausgegangen, dass die Tübbinge vollständig ausgehärtet und in einem einwandfreien Zustand auf der Lagerfläche bereitliegen. Das Personal steuert und koordiniert die Anordnung und Logistik auf der Lagerfläche sowie hilft bei der Beladung der Fahrzeuge. Dazu übernimmt eine Person die Steuerung des Kran, die andere Person koordiniert die Feinjustierung des Ladegutes. Der Ladevorgang der Tübbinge ist durch die digitalen Handscanner zu dokumentieren. Eine genaue Beschreibung der digitalen Dokumentation der Tübbing mithilfe von SDS.Baustelle ist in Kapitel 3.8 nachzulesen. Der Ablauf des ersten Prozesses (P01) hat folgenden Inhalt:

1. Das Fahrzeug (Terberg) erreicht den nördlichen Bereich der Durchfahrtsstraße an der Tübbinglagerfläche nach Abbildung 13.
2. Vorbereitende Maßnahmen, wie Sicherungsbänder am Fahrzeug lösen und Beladebereich freimachen, zur Sicherstellung einer ordnungsgemäßen Beladung. Dies geschieht durch das Logistikpersonal an der BE-Fläche.
3. Die Segmentsteine an der Lagerfläche auswählen, mit dem Kran anheben nach Abbildung 14.(1), zum Fahrzeug transportieren und dort gemäß Abbildung 14.(2) abladen. Das Fahrzeug ist mit maximal sechs Segmenten zu beladen.
4. Die Betonsegmente für eine einwandfreie Dokumentation über den QR-Code scannen.
5. Die Ladung sichern und Abholung des Lieferscheins im Bürocontainer der Logistikfläche durch dem:die Terbergfahrer:in. Im Lieferschein sind die gescannten Steine aufgelistet und auf Richtigkeit zu überprüfen.

Beide der Lagerflächen sind mit jeweils einem Portalkran mit einer Hubleistung von maximal 40,0 Tonnen ausgestattet. Daraus folgt, dass die Segmente ausschließlich in deren Kombinationszusammensetzung (A - B1 - C1 und B2 - C2 - K) zu versetzen, verladen und transportieren sind. Die Sohleite werden analog zum beschriebenen Vorgang verladen. Mit dem Abladen der Bestandteile des Tübbingrings auf dem Fahrzeug endet der Prozessschritt 01. Die jeweiligen durchschnittlichen Zeiten der durchzuführenden Arbeiten sind folgende:

- Vorbereitung: 00:05 h
- Hubzeit je Hubvorgang: 00:05 h
- Verladezeit je Hubvorgang: 00:05 h
- Nachbereitung / Ladesicherung: 00:05 h



Abbildung 13: Östliche und westliche Tübbingslagerfläche mit mittiger Durchfahrtsstraße



Abbildung 14: Verladung der Tübbinge mit dem Portalkran (1) auf das Transportfahrzeug (2)

P02 - Transport

Start:	Außenliegende Lagerfläche am Tübbingwerk
Ende:	NHS Innsbruck - Logistikbereich
Fahrzeug / Maschine:	Terberg - Spezialfahrzeug
Personalbedarf:	1 Terbergfahrer:in
Durchzuf. Arbeiten:	Transport von sechs Betonsegmenten, Fertigteilsohlen oder Zementmörtelsilos
Ø Dauer:	01:20 h / 01:00 h

Tübbingtransport

Der Prozessschritt P02 beinhaltet den Transport der Tübbinge von der externen Lagerfläche des Tübbingwerks zum Logistikbereich der Nothaltestelle im Tunnelbauwerk. Der Übergang von Prozessschritt 01 zu Prozessschritt 02 ist durch die Ingangsetzung der Fahrzeuge definiert. Nach Abbildung 8 bewegen sich die beladenen Fahrzeuge gemäß Abbildung 15.(1) und Abbildung 15.(2) entlang des Straßennetzes zum Eingangsportal, über den Verbindungstunnel zu einem der beiden Logistikbereiche des Knoten NHS Innsbruck. In diesem Bereich ist der Tunnel aufgeweitet, sodass die Hälfte des Tunneldurchmessers dauerhaft für den Straßen- und Schienenverkehr zur Verfügung steht. Das Ankommen und Abstellen der Fahrzeuge im Logistikbereich der NHS markiert das Ende des Prozessschrittes 02. Es stehen insgesamt acht Fahrzeuge zur Verfügung. Aufgrund von Reparaturen und Personalmangel sind nur vier Fahrzeuge einsatzfähig.

1. Das Fahrzeug nimmt Geschwindigkeit auf und durchquert mit $3,0 \frac{km}{h}$ die Baustelleneinrichtungsfläche, den Verbindungstunnel und fährt zur Querkaverne.
2. An der Kreuzungsstelle in der Querkaverne besteht die Möglichkeit, in die jeweilige Haupttunnelröhre in östliche oder westliche Richtung abzubiegen. Je nach Ringbaufolge und Zuweisung ist der Weg in die entsprechende Haupttunnelröhre mit einer Geschwindigkeit von $3,0 \frac{km}{h}$ fortzuführen.
3. Die Haupttunnelröhre der NHS Innsbruck führt zu dem Logistikbereich, in dem eine freie Lagerfläche aufzusuchen ist.

Zementtransport

Darüber hinaus ist der Zementmörtel in den Knoten NHS Innsbruck zu transportieren. Der Zementmörtel wird in 500,0 kg große Silos luftdicht abgefüllt. Insgesamt 16 Stück der kleinen Silos können mit einem Terberg transportiert werden. Es ist ein zeitlich flexibler Transport der Silos nötig, da sich der Bedarf an die Notwendigkeit im Tunnelvortrieb richtet. Es ist somit keine konkrete Aussage über das Wiederholungsintervall der Lieferung zu treffen. Der Ablauf des Transports ist wie folgt geregelt:

1. Das Fahrzeug nimmt Geschwindigkeit auf und fährt mit $3,0 \frac{km}{h}$ zum Tunneleingangsportal, durchquert den Verbindungstunnel und fährt zur Querkaverne.
2. An der Kreuzungsstelle in der Querkaverne besteht die Möglichkeit, in die jeweilige Haupttunnelröhre in östliche oder westliche Richtung abzubiegen. Je nach Disposition und Zuweisung ist der Weg in die entsprechende Haupttunnelröhre mit einer Geschwindigkeit von $3,0 \frac{km}{h}$ fortzuführen.
3. Die Haupttunnelröhre der NHS Innsbruck führt zu dem Logistikbereich, in dem eine freie Lagerfläche aufzusuchen ist.

Die Durchführung von Prozessschritt 02 erfordert insgesamt folgende Zeitintervalle.

- Transport Tübbinge: 01:20 h
- Transport Zementmörtel: 01:00 h



Abbildung 15: Beladener Terberg auf der Transportstrecke

P03 - Abladen

Start:	NHS Innsbruck - Logistikbereich
Ende:	NHS Innsbruck - Logistikbereich
Fahrzeug / Maschine:	Portalkran
Personalbedarf:	2 Personen an der Lagerfläche + 1 Terbergfahrer:in
Durchzuf. Arbeiten:	Abladen von sechs Betonsegmenten, Fertigteileohlen oder Zementmörtelsilos
Ø Dauer:	00:25 h

Das Abstellen der Fahrzeuge an der freien Lagerfläche des Logistikbereiches beschreibt den Übergang zu Prozessschritt 03. Die bauwerksinnenliegende Seite, ist jene, die für den Transport vorgesehen ist. Auf der außenliegenden Seite wird das Material ab- und zwischengelagert. Der Portalkran ist über die gesamte Länge flexibel steuerbar und orientiert sich an den Halteplatz der Fahrzeuge. Die Hubleistung beläuft sich auf 40,0 Tonnen, wodurch zwei Hübe für das Abladen der Tübbinge benötigt werden. Die Anzahl der Hübe zum Abladen der Zementsilos ist je Lieferumfang variabel.

Das Abladen des Transportgutes im Prozessschritt 03 verläuft nach folgendem Ablauf:

1. Abstellen der Fahrzeuge parallel zu einer freien Lagerkapazität im Lagerbereich.
2. Das Logistikpersonal der NHS Innsbruck überprüft die Dokumentationsunterlagen und digitalisiert den Arbeitsschritt durch manuelles Scannen der Tübbinge.
3. Vorbereitende Maßnahmen, wie Sicherungsbänder am Fahrzeug lösen und Abladebereich freimachen, zur Sicherstellung einer ordnungsgemäßen Entladung.
4. Die Segmentteile sind in 3er-Kombinationen vom Terberg anzuheben, zuverladen und an der vorgesehenen Stelle abzulegen. Zur Bedienung des Krans und der Feinjustierung des Verladegutes ist jeweils eine Person notwendig. Der Vorgang ist zweimal zu wiederholen.
5. Die mit Zementmörtel gefüllten Behälter vom Terberg anheben, verladen und an der entsprechenden Stelle ablegen. Zur Bedienung des Krans und der Feinjustierung des Verladegutes ist jeweils eine Person notwendig. Der Vorgang ist entsprechend der Liefermenge zu wiederholen. Es ist je Behälter ein Hubvorgang notwendig.
6. Nachbereitungen am Fahrzeug für eine ordnungsgemäße Weiterfahrt.

Nachdem das Frachtgut vollständig entladen wurde, fahren die Fahrzeuge wie in Kapitel 3.5 beschrieben über den Wendepunkt am Entlastungsstollen zurück zum Mittelstollen. Von dort aus gelangen die Fahrzeuge über die Querkaverne und den Verbindungstunnel zurück zur BE-Fläche, wo der Prozess erneut bei Prozessschritt 01 beginnt. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt durchschnittlich $10,0 \frac{km}{h}$. Die vollständig Rückfahrt der Spezialfahrzeuge ist Bestandteil der Prozessschritte 03.

Im logistischen Bereich wird der Prozessschritt 03 als abgeschlossen betrachtet, sobald die Materialien im Zwischenlager abgelegt und dokumentiert wurden. Bei der Anlieferung des Zementmörtels entfallen die Arbeitsschritte 2 und 4, während beim Abladevorgang der Tübbinge der Arbeitsschritt 5 entfällt. Die Dauer des Prozessschrittes 03 setzt sich aus folgenden Faktoren zusammen:

- Vorbereitung: 00:05 h
- Hubzeit je Hubvorgang: 00:03 h
- Verladezeit je Hubvorgang: 00:05 h
- Nachbereitung: 00:05 h
- Rückfahrt zur Tübbinglagerfläche: 00:40 h

P04 - Zwischenlagerung / Aufladen

Start:	NHS Innsbruck - Logistikbereich
Ende:	NHS Innsbruck - Logistikbereich
Fahrzeug / Maschine:	Portalkran / Kipper
Personalbedarf:	2 Personen an der Lagerfläche + 1 Lokführer:in
Durchzuf. Arbeiten:	Zwischenlagerung und Verladung von sechs Betonsegmenten, der Fertigteilsohle und Zementmörtelsilos. Beladen der Behälter mit Perlkies.
Ø Dauer:	00:30 h

Im Logistikbereich der NHS Innsbruck ist ein Zwischenlager eingerichtet, das Platz für zwölf Ringe und die dazugehörigen Sohlfertigteile nach Abbildung 16 bietet. Am Umschlagplatz sind neben den Normaltübbingen immer Sondertübbinge vorgehalten, um unerwartete Gebirgszustände kurzfristig entgegenzusteuern. Die Querschlagtübbinge werden gemäß der vorgegebenen Einbaureihenfolge bereitgestellt. Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Tübbingtypen ist im Kapitel 3.7.1 zu finden.

Der Prozessschritt 04 beginnt durch die vollständige Entladung der Fahrzeuge. Neben den Hauptbaustoffen Tübbing und Zementmörtel werden auch weitere Kleinwerkstoffe und Bau- und Betriebsstoffe auf dem Umschlagplatz gelagert, werden jedoch in der Simulation vernachlässigt. Die Simulation berücksichtigt ausschließlich den Perlkies, dessen Lagerstätte sich südlich der Lagerfläche am Entlastungsstollen befindet. Aus diesem Grund ist das Beladen des Versorgungszuges in zwei Schritte unterteilt. Grundsätzlich ist die Reihenfolge der Beladung irrelevant, die Bauarbeiter:innen bevorzugen aber eine Reihenfolge von Süden nach Norden. Der nördlichste Punkt der Lagerfläche dient als Zugwendepunkt. Im Detail verläuft der Ablauf folgendermaßen: Die Verladung von Perlkies erfolgt von der Perlkieslagerstätte bis zum Versorgungszug in der Haupttunnelröhre unter Einsatz eines Kippers. Diese Tätigkeit fällt in den Verantwortungsbereich einer Person. Der Zug stoppt an der Entnahmestelle der Steine, sind die Behälter für Perlkies gefüllt, so nimmt der Zug Geschwindigkeit auf und bewegt sich nach Norden zur Lagerfläche. Der Zug hält an der Logistikfläche an, um die Beladung des Zuges mit Tübbing und Zementbehälter durchzuführen. Währenddessen parkt der Kipper im Bereich des Perlkieslagers und der:die Fahrer:in bewegt sich über den Mittelstollen zum Umschlagplatz. Es sind vorbereitende Maßnahmen am Güterzug erforderlich. Der Portalkran wird angefordert und an den vorgesehenen Standort gebracht. Im Anschluss erfolgt die Aufnahme und Anhebung der Segmente durch den Portalkran mit anschließender Verladung auf den Versorgungszug. Die Feinjustierung des Verladegutes und die Kransteuerung ist jeweils durch eine Person abgedeckt. Abschließend ist die Ladung zu sichern und die Lieferung zu dokumentieren. Die Einbaureihenfolge der Ringe ist auf Basis der geometrischen und geologischen Erkenntnisse aus der Vorerkundung festgelegt und in der Ringeinbaureihenfolge definiert. Die Aufgabenabfolge des Prozessschrittes 04 ist folgende:

1. Lagerung von Tübbingringen, Zementmörtel und Perlkies in den entsprechenden Lagerstätten.
2. Eintreffen des Versorgungszuges am südlichen Ende des Logistikbereichs. Anhalten des Zuges am Querstollen des Perlkieslagers. Der Kipper befüllt die Behälter mit Perlkies. Der Zug fährt weiter in Richtung Norden zum Umschlagplatz.
3. Der Versorgungszug stoppt an der Position, an der die Segmentteile aufgeladen werden sollen. Gleichzeitig wird der Portalkran angefordert. Der Kipper wird währenddessen geparkt und die Person bewegt sich über den Mittelstollen vom Perlkieslager zum Umschlagplatz.
4. Das Logistikpersonal der NHS Innsbruck führt vorbereitende Maßnahmen am Versorgungszug durch, um eine ordnungsgemäße Beladung sicherzustellen. Dazu gehört unter anderem das Lösen der Sicherungsbänder und das Freimachen des Beladebereichs.
5. Die Tübbinge durch den Portalkran aufnehmen, zum Versorgungszug heben und abladen.
6. Die Segmentteile in 3er-Kombinationen von der Lagerfläche aufnehmen, zum Ver-

sorgungszug heben und abladen. Zur Bedienung des Krans und der Feinjustierung des Verladegutes ist jeweils eine Person notwendig. Der Vorgang ist zweimal zu wiederholen. Analog zu den Segmentsteinen ist das Sohlfertigteil zu verladen.

7. Sicherung der Ladung und Dokumentation des Prozessschrittes durch Scannen der Barcodes an den Segmenten sowie Ausstellung des Lieferscheins.

Das Ende des Prozessschrittes 04 definiert die vollständige Beladung und Sicherung des Versorgungszuges. Die Dauer des Prozessschrittes 04 setzt sich wie folgt zusammen:

- Aufladen von Perlkies: 00:10 h
- Vorbereitung: 00:05 h
- Hubzeit je Hubvorgang: 00:03h
- Verladezeit je Hubvorgang: 00:05h
- Nachbereitung / Ladesicherung: 00:05 h



Abbildung 16: Lagerfläche der Tübbingte im Logistikbereich der NHS Innsbruck



Abbildung 17: Lagerfläche der sonstigen Materialien im Blickrichtung Norden (1) und des Versorgungszuges (2) im Logistikbereich der NHS Innsbruck

P05 - Tübbingsanlieferung

Start:	NHS Innsbruck - Logistikbereich
Ende:	Tunnelbohrmaschine der HT-Ost / HT-West
Fahrzeug / Maschine:	Versorgungszug
Personalbedarf:	1 Lokführer:in
Durchzuf. Arbeiten:	Transport der sechs Betonsegmente, der Fertigteilsohle, den Zementsilos und der befüllten Perlkiesbehälter
Ø Dauer:	keine konkrete Angabe aufgrund der täglichen Erweiterung der Transportstrecke möglich

Der Prozessschritt 05 beginnt im Logistikbereich der NHS Innsbruck. Den Übergang von Schritt 04 auf 05 definiert das Fortbewegen des beladenen Versorgungszuges aus dem Logistikbereich in südliche Richtung gemäß Abbildung 18. Das Versorgungsgleis ist das tunnelaußenliegende Gleis, das in der Regel zu befahren ist.

