




Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit



Tunnelinstandhaltung im Spannungsfeld
von Bahnbetrieb, Bauzeit und Kosten

Alexander Schimpl, BSc

September 2022



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 11.09.2022

Unterschrift Verfasser/in
Alexander Schimpl

Gender Erklärung

In dieser Masterarbeit wird aufgrund der besseren Lesbarkeit bewusst auf eine geschlechtsneutrale Formulierung verzichtet. Sämtliche männliche Schreibweisen beziehen sich dabei gleichermaßen auf alle Geschlechter.

*Diejenigen, die keine Fehler machen, machen den größten aller Fehler;
sie versuchen nichts Neues - Anthony de Mello.*

Danksagung

Ein großer Dank gilt dem Ingenieurbüro Firma Laabmayr & Partner ZT GmbH, insbesondere meinem Betreuer, dem Geschäftsführer Dipl.-Ing. Albert Helmberger. Er hat trotz seinem vollen Terminkalender immer Zeit gefunden mir mit Rat und Tat bei der Diplomarbeit zu helfen. Weiters möchte ich der Firma Laabmayr danken, für die zahlreichen Herausforderungen, mit denen ich mich fachlich als auch persönlich weiterentwickeln konnte.

Ebenso will ich mich bei meinem Betreuer auf universitärer Seite Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler bedanken, für die Chance zur Erstellung einer praxisnahen Arbeit. Darüber hinaus bedanke ich mich für die lehrreiche und herausfordernde Zeit bei allen Professoren und Angestellten der Montanuniversität Leoben.

Bei meinen Eltern möchte ich mich herzlichst bedanken, ohne ihre Unterstützung wäre das Studium an der Montanuniversität nicht möglich. Ein weiterer Dank gilt meiner Studienkollegin Berenice, welche mir mit ihren Ratschlägen zum wissenschaftlichen Arbeiten sehr geholfen hat. Anschließend möchte ich mich auch bei Veronica bedanken für ihre langjährige und vielseitige Unterstützung während des Studiums. Ohne sie hätte ich diese Diplomarbeit wahrscheinlich wesentlich später abgeschlossen. Zum Abschluss will ich mich bei meinen langjährigen Studienkollegen Markus, Philip, Alex und Michi bedanken.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Tunnelinstandhaltung von alten Eisenbahntunneln. Dazu zählen Mauerwerkstunnel, die mit der „Alten Österreichischen Tunnelbaumethode“ errichtet worden sind. Anwendbar sind die gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere alte Tunnelbauweisen, wie z.B. die Englische, die Belgische oder Deutsche Bauweise.

Zu Beginn der Arbeit wird auf den Bestand der ÖBB Tunnelbauwerke, vertieft auf alte Eisenbahntunnel, eingegangen. Anschließend wird der Stand der Technik an bautechnischen Maßnahmen, die betrieblichen Randbedingungen und die Kostenermittlung für die Tunnelinstandhaltung näher beleuchtet. Die betriebliche und rechtliche Seite, sowie die der Kostenermittlung legt den Fokus auf Österreich.

Um die gewonnenen Erkenntnisse anzuwenden, wird ein theoretisch im Jahre 1908 errichteter, 6250 Meter langer, zweigleisiger Modelltunnel entwickelt, welcher einem vorprojektähnlichen Planungsprozess unterzogen wird. Der Planungsprozess zielt darauf ab, die Entscheidungsabläufe und möglichen Optionen klar und nachvollziehbar aufzuzeigen, um für ähnliche Projekte als Hilfestellung dienen zu können. Der Prozess beinhaltet eine Variantenstudie, die Entwicklung diverser bautechnischer Maßnahmen (sog. Regelmaßnahmen), einen Bauzeit-/Bauablaufplan und eine Kostenermittlung.

In dem Planungsprozess ergibt sich die Notwendigkeit einer bereichsweisen Vollerneuerung des Modelltunnels mit einem Umbau von einem zweigleisigen auf einen eingleisigen Betrieb. Aufgrund des Ergebnisses der Variantenstudie werden zwei Varianten im Detail betrachtet, beide sind eine Kombination aus einer Teilsperre (ca. 3-monatige Bauzeit) und einer Vollsperre (ca. 6-monatige Bauzeit) des Tunnels.

Abstract

This thesis is focussed on the rehabilitation of old masonry railway tunnels that were built using the "Old Austrian Tunnelling Method" with extended application to period equivalent tunnel construction methodologies, such as the English, Belgian or German methods.