Der Zug nimmt Geschwindigkeit auf, passiert Weichen, Hindernisse und die Montagekaverne. Im Bereich der Querstollen ist mit einer zweimaligen Anwesenheit von Versorgungszügen zu rechnen, die am tunnelinnenliegenden Gleis abgestellt sind und bei Arbeiten am Querstollen für den Unterhalt und die Bereitstellung von Baustoffen dienen. Dies führt zu einem Geschwindigkeitswechsel innerhalb der Transportstrecke. Die Bauarbeiten am Querstollen in der östlichen Haupttunnelröhre, die eine Länge von 150,0 m aufweist, sind im Vergleich zur westlichen Haupttunnelröhre mit einer Länge von 50,0 m deutlich umfangreicher und zeitaufwendiger. Dadurch erhöht sich die räumliche und

zeitliche Belastung der Strecke der HT-Ost. Die Ankunft an Gefahren- und Hindernisstellen ist in der Regel mit Hupsignalen anzukündigen.

Der kontinuierliche Fortschritt des maschinellen Vortriebs von 18,5 m pro 24 Stunden führt zu einer täglichen Erweiterung der Transportstrecke. Die Verlängerung der Fahrzeit ist Teil des Prozessschritts 05. Sobald der Zug mit der TBM verbunden ist, wird der darauf folgende 6. Prozessschritt eingeleitet.

1. Der Zug nimmt Geschwindigkeit auf und fährt mit $20,0 \frac{km}{h}$ in südliche Richtung.
2. Rund 300,0 m nach der Abfahrt an der Be- und Entladefläche ist eine Weiche eingebaut. Die Fahrtgeschwindigkeit verringert sich auf $5,0 \frac{km}{h}$. Die Streckenführung im Tunnel erfordert einen Wechsel von der äußeren auf die innere Seite. Fahrt für 300,0 m fortführen und anschließend die Gleise mittels Weichen wechseln.
3. Die Fahrt mit einer Geschwindigkeit von $20,0 \frac{km}{h}$ für 300,0 m forsetzen.
4. Reduzierung der Fahrtgeschwindigkeit auf $5,0 \frac{km}{h}$ und passieren des Rettungszuges, der Zugwerkstatt und des Bandspeichers durch Hupsignalen ankündigen.
5. Die Fahrt mit einer Geschwindigkeit von $20,0 \frac{km}{h}$ für 150,0 m forsetzen.
6. Reduzierung der Fahrtgeschwindigkeit auf $5,0 \frac{km}{h}$ und Ankunft des Zuges an der Montagekaverne durch Hupsignalen ankündigen.
7. Die Fahrt mit einer Geschwindigkeit von $20,0 \frac{km}{h}$ forsetzen.
8. Das Eintreffen der Versorgungslok an den zu arbeitenden Querstollen mit Hupsignalen ankündigen und mit einer Geschwindigkeit von $5,0 \frac{km}{h}$ über eine Strecke von 150,0 m bzw. 50,0 m, je nach Haupttunnelröhre, passieren.
9. Die Fahrt mit einer Geschwindigkeit von rund $20,0 \frac{km}{h}$ forsetzen.
10. Die Vorgänge 8 und 9 sind auf der Tunnelstrecke zweimal zu wiederholen.
11. Nach kontinuierlicher Erweiterung der Strecke, Ankunft an der TBM.

Die Fahrzeit pro Prozessvorgang nimmt insgesamt zu, wobei diese in Abhängigkeit von der Haupttunnelröhre variiert. Die Bestimmung der kritischen Transportzeit ermöglicht die Ermittlung des Zeitpunkts, an dem die aktuellen Ressourcen nicht mehr ausreichend sind, um die geplanten Leistungen zu gewährleisten.



Abbildung 18: Gleisgebundene Versorgungsstrecke (1) und gering beladener Zug auf der Versorgungsstrecke zwischen der NHS Innsbruck und der TBM (2)

P06 - Abladen an der TBM

Start:	Tunnelbohrmaschine der HT-Ost und HT-West
Ende:	Tunnelbohrmaschine der HT-Ost und HT-West
Fahrzeug / Maschine:	Portalkran
Personalbedarf:	1 Lokführer:in + 6 Personen auf der TBM
Durchzuf. Arbeiten:	Abladen der sechs Betonsegmente, der Fertigteilsohle, der Zementsilos und der befüllten Perlkiesbehälter
Ø Dauer:	00:55 h

Der Prozessschritt 06 beginnt, indem sich der Zug mechanisch mit der Tunnelbohrmaschine verbindet und der Ladebereich des Zuges sich im Inneren der TBM befindet. Im Weiteren ist der Zug kein unabhängiges Fahrzeug, sondern Bestandteil der TBM.

Der Vorgang des Abladens steht in einer Wechselwirkung zum darauffolgenden Prozessschritt. Der Fiedler kann erst Kapazitäten bereitstellen, wenn diese durch den Ringeinbau frei werden. Die Dauer des Abladevorgangs ist in der Regel gleich der Dauer des Ringbaus. Nach der erfolgreichen Übergabe der Bauteile an die Tunnelbohrmaschine kehrt der Versorgungszug in nördliche Richtung zur Logistikfläche zurück. Es sind folgende Arbeitsschritte zu erledigen:

1. Der Zug verbindet sich mit der Tunnelbohrmaschine und befindet sich gemäß Abbildung 19.(1) im Inneren der TBM.
2. Der Lokführer:in verlässt das Fahrzeug und bedient den Portalkran.

3. Der Vakuumgreifer nimmt ein Tübbingsegment auf und hebt dieses in den aufgeweiteten Bereich. Dort dreht sich das Segment nach Abbildung 19.(2) um 90°.
4. Dokumentation der Ankunft der Tübbingsegmente an der Tunnelbohrmaschine.
5. Das Segment wird auf die freie Kapazität am Fiedler abgelegt.
6. Abladen des Zementmörtelbehälters mit dem Portalkran nach Abbildung 20.(1).
7. Abladen des Perlkiesbehälters mit dem Portalkran nach Abbildung 20.(2).
8. Rückfahrt der Versorgungslok zur NHS Innsbruck.

Das Ende definiert die vollständige Übergabe der Segmente und Baustoffe an die Tunnelbohrmaschine. Die Dauer des Prozessschrittes 06 setzt sich wie folgt zusammen:

- Abladen der Tübbingsegmente: 00:45 h
- Abladen der Behälter für Zementmörtel: 00:05 h
- Abladen der Behälter für Perlkies: 00:05 h

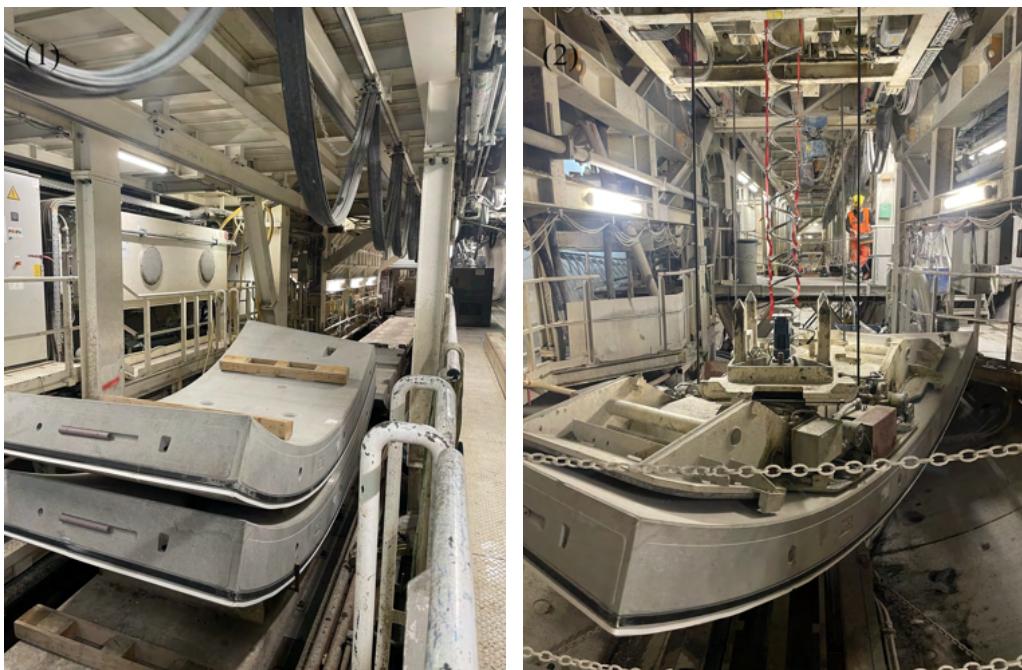


Abbildung 19: Versorgungszug im Inneren der TBM (1) und Vakuumgreifer mit Tübbing im gedrehtem Zustand (2)



Abbildung 20: Zement (1) - und Perlkiesbehälter (2) an der TBM

P07 - Transport und Einbau durch die TBM

Start:	Tunnelbohrmaschine der HT-Ost und HT-West
Ende:	Tunnelbohrmaschine der HT-Ost und HT-West
Fahrzeug / Maschine:	Fiedler / Greifer
Personalbedarf:	6 Personen auf der TBM
Durchzuf. Arbeiten:	Beförderung der Betonsegmente zur Einbaustelle und Einbau der Teile zu einem Ring, sowie Einsetzen des Sohlfertigteils an der Ringsohle
Ø Dauer:	00:45 h

Die Arbeiten des Prozessschrittes 06 und 07 stehen in einem engen Zusammenhang zueinander. Der Fiedler hält immer einen vollständigen Ring zum Einbau bereit, was konkret bedeutet, dass die entladenen Teile erst beim darauffolgenden Ringeinbau verwendet werden. Darüber hinaus, bewegt sich der Fiedler analog der Effizienz des Ringbaus. Die Einbaureihenfolge der Segmente ist vordefiniert. Die unterschiedlichen Ausführungsvarianten sind unter Kapitel 3.7.1 nachzulesen. Die Einbauschritte sind insgesamt fünfmal zu wiederholen, um den Ring zu vervollständigen. Es sind folgende Arbeitsschritte zu erledigen:

1. Der Fiedler befördert die Segmente in Richtung Einbaustelle.
2. Reinigung und Dokumentation des einzubauenden Segments.
3. Grobjustierung des Segments nach Abbildung 22.

4. Feinjustierung des Segments nach Abbildung 22 und Ablegen des Bausteins an der korrekten Stelle.
5. Verdübelung der Segmente miteinander und Herstellung eines monolithischen Rings.

Je nach Fähigkeit und Erfahrung der verantwortlichen Person ist die Dauer des Einbaus unterschiedlich. Es wird eine durchschnittliche Dauer angesetzt. Das Ende des Prozessschrittes definiert der vollständige Einbau des Ringes. Die dafür benötigte Zeit ist folgende:

- Durchschnittliche Einbaudauer eines Tübbingsegmentes: 00:06 h
- Zusätzliche Arbeiten im Zuge des Einbaus: 00:05h
- Durchschnittliche Einbaudauer des Ringes: 00:40h
- Einbau des Sohlfertigteils: 00:10h

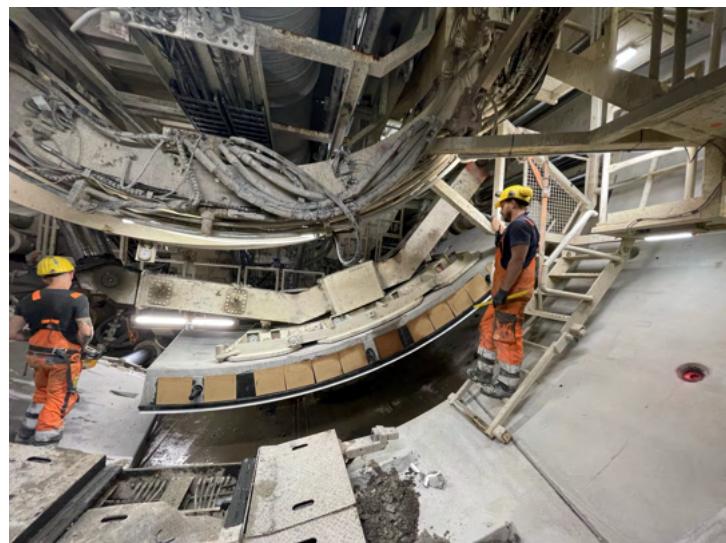


Abbildung 21: Grobjustierung der Tübbingsegmente für den lagerichtigen Einbau

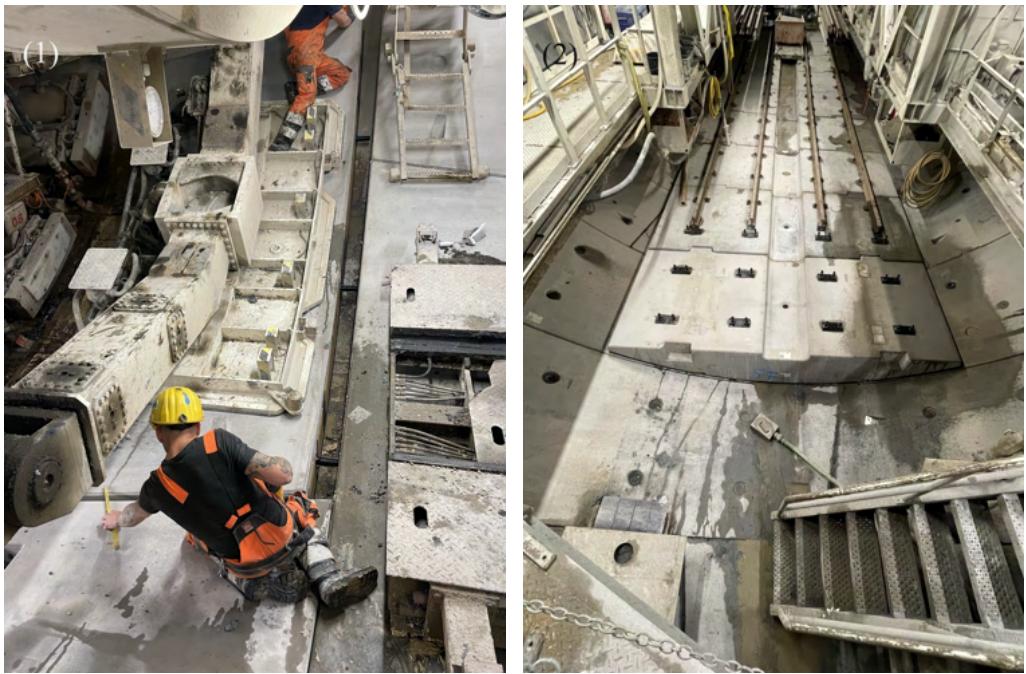


Abbildung 22: Feinjustierung der Tübbingsegmente für den lagerichtigen Einbau (1) und eingebautes Sohlfertigteil (2)

5. Simulation

5.1. Aufbau der Software

Die grafische Benutzeroberfläche von AnyLogic ist eine integrale Entwicklungsumgebung, die gezielt für die Erstellung, Ausführung und Analyse von Simulationsmodellen konzipiert wurde.

5.1.1. Benutzeroberfläche

Der Projektbrowser, der sich unter dem Reiter *Projects* befindet, gibt die Struktur des aktuellen Projekts inklusive aller Modelle, Agenten, Datenbanken und Ressourcen wieder. Dies erleichtert die Navigation und Verwaltung der unterschiedlichen Komponenten des Projekts. Die *Palette*, auch als Paketbrowser bezeichnet, enthält eine Sammlung von Modellierungselementen und Bibliotheken. Die Elemente fungieren als Steuerungsglieder in der Simulation und können durch Drag-and-Drop in das Diagrammfenster platziert und miteinander verbunden werden. Das *Modellfenster* dient als Hauptarbeitsbereich für die visuelle Modellierung und ermöglicht die Erstellung und Konfiguration von Modellierungselementen, Zustandsautomaten, Prozessflüssen, sowie die Bearbeitung von Agenten und deren Verhaltensweisen. Das Eigenschaftsfenster (*Properties*) befindet sich rechts neben dem Diagrammfenster und bietet eine Darstellung der Eigenschaften und Einstellungen des ausgewählten Elementes. Dadurch können Parameter angepasst, Verhaltensweisen definiert und das Erscheinungsbild der Modellierungselemente verändert werden. Die Benutzeroberfläche beinhaltet ebenfalls die Steuerungskonsole (*Console*) und die Ansicht der Fehlermeldungen (*Problems*), die während der Modellentwicklung und -ausführung Meldungen und Fehler anzeigen. Diese Funktionen sind besonders hilfreich für die Fehlersuche und das Debugging. Während der Simulation erfolgt die Anzeige des Simulationsfensters entweder als Pop-up oder integriert, um eine Echtzeit-Visualisierung in zwei- und dreidimensionalen Umgebungen zu ermöglichen. Nachfolgend in Abbildung 23 eine Veranschaulichung des Beschriebenen.

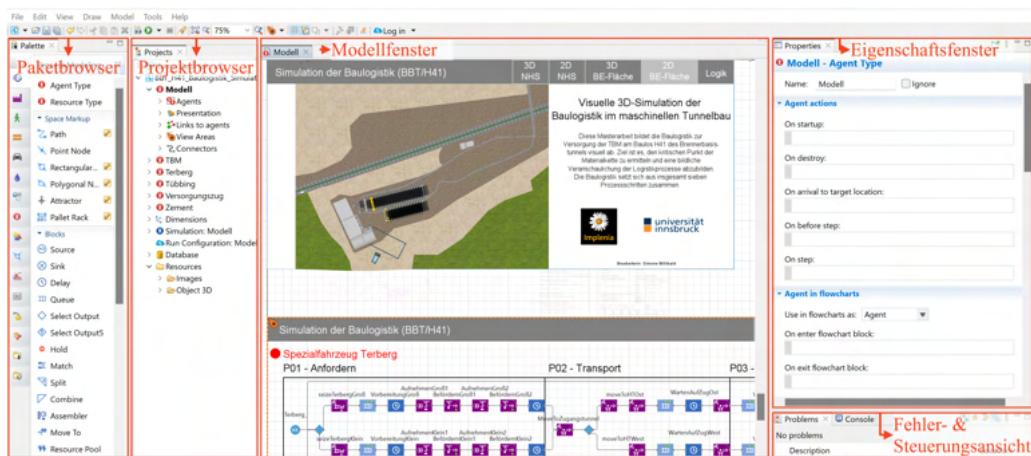


Abbildung 23: Benutzeroberfläche der Software Anylogic

5.1.2. Koordinatensystem

Das Koordinatensystem in AnyLogic ermöglicht sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Modellierungen. Das zweidimensionale Koordinatensystem wird durch die horizontale x-Achse und die vertikale y-Achse aufgespannt. Das Koordinatensystem hat seinen Ursprung standardmäßig in der zweidimensionalen Ebene bei (0,0) und in der dreidimensionalen Ebene bei (0,0,0). Die positive x-Richtung verläuft dabei nach rechts und die positive y-Richtung nach unten. Das dreidimensionale Koordinatensystem besteht aus den drei orthogonalen Achsen x, y und z, wobei die z-Achse als vertikale Achse fungiert und die positive z-Richtung nach oben zeigt. In der Regel werden die Einheiten des Koordinatensystems als Pixel angegeben, wobei eine Einheit der Punktdichte des Diagramms entspricht. Die Einheit kann je nach Maßstab des Modells variieren. Der Ursprung des Koordinatensystems kann verschoben werden und neben absoluten Koordinaten auch relative Koordinaten verwenden, um die Position von Elementen relativ zu anderen Objekten oder Elementen zu definieren. AnyLogic bietet die Möglichkeit, geografische Informationssysteme (GIS) in das Modell zu integrieren, wobei verschiedene geografische Projektionen genutzt werden können, um realistische Standortdaten mittels geografischer Koordinaten präzise abzubilden.

5.1.3. Funktionsweise

Die Funktionsweise basiert auf zwei Komponenten: die Agenten und die Prozesslogistik. In Abbildung 24 sind die Komponenten zur Erstellung einer funktionstüchtigen Simulation gekennzeichnet.

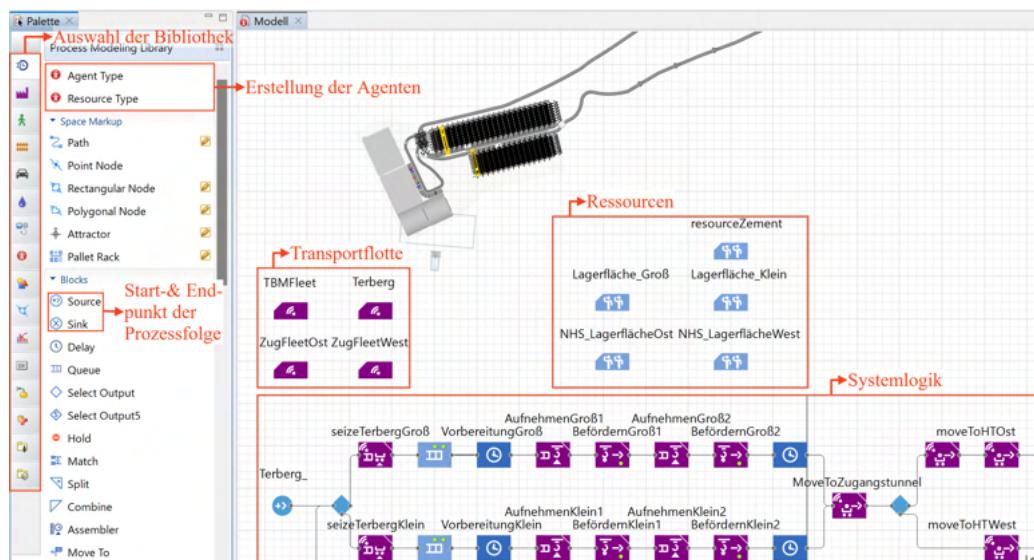


Abbildung 24: Funktionsweise von Anylogic

In der *Palette* der Modellierungsmaske können Agenten, die Projektprotagonisten, dem Projekt hinzugefügt werden. Es ist die Agentenklasse zu erstellen und der Typ des Agenten zu definieren. Eine genauere Beschreibung folgt in Kapitel 5.1.4. Je nach Typenzuweisung sind dem Agenten allgemeine Eigenschaften und Verhaltensweisen zugeordnet.

Agentenspezifische Parameter- und Attributbestimmungen wie Geschwindigkeiten oder Standorte können im Eigenschaftsfenster des Agenten ergänzt werden. Ebenso wie die Kommunikationslogik der Agenten untereinander durch eine Priorisierung der Arbeitsvorgänge oder ein- und ausgehende Nachrichten zwischen den Agenten.

Die Modellierung der Umgebung, der Infrastruktur und der Prozessmodellierung basiert auf industriespezifischen Bibliotheken zu Flüssigkeiten, Fußgänger:innen, dem Schienenverkehr, dem Straßenverkehr, dem Materialtransport und zur Prozessmodellierung. Diese stehen in Paketen, ebenfalls in der *Palette*, zur Verfügung und sind über die Dauer des jeweiligen Prozesses konsistent zu verwenden. Die benötigten Module aus der jeweiligen Bibliothek sind in das Modellfenster zu ziehen, nach dem Bausteinkästchenprinzip zusammenzusetzen und der Ablauffolge nach zu verbinden. Der Beginn und das Ende eines jeden Prozesses ist durch die Elemente *Source* und *Sink* gekennzeichnet. Die implementierte Prozesslogistik beschreibt die Materialflüsse, Transportzyklen und Lagerbewegungen nach den definierten Regelungen über die gesamte Modellierung. Zur Konfiguration der Ressourcen zu Lagerflächen sind Ressourcenpools bzw. für Fahrzeuge Fahrzeugflotten zu erstellen und den Prozessen zuzuweisen. Außerdem beziehen sich die Ressourcen auf die zuvor definierten Agenten. Eine benutzerdefinierte Logik durch die Integration von Java-Code-Funktionen erlaubt es, komplexe Logiken, Berechnungen oder Entscheidungsbäume an den gewünschten Stellen zu implementieren.

5.1.4. Elementspezifizierung

Die Komponenten, die Zustände, Übergänge, Aktionen, Variablen, Funktionen, Ereignisse, Parameter und Populationen umfassen, bilden die Grundbausteine für die Erstellung von Modellen. Zustandsautomaten, Prozessmodelle und Variablen ermöglichen eine detaillierte und dynamische Modellierung verschiedener Szenarien.

Jedem Element in der Simulation ist ein spezifischer **Datentyp** zugeordnet, der eine detailliertere Beschreibung des Elements in seiner Ausgabe ermöglicht. Je nach Anwendungsfall erfolgt eine Auswahl zwischen den folgenden Optionen nach Tabelle 6.

Tabelle 6: Datentypen in Anylogic

Datentyp	Beschreibung	Datentyp	Beschreibung
int	ganze Zahlen	List	Sammlung von Elementen
double	reelle Zahlen	Agent	benutzerdefinierte Datenstruktur
boolean	Wahrheitswert (true/false)	Color	Farbdarstellung
string	Text	Image	Bilddarstellung
Array	Datenstruktur		

Die vordefinierten Merkmale jedes Agenten sind in das System integriert und leiten sich vom jeweiligen **Agententyp** ab. Je nach Agententyp sind verschiedene Modellierungszwecke möglich und nach den spezifischen Anforderungen des Modells gemäß Tabelle 7 zu wählen.

Tabelle 7: Agententypen in Anylogic

Agententyp	Beschreibung
Agent	Grundlegende Agenten, die beliebige Attribute, Variablen, Parameter und Verhaltensmodelle enthalten können. Allgemeine Akteure sind beispielsweise Personen, Fahrzeuge oder Maschinen.
Auto	Agenten, die für die Modellierung von Fahrzeugbewegungen auf Straßen in Verkehrssystemen, oder für die Logistik- und Transportsimulation entwickelt sind und der Straßenverkehrsbibliothek angehören.
Fußgänger:in	Agenten, die das Verhalten und die Bewegungen von Menschenmengen in verschiedenen Umgebungen simulieren und Teil der Fußgänger:innen-Bibliothek sind.
Materialposition	Agenten, die einzelne Einheiten von Materialien oder Produkten darstellen, die durch ein Produktionssystem, Lager oder Transportnetzwerk bewegt werden.
Ressourceneinheit	Repräsentation von Ressourcen, die in Prozessen verwendet werden und Teil der Prozessmodellierungsbibliothek sind.
Schienenfahrzeug	Agenten zur Darstellung von Lokomotiven und Eisenbahnwaggons, die sich auf den Schienennetzen bewegen.
Transporter	Agenten, die eine spezielle Form von Ressourcen darstellen und speziell für den Transport und den Ver- und Entladeprozesse von Gütern, Personen oder anderen Entitäten konzipiert sind.
Zug	Agenten, um Züge auf Schienennetzwerken abzubilden, einschließlich der Bewegungen entlang vorgegebener Strecken und der Handhabung von Stopps an Bahnhöfen.

Der Block **TransporterFleet** ist eine Funktion zur Verwaltung einer Flotte von Fahrzeugen, auf welche mit *SeizeTransporter* und *ReleaseTransporter* zugegriffen werden kann. Der Aufgabenbereich liegt im Transport von Gütern oder Passagieren. Die Fahrzeuge verfügen über die Fähigkeit, autonom innerhalb eines abgegrenzten Bereichs zu navigieren, ohne auf eine physische Leitstruktur angewiesen zu sein, können alternativ ebenso einem Infrastrukturnetz zugeordnet werden. Darüber hinaus werden Kollisionen automatisch vermieden und es ermöglicht Interaktionen mit anderen Elementen. Die Eigenschaften eines der TransporterFleet zugeordneten Agenten bleiben innerhalb der Flotte konstant. Zusätzlich ist eine Kapazitätsbegrenzung entweder durch Definition oder eines experimentellen Ursprungs möglich.

Das Modul **RessourcePool** definiert eine Sammlung von Ressourcen, die in Prozessen verwendet werden. Deren Verwaltung erfolgt über die Prozesselemente wie *Seize*, *Release*, *Assembler* oder *Service*. Es differenziert zwischen drei Ressourcentypen: statisch, mobil und tragbar. Jede Ressource kann sich in einem inaktiven oder aktiven Zustand befinden. Typische Anwendungen sind die Verwaltung von Personal, Maschinen oder Transportmitteln in Produktions- oder Logistikzenarien.

Das System bietet eine Vielzahl von **Elementblöcken**, deren unterschiedliche Sequenzen die Prozessfolge bestimmen. Um das Verständnis der Prozesslogik der Simulation zur Versorgung der TBM zu optimieren, werden in Tabelle 8 die Funktionen der häufig

genutzten Elemente detailliert beschrieben.

Tabelle 8: Beschreibung der verwendeten Blöcke

Allgemeines	
SOURCE	Startpunkt der Prozesslogik und Zuweisung eines Agenten
SINK	Endpunkt der Prozesslogik
SELECTOUTPUT	Trennung des Agenten in zwei oder mehrere Vorgänge
QUEUE	Warteschlange
DELAY	Zeitliche Verzögerung

Transporter Steuerung	
SEIZETransporter	Aufnehmen und Ansteuerung des Agenten Transporter
RELEASETransporter	Entlassen und entfernen des Agenten Transporters
MOVEByTransporter	Fortbewegung des Agenten Transporter mit oder ohne eines Material Item

Kransteuerung	
SEIZECrane	Aufnehmen und Ansteuerung des Krans zur Aufnahme eines Material Item
RELEASECrane	Entlassen und entfernen des Agenten Transporters
MOVEByCrane	Bewegen eines Material Items durch den Kran

Die **Kamera**-Funktion in AnyLogic bietet die Möglichkeit, maßgeschneiderte Visualisierungen der Simulation zu erzeugen und zu steuern. Sie ermöglicht durch Funktionen wie Zoom, Schwenken und Rotieren eine Visualisierung der Simulation aus unterschiedlichen Perspektiven. Die Kamera gestattet das Fokussieren auf spezifische Bereiche, das Nachverfolgen dynamischer Bewegungen und die Darstellung spezialisierter Visualisierungen in zwei- oder dreidimensionalen Formaten. Die Technik wird häufig zur Visualisierung detaillierter Segmente innerhalb komplexer Modelle sowie zur Optimierung von Animationen eingesetzt.

5.2. Rahmenbedingungen

Tabelle 9: Rahmenbedingungen zur Simulation - Teil 1/2

Softwarebasiert	
1	Verwendung der Software <i>Anylogic</i> in der Version 8.9.2 mit der Lizenz <i>Personal Learning Edition</i> .
2	Es ist kein Referenzpunkt im Koordinatensystem angegeben.
3	Maßstab: 1 Meter = 1 Pixel
4	Modellzeiteinheit: Minuten
Simulationsbasiert	
5	Die Simulation basiert auf einem idealen Soll-Zustand und berücksichtigt keine störenden oder verzögernden Faktoren oder Arbeitsschritte.
6	Die kontinuierliche Vortriebsgeschwindigkeit ist auf 18,5 Meter pro Tag festgelegt.
7	Der Prozessschritt P07 und P06 wird nicht detailgetreu modelliert, ausschließlich die Wartezeit der Lok an der TBM wird berücksichtigt.
8	Es werden ausschließlich die essenziellen Bestandteile betrachtet. Diese umfassen: Tübbing und Sohlsteine, Perlkies, Zement.
9	Die Prozessbeschreibung nach Kapitel 4.2 definiert den Detaillierungsgrad und die Dauer der Arbeiten.
10	Die Kapazität der Lagerfläche beträgt folgende: - Östliche, große Tübbinglagerfläche: 2700 Segmentteile - Westliche, kleine Tübbinglagerfläche: 1200 Segmentteile - Innenliegende Lagerfläche je Haupttunnelröhre: 72 Segmentteile
Datenermittlung und -grundlage	
11	Die Art der Datengrundlage und dessen Stand ist folgender: - BE-Fläche: Planunterlagen durch Implenia / Stand: vor Baubeginn - Tunnelbauwerk: Achsen durch die geotechnische Vermessung / Stand: vor Baubeginn - Ringeinbau: Extrahierte Daten aus der Datenbank zur Dokumentation der Tübbing / Stand: vor Baubeginn
12	Durchschnittliche Ablaufzeiten fließen als Grundlage in die Simulation ein. Die Datenerhebung der einzelnen Arbeitsschritte erfolgte durch eine eigenständige zeitliche Dokumentation während der Durchführung. Zur Bildung eines repräsentativen Mittelwerts wurden pro Arbeitsschritt drei Datenwerte erfasst. Zur Validierung der ermittelten Daten wurden Erfahrungswerte des Bauarbeiterpersonals herangezogen.