The thesis initially focusses on the existing ÖBB tunnels, in particular the old railway tunnels and progresses to state-of-the-art construction measures and best practice, operational boundary conditions and the cost determination for tunnel rehabilitation. The operational conditions, legislative aspects and the cost determination method used data, information, and legislation of Austria.

To apply the knowledge gained, a 6250-metre-long, twin-track model tunnel built in 1908 was defined as a basis for the study. The model tunnel is subjected to a planning process similar to a preliminary project. Furthermore, the planning process illustrates the decision-making path and possible alternative options to serve as a support for similar projects. This process includes a variant study, the development of various construction designs, a construction schedule and a project cost estimation.

In the planning process the need for a full renewal in sections of the model tunnel is identified with a conversion from double-track to single-track operation. Based on the results of the variant study, two variants are considered in detail, both of which are a combination of a partial closure (approx. 3-month construction period) and a full closure (approx. 6-month construction period) of the tunnel.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	1
1.3	Begriffsdefinitionen.....	2
2	Ausgangssituation: Tunnelbauwerke der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB)	3
2.1	Entwicklung von Eisenbahntunneln in Österreich	3
2.2	Bestand alter Eisenbahntunnel	3
2.3	Zustand und Investitionsbedarf	5
3	Technische Maßnahmen für die Instandhaltung.....	7
3.1	Allgemein	7
3.1.1	Tragfähigkeit gemauerter Tunnel.....	7
3.2	Mauerwerksabtrag und Aufweitungen	8
3.2.1	Profilsäge.....	8
3.2.2	Fräsköpfe	9
3.2.3	TiT (Tunnel-im-Tunnel).....	9
3.3	Gewölbeinstandhaltung	10
3.3.1	Neuverfugung Mauerwerk.....	10
3.3.2	Spritzbetonschalen.....	10
3.3.3	Stahlfaserspritzbeton	11
3.3.4	Tübbingausbau	12
3.3.5	Tunnelaufweitungssystem (TAS).....	12
3.3.6	Innenschalen	13
3.3.7	Injektionen.....	13
3.3.8	Höchstdruckwasserstrahl-Verfahren (HDW-Verfahren).....	14
3.4	Entwässerungs- und Abdichtungslösungen.....	14
3.4.1	Optimierung des Bestandes	14
3.4.2	Mittelentwässerungen.....	15
3.4.3	Halbschalenentwässerungen, Noppenfolien.....	15
3.4.4	Abdichtung mit einer KDB	16
3.4.5	Spritzabdichtungen.....	16
3.5	Instandhaltung der Sohle und Sohlaussteifung.....	17
3.6	Oberbau/Feste Fahrbahn.....	18
4	Spannungsfeld Betrieb und Tunnelinstandhaltung.....	19
4.1	Netzplanung.....	19
4.2	Sperrarten und die Auswirkungen	19
4.2.1	Totalsperre (Vollsperrre, Streckensperre, Gesamtsperre).....	20
4.2.2	Teilsperre: Änderung des Betriebsablaufs (Gleissperre).....	20
4.2.3	Teilsperre: Stundensperren (Tages- und Nachtsperren, Zugpause).....	21

4.2.4	Auswirkungen von Sperren	21
4.2.5	Vorlaufzeit von Sperren	21
4.3	Rechtliche Aspekte und Arbeitssicherheit.....	22
4.3.1	Allgemein	22
4.3.2	Sicherungsmaßnahmen.....	23
4.4	Maßnahmentechnische Einschränkung	25
5	Kostenermittlung	26
5.1	Einführung.....	26
5.2	Kostenbestandteile.....	26
5.2.1	Basiskosten.....	27
5.2.2	Wertanpassung und Gleitung	27
5.2.3	Risiken.....	27
5.2.4	Vorausvalorisierung	28
6	Modelltunnel	29
6.1	Technische Daten und Randbedingungen des Modelltunnels.....	29
6.2	Geologie	31
6.3	Schäden	32
6.3.1	Allgemein	32
6.3.2	Schadensbilder und Wasserzutritte.....	32
6.3.3	Portalbereiche	33
6.3.4	Kataklastische Störungszone	33
6.3.5	Serizitphyllit	34
6.3.6	Standfester Fels (Paragneis) im Tunnel.....	34
6.3.7	Schotteroberbau.....	34
6.4	Projektziele.....	36
6.4.1	Allgemein	36
6.4.2	Vorgabe-Lichtraumprofil	37
6.5	Variantenstudie.....	38
6.5.1	Allgemein	38
6.5.2	Ausführungen zu den Varianten.....	38
6.5.3	Festlegung und Entscheidungsfindung.....	43
6.6	Technischen Maßnahmen.....	44
6.6.1	Allgemein	44
6.6.2	Regelmaßnahme 1 und 2 (RM1, RM2) Erneuerungskonzept im Bereich der Kriechhänge 44	
6.6.3	Regelmaßnahme 3 (RM3) Erneuerungskonzept im Bereich der kataklastischen Störungszone	47
6.6.4	Regelmaßnahme 4 (RM4) Erneuerungskonzept im Bereich der quellenden Serizitphyllite	49
6.6.5	Regelmaßnahme 5 und 6 (RM5, RM6) Erneuerungskonzept im Bereich der wasserführenden Klüfte.....	51

6.6.6	Regelmaßnahme 7 (RM7) Erneuerungskonzept in Bereichen mit vereinzelt Wasserzutritten	53
6.6.7	Planung Oberbau (Gleisbett, Mittelentwässerung, Verkabelungslösung).....	54
6.6.8	Tunnelausrüstung	56
6.6.9	Überblick Maßnahmen	57
6.7	Bauzeit.....	59
6.7.1	Betriebliches und bauliches Konzept	59
6.7.2	Systematik Bauzeit	60
6.7.3	Ergebnisse Bauzeit	62
6.8	Kostenermittlung.....	64
6.8.1	Systematik Kostenermittlung	64
6.8.2	Ergebnisse Kostenermittlung.....	67
6.9	Life Cycle Costs (LCC).....	69
7	Schlussfolgerungen	71
8	Verzeichnisse.....	72
8.1	Abbildungsverzeichnis	72
8.2	Tabellenverzeichnis	74
8.3	Literaturverzeichnis	75
9	Anhang Bestand Modelltunnel	77
9.1	Anhang Druckprofile Bestand.....	77
9.2	Anhang Bauzeit-/Bauablaufplan Variante 6A: Vorgezogene Maßnahmen-Teilsperre	80
9.3	Anhang Bauzeit-/Bauablaufplan Variante 6A: Hauptbaumaßnahmen-Vollsperr.....	81
9.4	Anhang Bauzeit-/Bauablaufplan Variante 6B: Vorgezogene Maßnahmen-Teilsperre	82
9.5	Anhang Bauzeit-/Bauablaufplan Variante 6B: Hauptbaumaßnahmen-Vollsperr.....	83
9.6	Gesamtkosten Variante 6A.....	84
9.7	Gesamtkosten Variante 6B.....	85
9.8	Anhang Schadensbilder und Verteilung Modelltunnel	86

Abkürzungsverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
AWS	Automatic Warning System
DB	Deutsche Bahn
ECB	Ethylencopolymerisat
ETCS	European Train Control System
HDW	Höchstdruckwasserstrahlen
IBO-Anker	Injektionsbohranker
IE	Infrastrukturentwicklung
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
LCC	Life Cycle Costs
lfm	Laufmeter
LG	Leistungsgruppe
LPR1	Lichttraumprofil eins
NATM	New Austrian Tunnelling Method
NEP	Netzentwicklungsplan
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
RM	Regelmaßnahmen
SAS	Signalabhängige Arbeitsstellensicherungsanlage
SCWS	Signal Controlled Warning Systems
SEP	Streckenentwicklungsplan
SN-Anker	Füllmörtelanker
TAS	Tunnelaufweitungssystem
TiT	Tunnel im Tunnel
TM	Tunnelmeter
TVM	Tunnelvortriebsmaschine
WDI	wasserundurchlässige Innenschale
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
ÖGG	Österreichische Gesellschaft für Geomechanik

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Themen Instandhaltung, Instandsetzung und Erneuerung von Eisenbahninfrastruktur, sind aktueller denn je. Der Wandel unserer Gesellschaft hin zu einer CO₂-neutralen und umweltfreundlichen Gesellschaft ist ein erklärtes politisches Ziel. Umso wichtiger ist es, abseits von Neubauprojekten, verstärkt in die bestehende Bahninfrastruktur zu investieren, diese zu verbessern und leistungsfähig für die Anforderungen der Zukunft zu machen (erhöhte Taktung, kürzere Fahrzeiten, bessere Energieeffizienz, lange Lebensdauer, etc.).