Tabelle 10: Rahmenbedingungen zur Simulation - Teil 2/2

Infrastruktur	
13	Die Prozesse in den Haupttunnelröhren sind symmetrisch, es sei denn, Abweichungen werden angegeben.
14	In jeder Haupttunnelröhre wird eine Versorgungslok eingesetzt. Es stehen insgesamt vier Spezialfahrzeuge der Marke TERBERG zur Verfügung.
15	Der Versorgungszug hat in der Rangfolge der Fahrzeuge Priorität.
16	Die Instandhaltung von Maschinen, Fahrzeugen und anderen Geräten wird nicht berücksichtigt.
17	An der außenliegenden Lagerfläche ist je Lagerplatz ein Portalkran vorgehalten, untertage ist ebenfalls ein Portalkran je Lagerbereich eingesetzt.
18	Die maximale Hub- / Transportleistung der Fahrzeuge und Anlagen sind folgende: - Portalkran: 40,0 Tonnen - Spezialfahrzeuge: 60,0 Tonnen - Versorgungszug: 150,0 Tonnen

5.3. Modellierung

Die Simulationsmodellierung basiert auf den Systemkomponenten und deren Interaktionen und ist auf Basis der in Kapitel 4.2 definierten Ablauffolge in einem Flussdiagramm im Anhang A dargestellt. Die Kombination aus den Agenten und der darauf Bezug nehmenden Prozesslogistik beschreibt die Bestandteile zum Ablauf der Simulation. Der Import des Datensatzes zur Ringbaureihenfolge stellt die Grundlage für die umfassende Simulationsumgebung dar, da die Prozesslogistik auf diesen Datensätzen basiert. Anschließend kann nach den im Modell hinterlegten Bedingungen, Regelungen und Ereignissen die Simulation durchgeführt werden. Abschließend lässt sich die Effizienz der logistischen Prozesse bewerten und potenzielle Engpässe identifizieren.

5.3.1. Agenten

Im Modellierungsbereich ist es möglich, durch das Hinzufügen eines Agentenelements aus der Palette einen neuen Agenten zu integrieren und diesen entsprechend zu benennen. Den Kontrollkasten *Agent will be used in Flowcharts as:* aktivieren und Typ des neu angelegten Agenten auswählen. Je nach Verwendung in der Simulation ist zwischen den Agenten nach Tabelle 7 zu wählen. In Anylogic steht ein breites Spektrum an zweidimensionalen Darstellungsoptionen für diverse Sektoren zur Verfügung, aus dem die geeignete Darstellung für den zu modellierenden Agenten ausgewählt werden kann [4]. Abschließend erfolgt die Zuweisung von Parametern an den Agenten sowie die Spezifikation des Datentyps.

TBM

Agent Type: Transporter

Die TBM kann nicht in der tatsächlichen Ausführung dargestellt werden. Aufgrund dessen ist ein Provisorium abgebildet. Dieses ist ein aufgestellter Zylinder mit den Maßen des Tunneldurchmessers. Die Nachbildung der TBM bewegt sich mit einer stetigen Geschwindigkeit von 18,5 m pro 24 h bzw. $0,007 \frac{km}{h}$ von der Montagekaverne in Richtung

Süden zur Baulosgrenze des Bauloses H51. Der Agent TBM gehört einer Transportflotte (*TBMFleet*) an, um die identischen Eigenschaften in beide Haupttunnelröhren sicherzustellen. Dem Agenten sind keine zusätzlichen Besonderheiten zuzurechnen.

Versorgungszug

Agent Type: Transporter

Der Agent Versorgungszug setzt sich aus vier Bestandteilen der Rubrik Rail Transport zusammen: Lokomotive mit der Führerkabine rechts, Hopper mit der Länge von 41,9 ft. sowie zwei intermodular flat cars mit einer Länge von je 64,8 ft. Der Hopper repräsentiert den Perlkiescontainer, während die Ladeflächen die Zementmörtelbehälter sowie die Tübbinge und Sohlsteine transportieren. Der Zug ist modular konfigurierbar und fungiert als ein integriertes System auf dem Schienennetz. Die Konfiguration des Schienenfahrzeugs ermöglicht den bidirektionalen Betrieb der Lokomotive, wobei die Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf $20,0 \frac{km}{h}$ festgelegt ist. Die Implementierung der temporären Geschwindigkeitsreduktion auf der Streckenführung ist in der Simulationsumgebung integriert und unter Kapitel 5.3.2 - Schienennetz genauer beschrieben. Der Versorgungszug ist einer TransporterFleet (*ZugFleetOst* und *ZugFleetWest*) zugeordnet, um jede Haupttunnelröhre mit der identen Lok vorzuhalten.

Terberg

Agent Type: Transporter

Aus der hinterlegten Auswahl zur dreidimensionalen Darstellung von Objekten ist unter Road Transport das Fahrzeug Lorry, ein Klein-LKW mit Transportfläche, gewählt. Die maximale Geschwindigkeit ist auf $10,0 \frac{km}{h}$ vordefiniert, während die Standardgeschwindigkeit $3,0 \frac{km}{h}$ beträgt. Die Geschwindigkeit ist abschnittsweise unterschiedlich zwischen den beiden Geschwindigkeiten zu wählen. Die Implementierung in die Simulationsumgebung ist unter Kapitel 5.3.2 - Straßennetz beschrieben. Der Agent Terberg ist trotz der Kapazität von vier Fahrzeugen keine Population, sondern ein singulärer Agent in einer kontinuierlichen Umgebung. Durch die Verwendung der TransporterFleet (*TerbergFleet*) wird die Kapazitätsoptimierung und die standardisierte Übertragung von Eigenschaften auf eine variable Anzahl von Fahrzeugen ermöglicht. Die Zuordnung der Haltepositionen der Fahrzeuge erfolgt durch die Organisation ihrer Stellflächen auf der Parkzone vor dem Hauptlager auf der BE-Fläche.

Tübbing

Agent Type: Material Item

Der Agent Tübbing ist der Hauptagent der Simulationsmodellierung. Modelliert ist das Stahlbetonsegment als grau eingefärbter Quader. Zur Vereinfachung der Modellierung, ist die Kombination aus drei Elementen zur Lagerung, Verladung und Transport als ein Quader abgebildet. Gesonderte Eigenschaften sind dem Agenten nicht zugeordnet. Der Agent ist Grundlage des RessourcePools der Lagerstätten am Tübbinglager auf der BE-Fläche (*Lagerfläche_Groß* und *Lagerfläche_Klein*) und dem Umschlagplatz der NHS Innsbruck (*NHS_LagerflächeOst* und *NHS_LagerflächeWest*). In den Ressourcenpools

sind die jeweiligen Kapazitäten an der Lagerfläche sowie die Standorte der Lagerungen festgelegt. Die genaue Beschreibung zur Organisation der Lagerstätten folgt unter Kapitel 5.3.3. Alle Tübbings-Agenten sind als tragbare Elemente definiert, um die Eigenschaften des Agententyps Transporter nutzen zu können.

Zementbehälter

Agent Type: Material Item

Die Zementbehälter sind zur vereinfachten Darstellung als blau eingefärbter Quader dargestellt. Da der Agent dem Typ des Material Items zugewiesen ist, fungiert der Behälter als tragbares Element und benötigt keine weiteren Spezifizierungen. Allerdings ist der Agent einem RessourcePool (*resourceZement*) zugeordnet, da die Zuordnung im Modell analog zu dessen des Agenten Tübbings festgesetzt ist.

5.3.2. Infrastruktur

Die effektive Gestaltung von Verkehrsnetzen ist essenziell für den reibungslosen Transport von Gütern. Die Process Modelling Library bietet flexible Werkzeuge für die Abbildung der Straßen- und Schieneninfrastruktur und ermöglicht es, detaillierte Modelle zu erstellen, sowie Verkehrsflüsse, Engpässe und Betriebsabläufe realistisch zu simulieren. Fahrzeuge und Züge werden als Entitäten dargestellt, die sich durch das Netzwerk bewegen und dabei Ressourcen wie Streckenabschnitte nutzen.

Straßennetz

Die Infrastruktur des Fahrzeugverkehrs basiert auf Straßennetzen gemäß der Abbildung 25 und 26. Nicht dargestellt ist die Straßeninfrastruktur des Zugangstunnels. Dieser ist gemäß dem Beschriebenen nach 3.6.4 modelliert und verbindet das Straßennetz auf der BE-Fläche mit dessen der NHS Innsbruck.

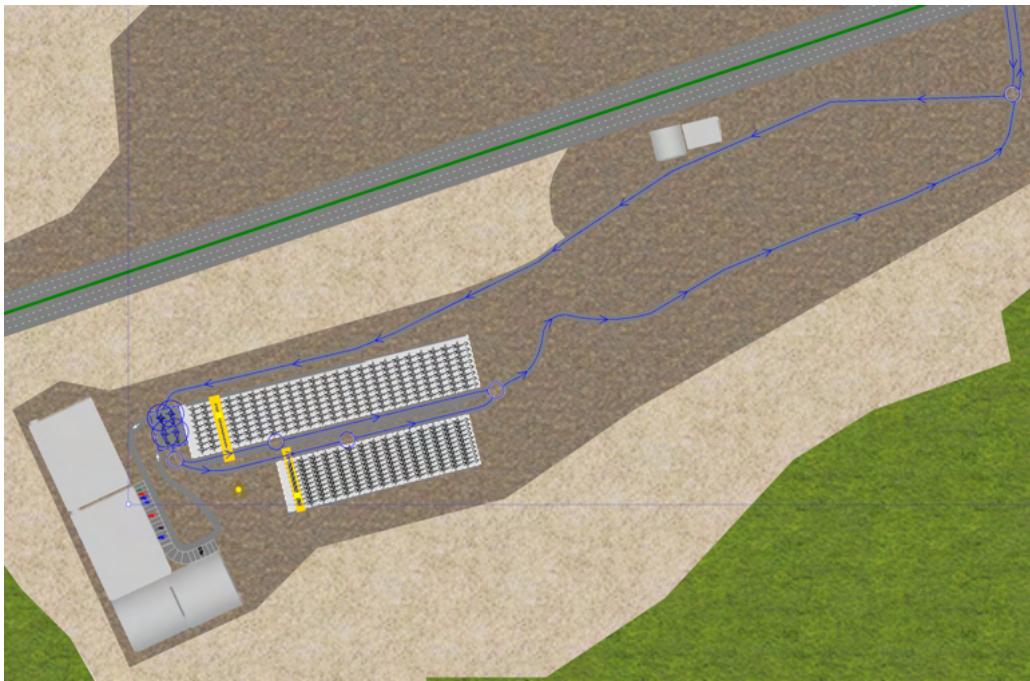


Abbildung 25: Straßennetz der BE-Fläche

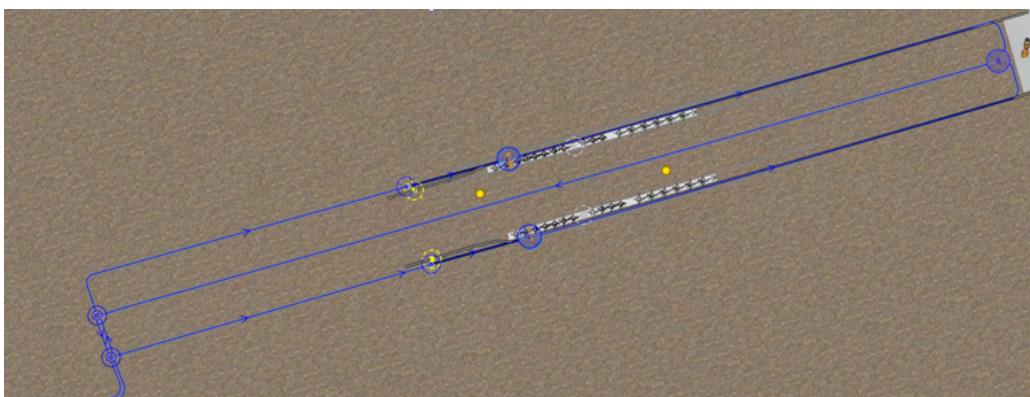


Abbildung 26: Straßennetz der NHS Innsbruck

Zu Beginn sind die Fahrstraßen mit der Funktion *Path* aus der *Process Modelleing Library* manuell in die Modellierungsebene zu integrieren. Diese Art ist zu wählen, da den im Straßennetz verkehrenden Fahrzeugen Transporteigenschaften zugewiesen sind und somit auf dem Typ Transporter basieren. Eine Durchführung mit der Anwendung *Road* aus der *Road Traffic Library* ist nicht möglich, da die Funktionen des Transporter-Typs nicht kompatibel sind. Die Straßeninfrastruktur basiert somit auf der Anwendung *Path*, und ist als Straße modelliert. Der Startpunkt einer Straßenmodellierung gilt als lokaler Nullpunkt der modellierten Straße. Alle weiteren Änderungen der geografischen Lage sind im Nachgang manuell anzupassen. Abschließend ist die Straßen- und Fahrbahnbreite sowie die Fahrtrichtung zu bestimmen.

In der Modellierung sind verschiedene Elemente zu verwenden, um die Straßeninfrastruktur abzubilden. *Point Nodes* definieren Knotenpunkte, um Kreuzungspunkte zu erzeugen oder Haltepunkte und Parkmöglichkeiten zu integrieren. *Rectangular Nodes* und *Polygonal Nodes* stellen Bereiche dar, in denen Aktionen durchgeführt werden. Die Verkehrsteilnehmer:innen verkehren mit der vordefinierten Geschwindigkeit auf den Straßen. Eine streckenabschnittsweise Geschwindigkeitsreduzierung ist durch eine manuelle Steuerung der Geschwindigkeiten innerhalb der Infrastruktur möglich und wurde bereits unter Kapitel 5.3.1 - Versorgungszug beschrieben. Die maximale Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist im beladenen Zustand auf $3,0 \frac{km}{h}$ festgelegt. Die verbleibenden Streckenteile sind mit $10,0 \frac{km}{h}$ zu befahren. Zur Umsetzung der Geschwindigkeitsänderungen in der Simulation ist in der Transportflotte des Agenten Terbergs () folgender Java-Code nach Abbildung 27 einzufügen:



```

Actions
On new transporter:
On seize:
if(path==path2 && path==path14 && path==path13 && path==path10 && path==path5 && path==path9 && path==path) {
    unit.setSpeed(3.0*0.27778);
} else {
    unit.setSpeed(10*0.27778);
}

```

Abbildung 27: Java-Code zur Geschwindigkeitsreduzierung des beladenen Terbergs

Anylogic sieht für diese Anwendung eine gesonderte Funktion vor. Die Einstellungen werden am betroffenen Streckenabschnitt in den Einstellungen der Straße getroffen. Die Funktion *Speed limit for transporters* ist mit einem Haken zu bestätigen. Dieser vereinfachte Weg zur abschnittsweisen Geschwindigkeitsreduzierung hat aus nicht erklärbaren Gründen nicht funktioniert.

Schienennetz

Obwohl auf den Gleisen Züge modelliert sind, sind jenen Fahrzeugen ebenso Transporteigenschaften zugewiesen. Aus diesem Grund basiert die Modellierung des Schienennetzes auf den gleichen Anwendungen und nach identischem Vorgehen wie dessen des Straßennetzes. Das Schienennetz wird ebenso mit der Funktion *Path* visualisiert, allerdings im Darstellungsmodus *Railroad*, zu Deutsch als Schiene, abgebildet. Die Infrastruktur des Schienennetzes ist beispielhaft in der NHS Innsbruck nach Abbildung 28 dargestellt.

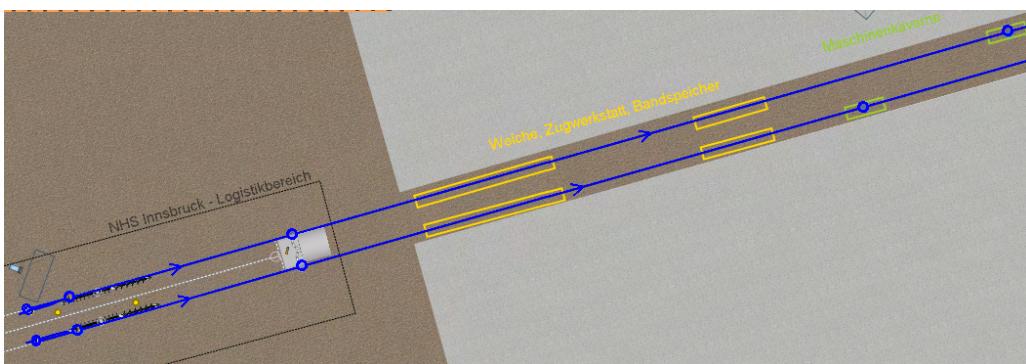


Abbildung 28: Schienennetz der NHS Innsbruck

Die weitere Gleisstrecke wird basierend auf den Vermessungsdaten bis zur Baulosgrenze H51 entsprechend dem Stand vor Baubeginn modelliert. Dabei wird das Längsgefälle aufgrund der manuellen Geschwindigkeitseingaben vernachlässigt. *Point Nodes* stellen Knotenpunkte für Be- und Entladestellen und Parkmöglichkeiten dar. *Rectangle Nodes* und *Polygonal Nodes* sind Bereiche, in welchen abschnittsweise Eigenschaftsänderungen im Schienennetz vorzunehmen sind, aber auch allgemein Aktionen durchgeführt werden. Die Gleisgeometrie ist mit einer Spurweite von 1,5 Metern standardisiert, wobei eine normierte Geschwindigkeit von 20,0 $\frac{km}{h}$ auf den Schienen festgelegt ist. Die Modellierung erfordert eine separate Berücksichtigung von Montagekavernen sowie eingeschränkten Bereichen durch Weichen und Hindernisse. Die Abschnitte sind durch *Rectangle* bzw. *Polygonal Nodes* von der Schienennstrecke abgegrenzt. Im entsprechenden Eigenschaftsfeld kann die Geschwindigkeit für diesen Bereich für den Agenten Versorgungszug gemäß Abbildung 29 eingrenzt werden.