Der Großteil des Wissens für die Planung solcher Projekte ist bei den großen Auftraggebern und Ingenieurbüros gebunden und für Außenstehende schwer zugänglich. Mit dieser Arbeit möchte ich der Allgemeinheit ermöglichen, einen Zugang zu den Vorgangsweisen der Planung und Abwägung bei Entscheidungen für große Instandhaltungsprojekte zu bekommen.

Ich selbst hatte bereits die Möglichkeit in diesem Bereich, sowohl auf der planenden als auch auf der ausführenden Seite als Bauaufsicht neben meinem Studium tätig zu sein und habe hier meine persönliche Faszination für diese Thematik entdeckt. Somit kam es zu dem Entschluss diesem Bereich meine Masterarbeit zu widmen.

1.2 Zielsetzung

Diese Arbeit bezieht sich auf die Instandhaltung von alten Eisenbahn-Mauerwerkstunneln, d.h. Tunneln, welche mit der „Alten Österreichischen Tunnelbaumethode“ errichtet worden sind. Anwendbar sind diese Aspekte auch auf andere alte Tunnelbauweisen wie z.B. die Englische, die Belgische oder Deutsche Bauweise.

Um das Thema verständlich und greifbar zu machen, wird am Anfang mit gängiger Literatur auf das Spannungsfeld Bahnbetrieb, Bauzeit und Kosten eingegangen. Dazu gehört ein Überblick über den Bestand von Eisenbahntunneln in Österreich, ein Auszug über den Stand der Technik bei Instandhaltungsmaßnahmen, sowie eine Übersicht über deren betriebliche Aspekte. Weiters folgt eine Zusammenfassung über die Kostenermittlung bei diesen Projekten.

Zur praktischen Veranschaulichung, wird ein Modelltunnel gestaltet und nach mehreren Gesichtspunkten aufgebaut: geologischer Längsschnitt, Ausbautypen (Druckprofile), Lichtraumprofil, Schadenstypen unter Miteinbeziehung diverser Datensätze. Dieser wird in weitere Folge einem Planungsprozess für eine Instandsetzung bzw. Erneuerung unterzogen. Die Planungstiefe entspricht in etwa einem für derartige Infrastrukturprojekte üblichen Vorprojekt. Es ist das erklärte Ziel dieser Arbeit, als Gedankenanstoß für ähnliche, zukünftige Projekte zu dienen. Daher werden Entscheidungsprozesse so klar wie möglich veranschaulicht, um mehrere Optionen für technische Maßnahmen, Baukonzepte, Bauzeit und Kosten darzulegen. Diese Arbeit kann aber nicht einen Eins-zu-Eins übertragbaren Leitfaden für andere Projekte abbilden, da jedes Projekt ein individueller Prototyp ist, welcher separat betrachtet werden muss.

1.3 Begriffsdefinitionen

Instandhaltung: Nach ÖNORM 13306 [34] ist die Instandhaltung die „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen, sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objektes, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung seines funktionsfähigen Zustands dient, sodass die geforderte Funktion erfüllt werden kann“. Der Begriff Instandhaltung wird derzeit noch nicht einheitlich verwendet, teilweise beinhaltet der Begriff die Instandsetzung und Erneuerung, teilweise schließt er die Erneuerung nicht mit ein [7; 39; 44–46]. Für eine konsistente Begriffsdefinition in dieser Arbeit beinhaltet der Überbegriff Instandhaltung sowohl die Instandsetzung als auch die Erneuerung (Abbildung 1) [7].

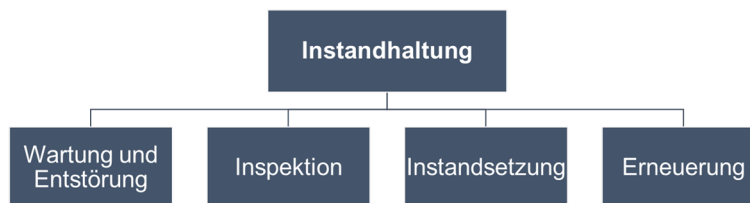


Abbildung 1: Einteilung der Instandhaltung gemäß DIN 31051 [7]

Instandsetzung/Reparatur: Nach ÖNORM 13306 [34] ist die Instandsetzung „eine physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion eines fehlerhaften Objekts wiederherzustellen“. Die RVS 13.05.11 [39] führt den Begriff Instandsetzung genauer aus: „Bauliche Maßnahmen größeren Umfangs, bei welchen ein gealtertes Objekt in den ursprünglichen, funktionsfähigen Zustand (Sollzustand) zurückversetzt wird“. Erweitert wird der Begriff spezifisch auf Tunnelbauwerke nach dem STUVA Sachstandsbericht [43]: „Im Rahmen der Instandsetzung werden Schäden am Bestand behoben, sodass die Aufrechterhaltung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit, sowie der Verkehrs- und Betriebssicherheit für das bestehende Bauwerk erreicht wird“.