Abbildung 29: Einstellung der Geschwindigkeitsbeschränkungen

Diese Abschnitte betreffen in beiden Haupttunnelröhren die Montagekaverne, den eingleisigen Streckenabschnitt mit Bandspeicher, die Zugwerkstatt und zwei Weichen sowie die wiederholten Arbeiten am Querstollen. Die Längen der Bereiche an den Querstollen variieren zwischen den beiden Haupttunnelröhren, wobei die östliche Röhre eine Länge von 150,0 Metern aufweist und die westliche Röhre 50,0 Meter misst. Die Geschwindigkeitsreduzierungen an der Montagekaverne misst in beiden Haupttunnelröhren rund 40,0 Meter. Die durch den Bandspeicher, die Zugwerkstatt und die Weichen geprägt ist, jeweils 200,0 Meter und 100,0 Meter je Haupttunnelröhre.

5.3.3. Lagerstätten

Die Modellierung der Lagerstätten basiert auf *Rectangle Nodes*, die mit *Attractors* ausgestattet sind. *Attractors* sind spezielle Punkte innerhalb eines *Rectangle* oder *Polygonal Node*, die das Verhalten von Agenten gezielt beeinflussen. Sie dienen als Zielorte oder Anziehungspunkte, zu denen sich Agenten bewegen oder auf die sie reagieren. Es lassen sich einzelne Attractors in dem Modellbereich integrieren oder auch ganze Netzwerke erstellen.

Wie in Abbildung 30 anhand der kleinen Lagerfläche an der BE-Fläche beispielhaft dargestellt, werden den Ressourcenpools der Materialeinheiten die Bereiche der Lagerstätten zugeordnet und die Kapazität des Ressourcenpools festgelegt.

titel: Lagerfläche_Klein - ResourcePool

Name:	Lagerfläche_Klein	<input checked="" type="checkbox"/> Show name	<input type="checkbox"/> Ignore
Resource type:	Portable		
Capacity defined:	Directly		
Capacity:	1200		
When capacity decreases:	units are preserved ('End of shift')		
New resource unit:	Tübbing		
Home location (nodes):	LagerflächeKlein		
<input type="button" value="+"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/> <input type="button" value="X"/> <input type="button" value="E"/>			

Abbildung 30: Lagerhaltung

Ist die Anzahl der Materialeinheiten im Ressourcenpools geringer als die Anzahl der Attractors in dem Node, werden Attractors nicht belegt. Der Agent Tübbing, der dem Ressourcenpool zugewiesen ist, wird abschließend an der Stelle des Attractors angezeigt. Dieser Vorgang ist für jede Lagerstätte mit identischen Anforderungen und Kapazitäten in einem Ressourcenpool zu konsolidieren. Sollte dies nicht zutreffen, ist die Errichtung eines neuen Ressourcenpools erforderlich. Die Kapazitäten und Strukturen der Lagerstätten entsprechen der konkreten Organisationsform und sind in Kapitel 5.2 - Punkt 10 spezifiziert.

Es existieren diverse Methoden zur Optimierung der Lagerhaltung, einschließlich des Einsatzes von Lagersystemen (*Storage System*). Dieser Ansatz basiert auf vordefinierten Lagerblockstrukturen mit vorimplementierten Eigenschaften. Daraus resultiert eine verminderte Adaptationsfähigkeit gegenüber variierenden Anforderungen und eine inflexible Handhabung bei Abweichungen von standardisierten Logistikprozessen. Die Integration von Lagerressourcen durch den Einsatz von Attractoren ermöglicht eine Vielzahl individueller Lagerhaltungslösungen, erfordert jedoch einen erhöhten Modellierungsaufwand und ein vertiefteres Verständnis. Aufgrund der individuellen Verwendung fiel die Wahl zur Umsetzung der Lagerhaltung auf die Methode der Attraktoren.

Weiterer Bestandteil der Lagerstätten ist der Portalkran. Dieser ist als Brückenkran mit einem unabhängigen Hubwerk modelliert. Außerdem werden in der Prozesslogik die Geschwindigkeiten für die Brücke, den Wagen und das Hebezeug in den betroffenen Arbeitsvorgängen berücksichtigt. Der Wagen und die Brücke verkehren mit einer Geschwindigkeit von $0,45 \frac{km}{h}$, während der Hebezug eine Geschwindigkeit von $0,2 \frac{km}{h}$ aufweist. Zusammenfassend in den Abbildungen 31 und 32 die dreidimensionale Ansicht der Lagerstätten an der BE-Fläche und der NHS Innsbruck.

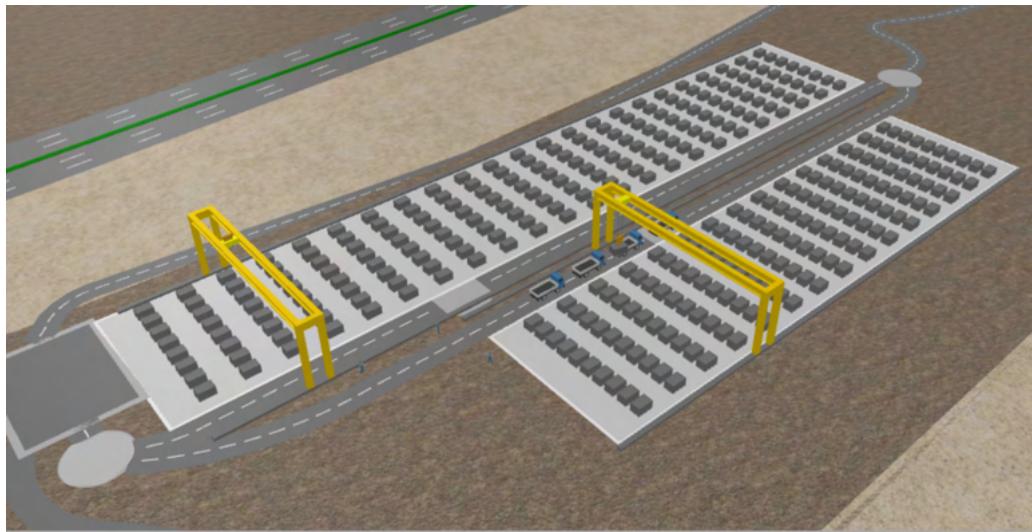


Abbildung 31: Lagerstätten an der BE-Fläche

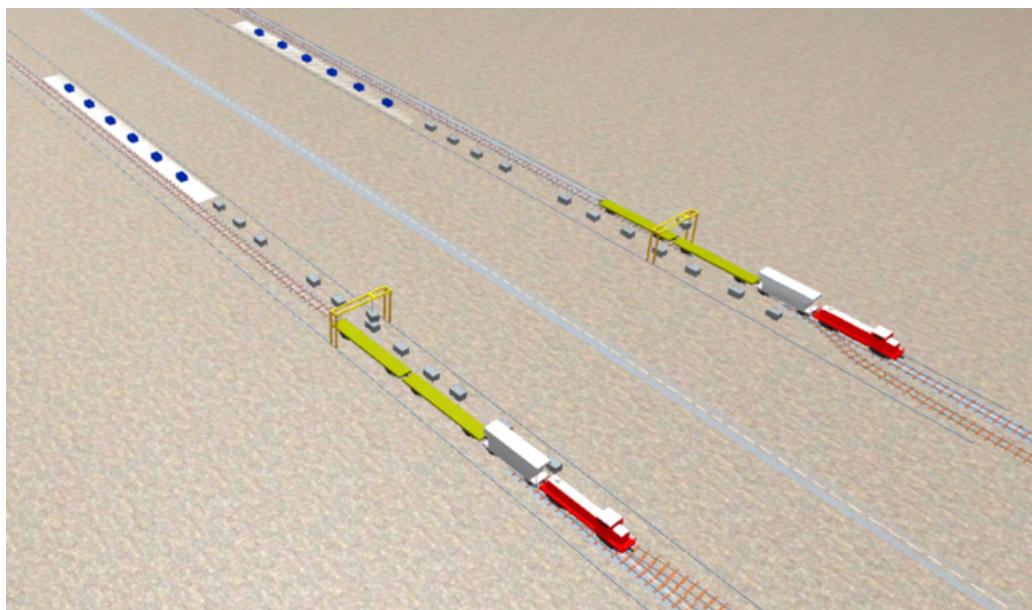


Abbildung 32: Lagerstätten an der NHS Innsbruck

5.3.4. Datenimport

Die Auflistung der Ringeinbaureihenfolge ist im Excel (.xls) Format aufbereitet. Der Import in Anylogic ist über die Anwendung *Database* und weiter im Kontextmenü *Import von database tables* zu importieren. Dabei ist das zu importierende Datenformat Excel/Access auszuwählen, und die zu importierende Datei hochzuladen. In der geöffneten Schaltfläche zum Import von Datenbanken unter *Select table(s) you want to import* alle Datenbanktabellen im Kontrollkästchen aktivieren, welche im Modell importiert werden

sollen. Die importierte Liste ist im Projektbrowser unter dem Reiter *Database* einsehbar und bearbeitbar.

In der Auflistung stellt die Ringnummer die Reihenfolge des Einbaus dar. Unter „*ring_typ*“ ist der Ringtyp beschrieben, wobei hier die Auswahl zwischen vier Typen besteht:

- MT: Messtübbing
- NT: Normaltübbing
- QT: Querschlagtübbing
- ST: Sondertübbing

Die Spalte „*sf_typ*“ definiert die einzubauenden Sohlfertigteile. Dies wird verallgemeinert und zu einem Sohlfertigteil zusammengefasst. Die Spalte „*strecke_ost*“ beschreibt die kumulierte Länge der eingebauten Tübbingsegmente. Der Übersichtlichkeit halber ist die Einbaureihenfolge in der HT-Ost und HT-West getrennt aufgeführt.

ringnummer_ost	ring_typ_ost	sf_typ_ost	strecke_ost
1	1 NT	SF	1.95
2	2 NT	SF	3.9
3	3 NT	SF	5.85
4	4 NT	SF	7.8
5	5 NT	SF	9.75
6	6 NT	SF	11.7
7	7 NT	SF	13.65
8	8 NT	SF	15.6
9	9 NT	SF	17.55
10	10 NT	SF	19.5
11	11 NT	SF	21.45
12	12 NT	SF	23.4
13	13 NT	SF	25.35
14	14 NT	SF	27.3
15	15 NT	SF	29.25

Abbildung 33: Datenbank zur Einbaureihenfolge

Die Datenbanktabellen nehmen Einfluss auf die Koordination der Lagerflächen und die Logistik der Fahrzeuge. Die implementierte Anwendung ist unter Kapitel 5.3.5 - Koordination der Lagerlogistik und der Ringeinbaureihenfolge, im Detail beschrieben.

5.3.5. Interaktionen

Koordination der Lagerlogistik und der Ringeinbaureihenfolge

Der Agent Terberg unterliegt der allgemeinen Organisation der Lagerstätten an der BE-Fläche. Wie bereits beschrieben werden an der größeren, östlich gelegenen Lagerfläche hauptsächlich Normaltübbinge und die dazugehörigen Sohlfertigteile gelagert. Alle weiteren Stahlbetonsegmente und Sohlfertigteile sind an der kleineren, westlichen Lagerfläche deponiert. Für den betroffenen Terberg ist es essenziell, die spezifischen Tübbingarten für die zukünftigen Haupttunnelröhren zu kennen. Zudem muss der Agent über die präzisen Lagerorte und Anordnungsmuster der verschiedenen Segmente informiert sein. Die gesamte Interaktion der Lagerlogistik und der Einbaureihenfolge basiert auf der Verknüpfung der Simulationsumgebung mit Datenbanktabellen, sowie einer manuellen Implementierung in die Modellierungsumgebung. Eine genaue Beschreibung zum Import der Datenbanktabellen ist in Kapitel 5.3.4 nachzulesen. Der Bezug zur Datenbank für die beschriebene Anwendung wird im Anwendungselement in der Prozesslogik hergestellt,

indem Zuweisungen und Bedingungen in Bezug auf die Tabelle definiert werden. Anbei in Abbildung 34 eine beispielhafte Darstellung zur ordnungsgemäßen Zuweisung der Lagerlogistik an der BE-Flächen in Verbindung mit der Einbaureihenfolge der Haupttunelröhre Ost.

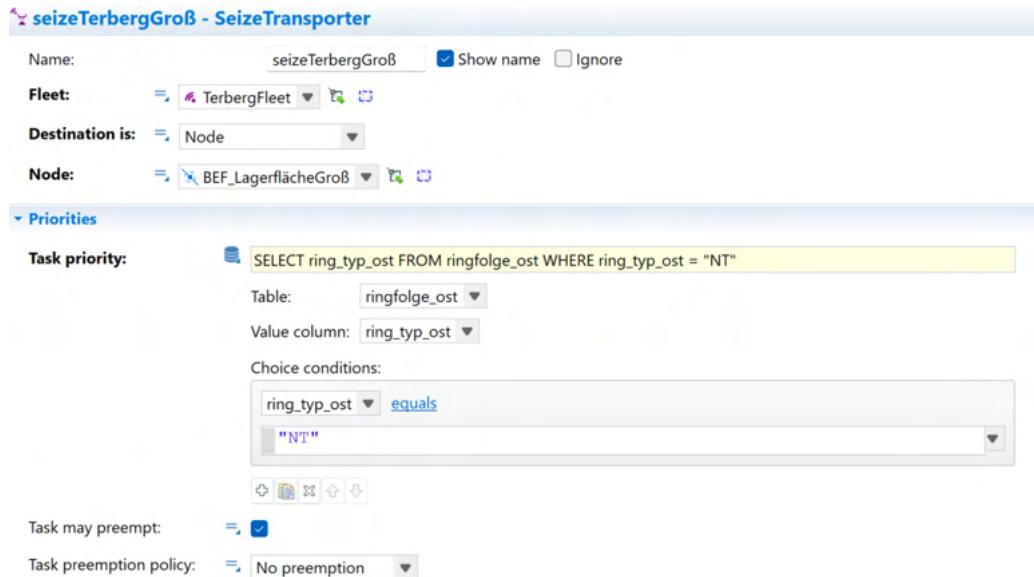


Abbildung 34: Java-Code zur Koordination der Lagerlogistik und der Ringeinbaureihenfolge

Sekundäre Interaktion zwischen dem Versorgungszug und dem Terberg

Die Kommunikation zwischen dem Versorgungszug und dem Terberg ist durch eine klare Kommunikationsstruktur mit ereignisorientierter Logik definiert. Diese hat den Nutzen, die Priorisierung der Zufahrtsordnung zur Lagerfläche an der NHS Innsbruck zu organisieren. Der Zug hat dabei das Vorrangrecht und erst nach Abschluss seines Be- und Entladevorgangs wird die Freigabe für das Fahrzeug erteilt. Die Implementierung beruht auf der nachrichtenbasierten Funktion *stopDelay()*. Dafür wird in der Prozesslogik an den betroffenen Stellen im Eigenschaftsfeld unter *Actions* ein Java-Code hinterlegt. Der Versorgungszug sendet nach Abschluss seiner Arbeiten im Delay-Block an der NHS Innsbruck beispielhaft der HT-Ost, eine Nachricht nach Abbildung 35 an den Agenten der Transportflotte Terberg.

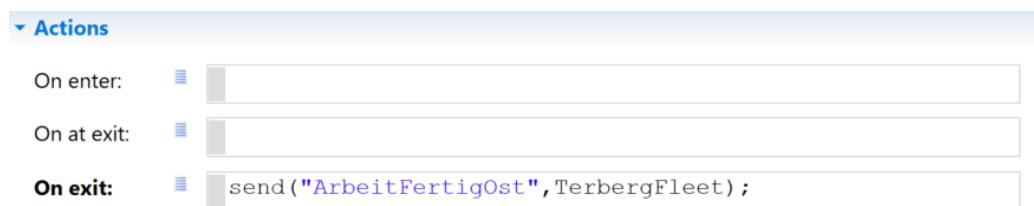
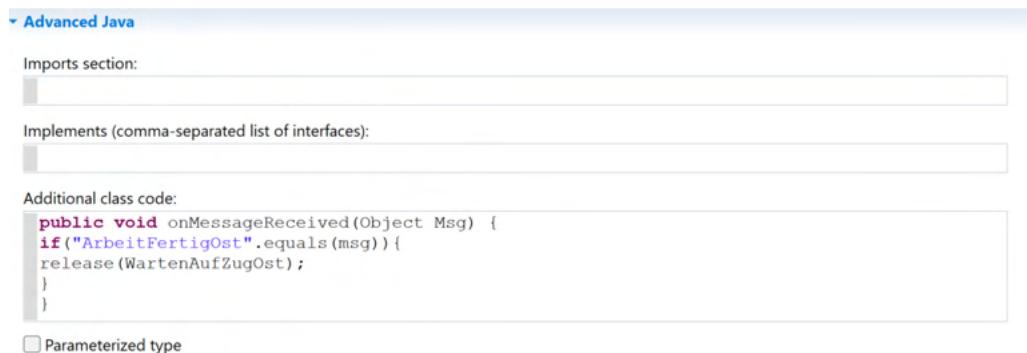


Abbildung 35: Java-Code zur Versendung der Nachricht in der Prozesslogik durch den Agenten Versorgungszug

Der Agent Terberg verweilt in der Zwischenzeit an dem definierten Haltepunkt vor der Be- und Entladestelle in der NHS Innsbruck, bis die Nachricht des Versorgungszuges eintrifft. Dies wird durch die Kombination eines *Wait*-Blocks mit einer Freigabe durch den Nachrichtenempfang umgesetzt. Um den *Wait*-Block nach Ankunft der Nachricht bei dem Agenten Terberg freizugeben, wird die Methode *Release()* im Java-Code verwendet. Dafür muss zuerst die Methode *onMessageReceived()* definiert werden, damit die Nachricht „ArbeitFertigOst“ bzw. „ArbeitFertigWest“ empfangen werden kann und die Freigabe des *Wait*-Blocks durch *release()* ermöglicht wird. Dies ist in den Eigenschaften des Agenten Terbergs nach Abbildung 36 zu integrieren. Der Block *Wait* gilt anschließend als beendet.



```

Advanced Java

Imports section:
[empty]

Implements (comma-separated list of interfaces):
[empty]

Additional class code:
public void onMessageReceived(Object Msg) {
    if("ArbeitFertigOst".equals(msg)) {
        release(WartenAufZugOst);
    }
}

Parameterized type

```

Abbildung 36: Java-Code zum Empfang der Nachricht durch den Agenten Terberg

Alternativ ist auch die Verwendung von Zustandsdiagrammen (Statecharts) möglich. Eine Anwendung ist zur Steuerung von verschiedenen Zuständen sinnvoll, aufgrund der Komplexität der Anwendungen allerdings nur bei umfangreichen Interaktionen anzuwenden. Eine weitere Möglichkeit ist die Integration von Ereignissen (Events) in der Simulationsmodellierung. Diese überprüfen regelmäßig, ob eine bestimmte vordefinierte Bedingung erfüllt ist. Folglich ist eine periodische Überprüfung erforderlich und ist somit ineffizienter als die nachrichtenbasierte Kommunikationsstruktur.

Direkte Interaktion zwischen dem Versorgungszug und der TBM

Die direkte Interaktion zwischen der Versorgungslok und der TBM erfordert ebenso eine manuelle Integration in die Simulationsumgebung. Das Prinzip beruht darauf, dass der Versorgungszug mit höherer Geschwindigkeit die voran fahrende TBM einholt. An der TBM angekommen, die Geschwindigkeit auf die Geschwindigkeit der TBM über den Zeitraum der Entladung anpasst und anschließend wieder zum Ausgangspunkt, dem Umschlagplatz der NHS Innsbruck zurückkehrt. Der ständig fortbewegende Standort der TBM stellt die Herausforderungen dieser Beziehung dar. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Interaktion in die Simulationsumgebung zu integrieren:

Möglichkeit 1 - Dynamische Distanzmethode mit *DistanceTo()*:

Die beiden Agenten bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch *MoveTo()* fort. Mit der Anwendung *DistanceTo(TBM)* wird der Zeitpunkt des Zusammentreffens der beiden Agenten ermittelt und durch die Codeeingabe *Versorgungszug.setSpeed(TBM.getSpeed(0.007))* die Geschwindigkeit von 20,0 $\frac{km}{h}$ auf

0,007 $\frac{km}{h}$ reduziert. Durch *Delay()*, *Wait()* oder *Hold()* kann die Dauer bestimmt werden, in welcher der Versorgungszug die TBM folgt und abschließend durch *MoveTo()* zum Ausgangspunkt zurückkehrt. Schwierigkeiten ergeben sich bei der Eingabe von *DistanceTo()*, da der direkte Bezug zum Agenten TBM nicht hergestellt werden kann. Ein manuelles Errechnen des Ankunftspunktes des Versorgungszuges an der TBM erscheint bei dieser Methodik aufgrund der Anzahl der Wiederholungen als nicht sinnvoll.

Möglichkeit 2: Vorhersage / Berechnung der Position der TBM

Der Agent Versorgungszug ist mit einer konstanten Geschwindigkeit auf der Schienenstrecke unterwegs, wodurch die künftige Position des Agenten zu bestimmen ist. Dies kann umgesetzt werden, indem die aktuelle Position, also der Be- und Entladebereich an der NHS Innsbruck und die Fahrgeschwindigkeit durch folgende Formel im Java-Code der Prozesslogik in *MoveTo()* zur Fortbewegung in der Haupttunnelröhre nach Abbildung 37 integriert wird. *TimeAhead* stellt dabei die Entladezeit an der TBM dar.

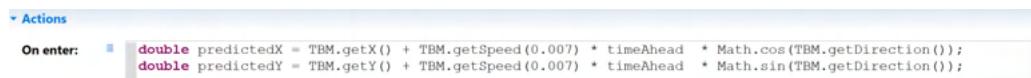


Abbildung 37: Java-Code zur Berechnung der Position von der TBM

Ergänzend dazu ist ein *Event* im Agenten Versorgungszug zu erstellen, das in regelmäßigen Abständen überprüft, ob der Zug sich der vorhergesagten Position von der TBM annähert. Wenn der Versorgungszug innerhalb eines akzeptablen Abstands von der definierten Position entfernt ist, soll die Fahrgeschwindigkeit durch folgenden Java-Code gemäß Abbildung 38 reduziert werden.

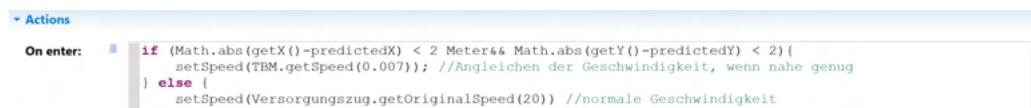


Abbildung 38: Java-Code zum Angleichen der Geschwindigkeit des Versorgungszuges

Aus nicht defizierbaren Gründen konnte der vorhandene Fehler nicht eliminiert werden, wodurch diese Methodik nicht umgesetzt werden kann.

Zusammenfassend kann die Interaktion zwischen dem Versorgungszug und der TBM nicht zufriedenstellend dargestellt werden und liefert kein aussagekräftiges Ergebnis. Daraus folgt, dass die Simulation aus zeitlichen Gründen und nach unzähligen Versuchen zur Fehlerbehebung an dieser Stelle abgebrochen wird und keine vollständige Simulation dargelegt werden kann.

5.4. Prozessdarstellung

Die Prozesslogik wird in Abhängigkeit der Fahrzeuge, also Terberg, Versorgungszug und TBM unterteilt. Die Materialien, Tübbinge und Zementbehälter sind in den Vorgängen der Fahrzeuge integriert und als tragbare Elemente definiert. Die Transportfrotten und die Ressourcenpools sind ebenso entsprechend der Abbildung 39 aufgeführt. Farbliche Abgrenzungen in der Logik, zeigen den Fortschritt der Simulation auf. Grau eingefärbt

te Blöcke wurden bisher nicht in Anspruch genommen. Das kräftig lila gefärbte Feld bedeutet eine direkte Bearbeitung, während schwach lila gefärbte Blöcke als bereits bearbeitet definiert sind. Die blau eingefärbten Elemente weißen ein analoges Verhalten auf. In Ergänzung dazu werden an jedem Block die durchgelaufenen Agenten gezählt und kumuliert.

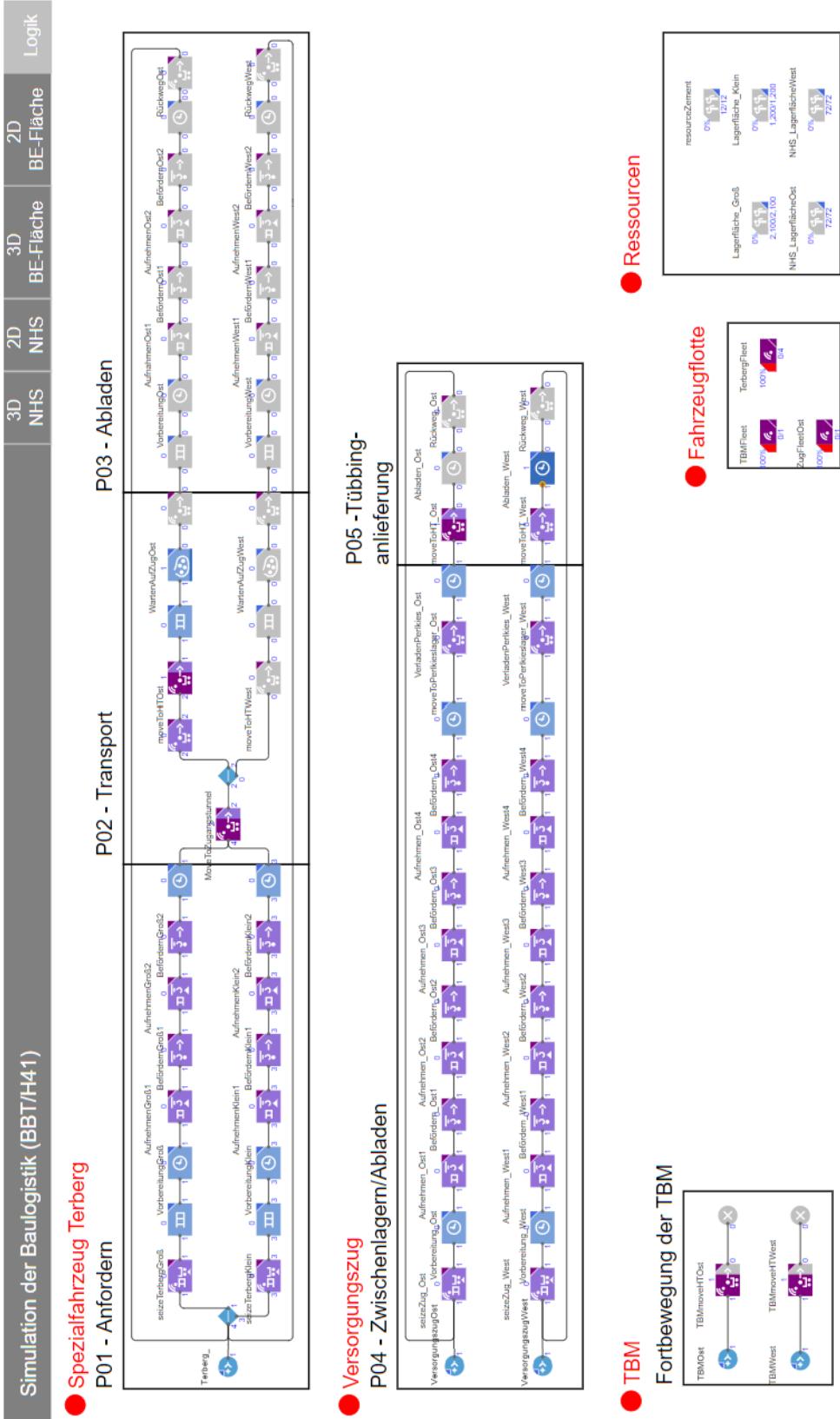


Abbildung 39: Ansichtsfenster der Prozesslogik

Es werden die relevanten Lager- und Umschlagplätze zwei- und dreidimensional dargestellt. In Anylogic können Ansichtsbereiche (*View Areas*) in die Simulationsumgebung eingefügt werden, um die Modellierungsumgebung in Arbeitsbereiche aufzuteilen. Die Abgrenzung von Bereichen optimiert die Sichtbarkeit und Organisation von Elementen sowie Arbeitsbereichen und gewährleistet eine effiziente Verwaltung, was in dieser Modellierung ebenfalls angewendet und implementiert wurde. Dafür muss aus der Rubrik *Presentation* der Bibliothek das Element *View Area* ausgewählt und in das Hauptfenster der Modellierung gezogen werden. Der darzustellende Inhalt der zweidimensionalen Darstellung muss innerhalb des Fensters liegen. In den Abbildungen 40 und 41 sind die Ansichtsfelder der 2D-Darstellungen der Baustelleneinrichtungsfläche und der Logistikfläche der NHS Innsbruck dargestellt.

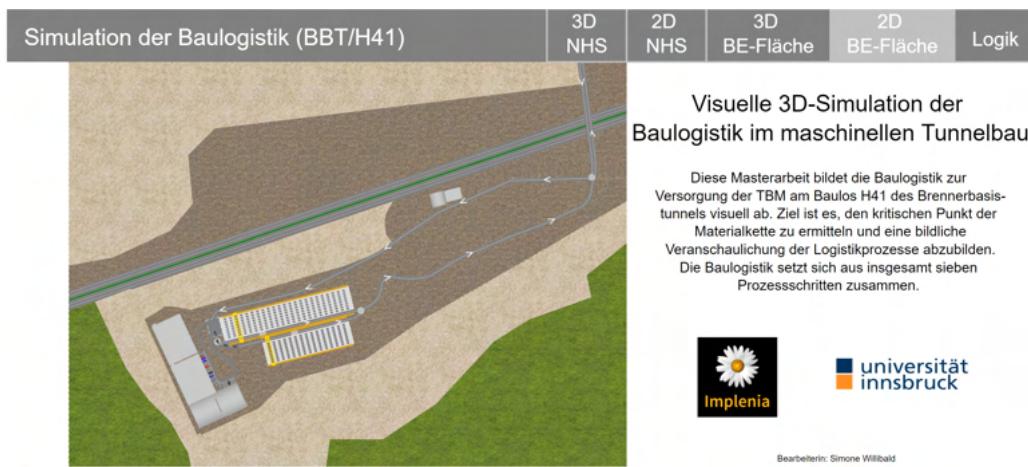


Abbildung 40: Ansichtsfenster der 2D-Darstellung der BE-Fläche



Abbildung 41: Ansichtsfenster der 2D-Darstellung der Logistikfläche der NHS Innsbruck

Zur Darstellung von Dreidimensionalem ist ein 3D-Fenster (*3D Window*), ebenfalls aus der Präsentations-Rubrik in das Hauptfenster zu integrieren. Zudem ist eine *Kamera* in

der 2D-Oberfläche zu platzieren und die Höhe, die Position und die Ausrichtung festzulegen. Im Anschluss erfolgt die Kopplung der beiden Komponenten über die 3D-Ansicht. Das Feld *View Areas* wird oberhalb des 3D-Fensters im Hauptmodellierungsbereich abgelegt. Schließlich besteht die Möglichkeit, zusätzliche Anpassungen, wie etwa die Konfiguration der Beleuchtungseinstellungen, vorzunehmen. In Abbildung 42 und 43 sind die dreidimensionalen Ansichtsfelder der Baustelleneinrichtungsfläche und der Logistikfläche der NHS Innsbruck abgebildet. Durch Klicken auf die Icons der unterschiedlichen Darstellungsansichten kann zwischen den Ansichtsfenstern in der Simulation gewechselt werden.



Abbildung 42: Ansichtsfenster der 3D-Darstellung der BE-Fläche

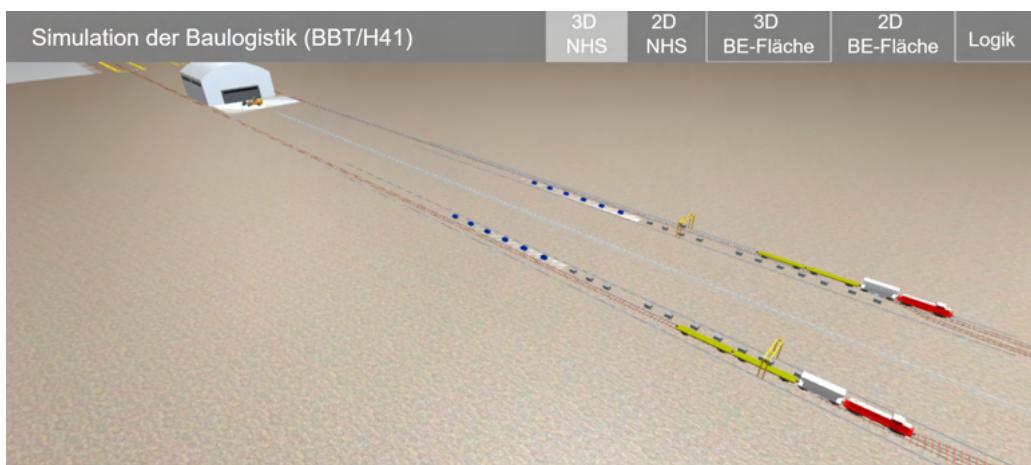


Abbildung 43: Ansichtsfenster der 3D-Darstellung der Logistikfläche der NHS Innsbruck

6. Diskussion der Ergebnisse

Die Digitalisierung der Baulogistik im maschinellen Tunnelbau verfolgt das Ziel der optimierten Planung im speziellen Bereich der Auslegung der Logistik und Ausführung, die in der Folge eine effiziente Erhaltung und Nutzung des Bauwerks ermöglicht. Die Aspekte der Digitalisierung beeinflussen somit die Gesamtheit der Bauprozesse und verändern ganzheitlich die bisher bekannte Abwicklung von Tunnelbauprojekten.

6.1. Beantwortung der Forschungsfragen

Welcher Mehrwert kann durch den Einsatz von TIM Modellen bei Baulogistiksimulationen erzielt werden?

Wie die Arbeit aufzeigt, ist die Logistik innerhalb eines Bauvorhabens ein wesentliches Steuerungsglied für die effiziente und wirtschaftliche Abwicklung eines Tunnelbauprojektes. Die Implementierung eines TIM Modells zur Simulation beruht auf der Generierung eines „mocked twin“, einer simulierten Version des digitalen Zwillings im Rahmen von Tunnel Information Modelling [8].

Die Untersuchung ergab, dass die Implementierung von TIM-Modellen in der Baulogistiksimulation signifikante Optimierungen in verschiedenen Aspekten ermöglicht. Die Erstellung einer simulativen Abbildung aller Prozessbestandteile, eines „mocked twins“, ermöglicht eine frühe Abschätzung der späteren Entwicklungen. Ist eine ausreichende Datenstruktur des Tatsächlichen vorhaben, ist ein besserer Umgang mit Störungen und Unterbrechungen möglich. Insbesondere im Bereich der unvorhergesehenen Ereignisse können die Stärken von simulativen digitalen Zwillingen in TIM Modellen ausgespielt werden. Eine kurzfristige Darstellung der Folgeereignisse verhilft zu einer Fehlereingrenzung und ermöglicht eine Abschätzung der Auswirkungen. Mithilfe des digitalen Werkzeugs kann die kurzweilige menschliche Entscheidungskraft durch eine langfristige digitale Abbildung der Ereigniskette aus der Vogelperspektive zur Entscheidungsfindung ersetzt werden. Nichtsdestotrotz ist die Kombination aus Mensch und Maschine zur Risikoeinschätzung unumgänglich [26]. Die Qualität der eingespeisten Daten und deren Implementierung in das Modell hat einen großen Einfluss auf den Mehrwert. Einschränkungen in der Datengenauigkeit und in den Datenfreigaben im Rahmen des Datenschutzes können die Resultate von Simulationen beeinflussen, was in der Praxis potenziell zu suboptimalen Entscheidungen führen kann.

Der Einsatz von TIM-Modellen zur Logistiksimulation kann in diesem Kontext einen bedeutenden Beitrag zur Weiterentwicklung sowie zur zeitlichen und wirtschaftlichen Optimierung der Baulogistikplanung im maschinellen Tunnelbau leisten. In Anbetracht der verwendeten Software der Anylogic Company ist eine erneute Verwendung kritisch zu hinterfragen. Aufgrund der fehlenden Datenstruktur, abgestimmt auf den Tunnelbau, ist der Mehrwert der Software zur Abbildung von Logistiksimulationen im Tunnelbau eingeschränkt. Es gilt weiter zu klären, in welchem Detaillierungsgrad eine TIM basierte Baulogistikplanung während der Bauausführung nötig ist, um alle Randbedingungen und Einflussfaktoren abzudecken und einen Mehrwert durch die Simulation zu erhalten.

Ist die bestehende Kapazitätsplanung der Ressourcen- und Transportgüter ausreichend, um die TBM kontinuierlich zu versorgen?

Es konnte keine vollständige Simulation umgesetzt werden. Aufgrund dessen ist eine Aussage zu der Frage in Hinblick auf die Simulationsauswertung nicht möglich. Allerdings kann mithilfe der gesammelten Daten der kritische Punkt der Baustellenlogistik numerisch berechnet werden. Die Untersuchungsergebnisse demonstrieren eindeutig, dass die gegenwärtige Kapazitätsplanung der Ressourcen und Transportmittel unzureichend ist, um eine kontinuierliche Versorgung der Tunnelbohrmaschine (TBM) zu gewährleisten. Im Verlauf der Analyse zeigte sich, dass Engpässe bei der Materialbereitstellung der Tübbingteile die kontinuierliche Funktion der Tunnelbohrmaschine in der HT-Ost nach 4,21 Tunnelkilometern, also bei km 12.61 und in der HT-West nach 5,36 Tunnelkilometern, also bei km 13.51 beeinträchtigen. Die Transportkapazitäten, im Speziellen, dessen der Versorgungsziele in den Haupttunnelröhren, können das Benötigte nicht leisten. Werden keine Änderungen in der Kapazitäts- und Transportgutplanung vorgenommen, kommt es zu unvermeidbaren Stillstandzeiten der TBM. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die Ressourcen des Terbergs nicht optimal ausgelastet sind. Zu Beginn der Tunnelbauarbeiten sind die Fahrzeuge gut ausgelastet, während in anderen Phasen Überbelastungen und nur sehr kurze Wartezeiten auftraten. Dies deutet darauf hin, dass die Kapazitätsplanung weder flexibel noch dynamisch genug ist, um den schwankenden Anforderungen der TBM gerecht zu werden.

Um die kontinuierliche Versorgung der TBM sicherzustellen, muss die Kapazitätsplanung der Ressourcen- und Transportgüter grundlegend überarbeitet werden. Eine kurzfristige Maßnahme zur Optimierung wäre die Beschleunigung der Be- und Entladeprozesse an der TBM. Durch effizientere Abläufe könnte die Wartezeit der Transportfahrzeuge auf der Schiene deutlich reduziert werden. Dies führt nicht nur zu einer Erhöhung der Transporteffizienz, sondern verringert auch den Leerlauf der Transportfahrzeuge, was insgesamt zu einer schnelleren Materialbereitstellung beiträgt.

Als langfristige Lösung ist eine Aufstockung des Schienenfuhrparks unumgänglich. Die aktuelle Anzahl der Lokomotiven reicht nicht aus, um den Materialbedarf der TBM durchgängig zu decken. Eine Aufstockung der Transportkapazität würde nicht nur den kontinuierlichen Materialfluss sicherstellen, sondern auch die Flexibilität im Baustellenbetrieb erhöhen. Es könnte sichergestellt werden, dass mehrere Züge gleichzeitig im Betrieb sind, was die Gesamtlogistik des Tunnelbauprojekts erheblich entlasten würde. Eine zentrale Empfehlung besteht darin, die Transportlogistik flexibler zu gestalten und dynamische Anpassungen der Kapazitäten an den Fortschritt der TBM vorzunehmen.

Inwiefern beeinflusst die Logistiksimulation im maschinellen Tunnelbau den Gesamtlauf?

Die Untersuchungen der Logistiksimulation im maschinellen Tunnelbau zeigen auf, dass diese einen erheblichen Einfluss auf den Gesamtlauf des Bauprojekts haben. Insbesondere ermöglicht eine funktionierende Simulation eine vorausschauende Planung des Materialflusses, der Maschinenbewegungen und der Ressourcenverteilung. Diese Methodik ermöglicht die frühzeitige Identifikation und Beseitigung potenzieller Engpässe und Verzögerungen im Bauprozess. Darüber hinaus ermöglichen Simulationen die Prozessoptimierung durch effizienteren Einsatz von Maschinen und Personal. Nach Kapitel

1.1 strebt die Bauwirtschaft durch die Implementierung von technologischen Werkzeugen nach einer Effizienzsteigerung. Obwohl Simulationen im Allgemeinen zu einer verbesserten Planung und Durchführung beitragen, hängt deren Effektivität stark von der Präzision der Eingangsdaten und der realistischen Modellierung der Bauprozesse ab. Unzureichende oder veraltete Datensätze können in bestimmten Szenarien zu unpräzisen Simulationsausgaben führen, was den Baufortschritt negativ beeinflussen kann. Eine fortwährende Aktualisierung der Datenbestände erweist sich als notwendig.

Die Ergebnisse der Arbeit belegen, dass durch den Einsatz von Logistiksimulationen der Gesamtablauf von Tunnelbauprojekten erheblich optimiert werden kann. Dies führt nicht nur zu einer verbesserten Planungssicherheit, sondern auch zu Kostensenkungen und kürzeren Bauzeiten. Der präzise Einsatz von Ressourcen und eine reibungslose Koordination der logistischen Abläufe tragen maßgeblich zum Erfolg eines Tunnelbauprojekts bei.

6.2. Erkenntnisgewinnung

Ziel dieser Arbeit war es, eine visuelle 3D-Simulation der Baulogistik im maschinellen Tunnelbau abzubilden. Wie in Kapitel 2.3.2 aufgezeigt, bietet es großes Potenzial, positive Effekte in der zukünftigen Baulogistikplanung zu erzielen. Allerdings muss das Verhältnis zwischen Kosten, Nutzen und Aufwand kritisch hinterfragt werden. Die Erstellung präziser Simulationsmodelle erfordert sowohl eine erhebliche Anfangsinvestition in Software und Fachwissen als auch einen intensiven Zeitaufwand für die Implementierung und Kalibrierung der Modelle. In zeitkritischen und kostensensiblen Phasen von Tunnelbauprojekten gilt es zu untersuchen, ob der Nutzen der Simulation, beispielsweise durch Effizienzsteigerungen oder Fehlervermeidung, die anfänglichen und laufenden Kosten rechtfertigt. Erheblich ist in diesem Zusammenhang, diese Abwägung projektspezifisch zu betrachten. Kritisch ist ebenfalls zu hinterfragen, ob die Ergebnisse der Simulation präzise und verlässlich genug sind, um die Investition zu rechtfertigen.

Anylogic bietet als Simulationsplattform eine Vielzahl an Funktionen, die sich gut für komplexe logistische Szenarien eignen. Allerdings zeigt sich, dass eine Großzahl der in der Software standardmäßig verfügbaren Module und Elemente für generelle logistische Prozesse einer Lagerlogistik oder Straßen- oder Schienensimulation ausgelegt sind und nicht spezifisch auf die Anforderungen des Tunnelbaus zugeschnitten sind. Tunnelbauprojekte erfordern spezielle Elemente und Prozessbestandteile, wie den Materialtransport in engen Röhren oder die Arbeitsschritte auf der Tunnelbohrmaschine, die in Anylogic nicht zur Verfügung stehen. Es kommt hinzu, dass keine visuelle Darstellung des Geländemodells möglich ist, ebenso wie der Import von CAD-gestützten Dateien. Die Simulationsdauer beschränkt sich aufgrund von lizenzerrechtlicher Bestimmungen auf 5,0 Stunden. Da die Gesamtdauer des gesamten Logistikprozesses mehrere Monate andauert, wäre die Simulation in weiterer Folge um einen Faktor von 230 zu beschleunigen. Aus diesem Grund gestaltet sich die Implementierung von tunnelspezifischen Baulogistikabläufen schwierig. Diese vorangegangenen Aussagen fokussieren sich ausschließlich auf die Anwendung der Software Anylogic in der Lizenz Personal Learning Edition, Version 8.9.2. In welchem Umfang höherwertige Lizenzen für spezifische Anwendungen im Tunnelbau geeignet sind, wird nicht thematisiert und benötigt weitere Untersuchungen. Eine vollständige Simulation konnte nicht durchgeführt werden, da das Programm der Anylogic Company Fehler aufwies, die nicht behoben werden konnten. Die Fehlerquelle liegt in der Durchgängigkeit der Simulation in Verbindung mit dem fortschreitenden

Standort der TBM und der kreislaufartigen Fahrt des Versorgungszuges zwischen der TBM und der Be- und Entladefläche an der NHS Innsbruck. Es wurden mehrere Versuche zur Fehlerbehebung getätigt, welche bereits unter Kapitel 5.3.5 beschrieben sind. Aufgrund des zeitlichen Rahmens wurden die Arbeiten an der Simulation eingestellt. Es ist eine spezielle Struktur, abgestimmt auf den maschinellen Tunnelbau, mit darauf abgestimmten Elementen und Anwendungen zu erstellen und zu implementieren. Dies bedeutet, dass die Software zwar leistungsfähig ist, jedoch zusätzliche Anpassungen und Customizing erfordert, was den Aufwand und die Lernkurve erhöht. Dennoch bietet AnyLogic durch Flexibilität und die Möglichkeit zur Erstellung benutzerdefinierter Elemente einen wichtigen Nutzen, sofern ausreichende Kenntnisse und Ressourcen zur Anpassung der Plattform vorhanden sind.

Ein weiterer kritischer Aspekt bei der Nutzung von 3D-Simulationen ist die Abhängigkeit von der Qualität der Eingangsdaten. Um realistische und nützliche Simulationsergebnisse zu erzielen, müssen präzise und aktuelle Daten zur Verfügung stehen. Unvollständige oder veraltete Daten können die Genauigkeit der Simulationen beeinträchtigen und zu falschen Annahmen führen. Dies stellt insbesondere im Tunnelbau, wo die Bedingungen oft dynamisch und schwer vorhersehbar sind, eine Herausforderung dar.

Die mangelnde Integration der Anylogic-Software in die digitale TIM-Kette im Rahmen des OpenBIM-Konzepts erweist sich als kritisch. Das weit verbreitete IFC-Format für den Austausch von 3D-Modellen in der Bauindustrie wird von der Anylogic Company nicht unterstützt. Zwar können CAD-Zeichnungen im DXF-Format importiert werden, jedoch lediglich in zweidimensionaler Darstellung. Die Daten können ausschließlich in ein CSV- oder XML-Format konvertiert und als Tabellen- oder Datenbankobjekte in das Simulationsmodell integriert werden. Die Implementierung einer Programmierschnittstelle mittels Java in Kombination mit beispielsweise dem ICF Java Toolkit ermöglicht das Auslesen von IFC-Dateien und den Import relevanter Informationen wie Koordinaten oder Struktur- und Logistikdaten in Anylogic. Ebenso problematisch ist der Export der Simulationsdaten. Es steht ausschließlich die Weiterverwendung der Daten über CSV-, HTML-Formate sowie SQL-Datenbanken zur Verfügung. Zudem können Modelle als eigenständige Java-Anwendungen exportiert und unabhängig von Anylogic verwendet werden. Der einzige Austausch von Simulationsdateien zur Weiterverwendung stellt aus Austauschportal AnylogicCloud dar. Demnach ist die konsistente Umsetzung nach dem OpenBIM Gedanken unzureichend gewährleistet.

Diese Aspekte verdeutlichen, dass die visuelle 3D-Simulation im Tunnelbau Potenziale bietet, jedoch auch mit erheblichen Herausforderungen verbunden ist, die in der Planung und Umsetzung berücksichtigt werden müssen.

6.3. Mehrwert

Die Ergebnisse dieser Masterarbeit bieten wertvolle Einblicke in mehrere zentrale Aspekte der Baulogistik im maschinellen Tunnelbau:

Durch die Simulation konnte der kritische Punkt in der Kapazitätsplanung klar identifiziert werden. Insbesondere wurde deutlich, dass die derzeitige Kapazität der Ressourcen- und Transportgüter nicht ausreicht, um die TBM kontinuierlich zu versorgen. Diese Erkenntnis ist entscheidend, um gezielte Maßnahmen zur Optimierung der Logistik zu ergreifen und so Stillstandzeiten der TBM und Verzögerungen im Ablauf zu vermeiden.

Darauf aufbauend wurde die Eignung von AnyLogic als Simulationssoftware im ma-

schinellen Tunnelbau näher untersucht, um zu bewerten, inwiefern die Software auf die spezifischen Anforderungen des Tunnelbaus zugeschnitten ist. Es wurde aufgezeigt, dass die Software trotz ihrer Flexibilität den Anforderungen dem Tunnelbau zum jetzigen Stand nicht gerecht werden kann. Dies betrifft vor allem den Materialfluss und die komplexen Transportprozesse. Trotz der noch vorhandenen Lücken im Simulationsaufbau, bietet Anylogic eine wertvolle Grundlage für die Simulation komplexer logistikbezogener Abläufe. Zusätzlich tragen die Arbeiten an der Simulation zur dringend notwendigen fortschreitenden Digitalisierung im Tunnelbau bei. Durch den Einsatz von 3D-Simulationen wird ein „mocked twin“ des digitalen Zwillings des Bauprojektes erstellt, der es ermöglicht, die Baulogistik effizienter und transparenter zu planen und zu steuern. Dies entspricht den Zielen der DAUB, den Tunnelbau durch innovative digitale Methoden weiterzuentwickeln und nachhaltig zu optimieren [5].

6.4. Ausblick

Der Blick in die Zukunft ist vielversprechend. Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten eine solide Grundlage für künftige Entwicklungen im Bereich der Baulogistik im maschinellen Tunnelbau. Durch die weitergehende Digitalisierung und Automatisierung der Prozesse lassen sich erhebliche Potenziale erschließen. Es gibt dabei mehrere zukunftsweisende Ansätze, die weiter ausgebaut werden sollten:

Ein wesentlicher Schritt zur Verbesserung der Projektsteuerung ist der digitale Abgleich des Terminplans mit der Simulation. Diese Integration ermöglicht eine kontinuierliche Echtzeitüberwachung des Baufortschritts, was dazu beiträgt, potenzielle Verzögerungen oder Engpässe frühzeitig zu erkennen und proaktiv gegenzusteuern. Eine direkte Verknüpfung zwischen Terminplanung und Simulation erlaubt es, Planabweichungen sofort zu identifizieren und die Bauprozesse präzise anzupassen.

Außerdem wäre es sinnvoll, die Dokumentation vor Ort mit SDS effizienter zu gestalten und ebenfalls mit der Simulation zu koppeln. Durch die Verknüpfung lassen sich die Daten der Dokumentationssoftware mit denen der Simulation ständig abgleichen. Folglich sind Abweichungen sofort zu erkennen und können dynamisch in der Simulation berücksichtigt werden. Eine Echtzeitdokumentation würde die Transparenz erhöhen, die Vorhersagekraft einer Simulation verbessern und somit die Abstimmung zwischen allen Projektbeteiligten erleichtern.

In Ergänzung dazu wäre eine Integration der Maschinendaten der TBM und Transportfahrzeuge denkbar. Ein zentraler Bestandteil der digitalen Optimierung ist die Einbindung von Echtzeit-Sensor- und Maschinendaten. Mit der Erstellung eines digitalen Schattens könnten die aktuellen Zustände abgebildet, überwacht werden und in der Simulationsumgebung integriert werden. Dies wäre von Bedeutung während der Ausführung.

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit könnte die Implementierung von Künstlicher Intelligenz darstellen. Der Einsatz könnte zur Analyse von historischen Echtzeitdaten bei einer proaktiven Planung weiterhelfen. Mit voraussehbaren Modellen ließen sich Probleme frühzeitig erkennen, was zu einer erheblich effizienteren Steuerung des Bauprozesses führen würde. KI-gestützte Simulationen könnten zudem dabei helfen, alternative Logistikstrategien zu entwickeln und unerwartete Herausforderungen im Bauablauf effektiver zu meistern. Diese Technologien bieten großes Potenzial, die Effizienz und Sicherheit im Tunnelbau nachhaltig zu steigern.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine verstärkte Integration digitaler Tools,

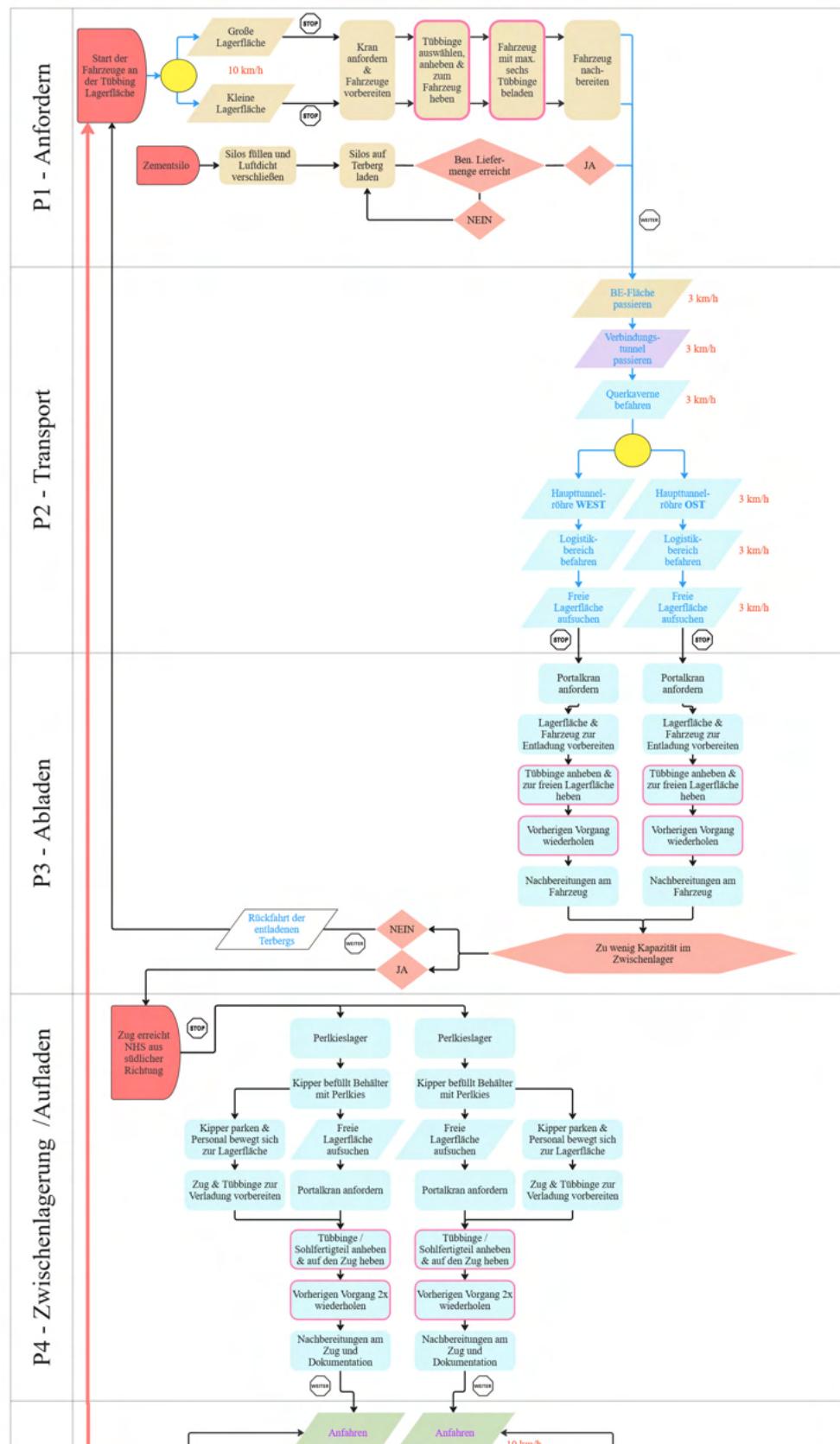
Echtzeitdaten und KI-gestützter Technologien zu einer Verbesserung der Effizienz und Transparenz im maschinellen Tunnelbau führen kann. Diese Entwicklungen sind entscheidend, um den Tunnelbau weiter zu modernisieren.

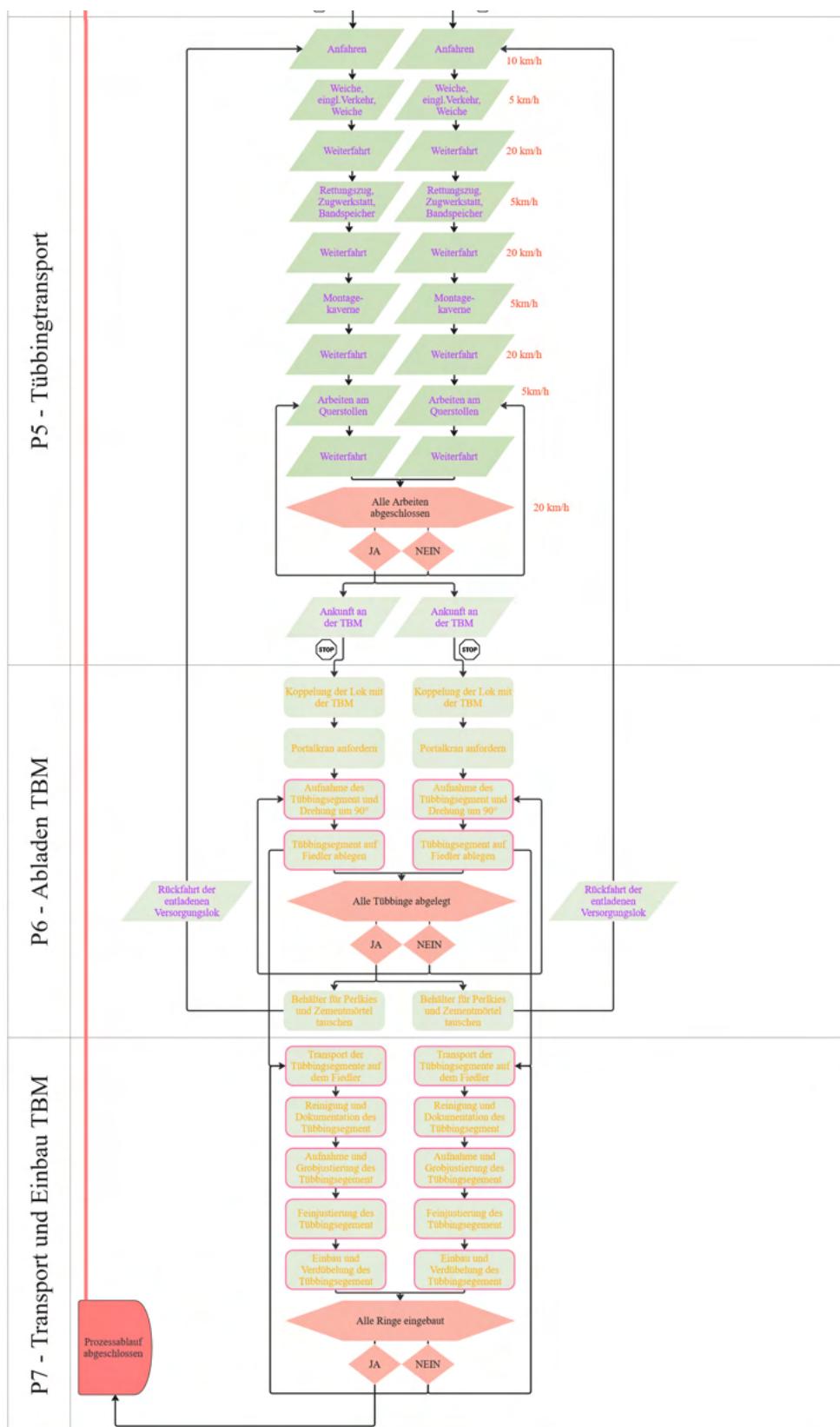
Literatur

- [1] Konrad Bergmeister. *Geomechanik und Tunnelbau.* vol.12, no.5, 2019. URL <https://doi.org/10.1002/geot.201900038>.
- [2] Markus; Koch Christian; Beetz Jakob Borrman, Andre; König. *Building Information Modelling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis.* Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 978-3-658-05605-6.
- [3] Ruben M.; Alberti Marcos G.; Ciccone Angelo; Asprone Domenico Cepa, Jorge Jeret; Pavon. *A Review on the Implementation of the BIM Methodology in the Operation Maintenance and Transport Infrastructure.* Applied Sciences, 2023. URL doi: 10.3390/app13053176.
- [4] The AnyLogic Company. Anylogic. URL <https://www.anylogic.com/>.
- [5] DAUB-Arbeitskreis. *BIM im Untertagebau.* Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V. (DAUB), 2019.
- [6] VMT Deutschland. *SDS - Modulates Produktions- und Logistik-Managementsystem.* VMT Deutschland, 2024.
- [7] Galleria di Base del Brennero Brenner Basistunnel BBT SE. *Brenner Basistunnel.* 2024. URL <https://www.bbt-se.com/>.
- [8] Flora; Salzgeber Hannah; Schneiderbauer Larissa Ernst, Melanie; Matthias. *From Digital Model to Digital Twin in tunnel Construction.* Universität Innsbruck, 2024. URL <https://doi.org/10.1002/cend.202400020>.
- [9] Dirk Fischer, Dipl.-Wi.-Ing. *interne Tunnellogistik/interneanl tunnel logistic.* Buchhadnung im Bauverlag, 2018. ISBN 978-3-033-05485-1.
- [10] Peter Franke, Jörg; Schuderer. *Simulation in Produktion und Logistik.* Chuvillier Verlag, 2021. ISBN 978-3-736-97479-1.
- [11] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV). *Digitales Planen, Bauen, Infrastrukturmangament.* BMDV, 2024.
- [12] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. *Taschenbuch für den Tunnelbau 2017: Kompendium der Tunnelbautechnologie Planungshilfe für den Tunnelbau.* Wilhelm Ernst Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH Co. KG, 2016. ISBN 978-3-433-03168-1.
- [13] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. *Taschenbuch für den Tunnelbau 2019: Kompendium der Tunnelbautechnologie Planungshilfe für den Tunnelbau.* Wilhelm Ernst Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH Co. KG, 2018. ISBN 978-3-433-03262-6.
- [14] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. *Taschenbuch für den Tunnelbau 2020: Kompendium der Tunnelbautechnologie Planungshilfe für den Tunnelbau.* Wilhelm Ernst Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH Co. KG, 2020. ISBN 978-3-433-03278-7.

- [15] Christinan; Bednar Thomas; Huymajer MArco; Wenighofer Robert; Paskaleva GAilna; Steiner Bernhard; Melnyk Oleksandr Galler, Robert; Hueemer. *Aktuelle Forschung im Bereich der Digitalisierung des konventionellen Tunnelbaus.* Berg Huettenmaenn Monatsh (Montashefte), 2023. URL <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-023-01409-5>.
- [16] Gerhard Girmscheid. *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau.* Ernst Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH Co. KG, 2008. ISBN 978-3-433-01852-1.
- [17] Ulrich Hettstück. *Simulation diskreter Prozesse.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-3470-9.
- [18] Christian Hofstadler. *Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht.* Springer, 2019.
- [19] Sven Kruse. *Komponentenbasierte Modellierung und Simulation lernfähiger Agenten.* Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg, 2014. URL <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/handle/ediss/5855>.
- [20] Tobias; Nagel Felix; Speier Ludger König, Markus; Rahm. *BIM-Anwendungen im Tunnelbau.* Ruhr-Universität Bochum, 2017. URL <https://doi.org/10.1002/bate.201700005>.
- [21] Christoph Laimer, Simon; Perathoner. *Mobilitäts- und Transportrecht in Europa.* Springer, 2022. ISBN 978-3-662-63634-3.
- [22] Ulrich; Wehrmeyer Gerhard Maidl Bernhard; Herrenknecht, Martin; Maidl. *Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb.* Ernst Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH Co. KG, 2011. ISBN 978-3-433-02948-0.
- [23] Wilfried; Rose Oliver; Weigert Gerald März, Lothar; Krug. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik.* Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011. ISBN 978-3-6421-4535-3.
- [24] Sven-Eric Scherer, Raimer J.; Schapke. *Informationssysteme im Bauwesen 2.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-6624-4759-8.
- [25] Adolf Schub. *Probleme der Taktplanung in der Bauproduktion.* Bauverlag GmbH, 1970.
- [26] Andre Willibald A. Günthner, Willibald A.; Borrman. *Digitale Baustelle - innovativer planen, effizienter Ausführen.* Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011. ISBN 978-3-642-16485-9.
- [27] A.M.; Omatayo T. Zulu, S.L.; Saad. *The Mediators of the Relationship between Digitalisation and Construction Productivity: A Systematic Literature Review.* Buildings, 2023. URL <https://doi.org/10.3390/buildings13040839>.

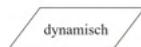
A. Flussdiagramm der Prozessabfolge





Legende:

Fortbewegung:



statisch

Agenten:



Spezialfahrzeug
Terberg



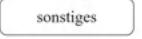
Versorgungszug



TBM



Tübbing



sonstiges

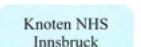
Örtlichkeit:



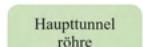
Lagerfläche



Zugangstunnel



Knoten NHS
Innsbruck



Haupttunnel
röhre

Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die vorliegende Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Magister-/Master-/Diplomarbeit/Dissertation eingereicht.

Innsbruck am 18.11.2024

Willibald

.....
Simone Willibald , B.Eng