Erneuerung:

Teilerneuerung: Gemäß dem STUVA Sachstandsbericht 2021 [43] ist eine Teilerneuerung sinnvoll, wenn mit Instandsetzungsmaßnahmen der funktionsfähige Sollzustand nicht mehr erfolgreich erreicht werden kann. Beispielhafte Maßnahmen für eine Teilerneuerung sind die Erneuerung von Mauerwerkszonen, Entwässerungen oder z.B. die Teilerneuerung von Spritzbetonschalen im Verbund.

Vollerneuerung: Gemäß dem STUVA Sachstandsbericht 2021 [43] ist die Vollerneuerung die Erneuerung des gesamten Tunnelbauwerkes. Ein wesentlicher Bestandteil ist der Einbau einer neuen Tunnelschale.

Neubau: Gemäß dem STUVA Sachstandsbericht 2021 [43] wird unter einem Neubau die Neuerrichtung einer Tunnelröhre verstanden, welche baulich vom Bestandsstunnel getrennt ist.

2 Ausgangssituation: Tunnelbauwerke der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB)

2.1 Entwicklung von Eisenbahntunneln in Österreich

Im Schienennetz der ÖBB befinden sich derzeit 251 Einzelbauwerke an Tunneln und tunnelähnlichen Bauwerken mit einer Gesamtlänge von 225km. In geschlossener Bauweise sind 174 Stück, in offener Bauweise bzw. Deckelbauweise 40 Stück und als Schutzbauwerke 37 Stück errichtet. Die gängigen Ausbaumaterialien in den Tunnelbauwerken der ÖBB sind im wesentlichen Ortbeton und Schalbeton (75%), Mauerwerk (23%) und auch Tunnel ohne Ausbau (2%; Abbildung 2) [43].

Mit dem Beginn des Eisenbahnbaus in Österreich in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts stieg der Bedarf nach Tunnelbauwerken stetig an. Diese wurden hauptsächlich nach den Prinzipien der „Alten Österreichischen Tunnelbaumethode“ errichtet [50]. Der älteste noch in Betrieb befindliche Tunnel, aus dieser Anfangszeit, ist der Gumpoldskirchner Tunnel, welcher im Jahre 1841 errichtet wurde [29]. Zu Beginn wurde hauptsächlich Ziegelmauerwerk als Ausbau verwendet. Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen über die schnelle Alterung dieser Ausbaumaterialien im alpinen Klima, wurde auf andere Ausbaumaterialien umgestellt. So findet sich in den Bestandstunneln aus dieser Epoche meist ein Natursteinmauerwerk, untergeordnet auch Mauerwerk aus Stampfbetonsteinen oder Betonformsteinen. Das Mauerwerk wurde sowohl als Trockenmauerwerke (unvermörtelt) oder vermörtelt ausgeführt [43] [50]. Durch den systembedingt mangelhaften Gebirgskontakt und der Nachgiebigkeit des Ausbaues bei den alten Bauweisen, kamen zum Teil mächtige Gewölbbestärken zum Einsatz [50].

Im Jahr 1963 erfolgte der Durchschlag des Massenbergs Straßentunnels mit der damals erstmals in Österreich eingesetzten „New Austrian Tunneling Method“ (NATM) [36]. Durch den bahnbrechenden Erfolg der NATM wurden ab 1965 praktisch alle Verkehrstunnel (Straßentunnel) in Österreich mit dieser Tunnelbaumethode errichtet [50]. Hingegen wurden im Zeitraum zwischen 1965-1987 Eisenbahntunnel lediglich als Schutzbauwerke (z.B. Lawinentunnel, Steinschlagschutz), sowie in offener Bauweise, errichtet [29]. Daher kam die NATM bei Eisenbahntunneln in Österreich erst ab den 1990er Jahren zum Einsatz [50]. Die Eisenbahntunnel in NATM Bauweise sind zweischalig mit einer Spritzbetonaußenschale und einer Ortbetoninnenschale ausgebaut. Maschinelle Bauweisen mittels Tunnelvortriebsmaschinen wurden streckenweise beim Wienerwaldtunnel, Münsterer Tunnel, Terfener Tunnel und bei der Tunnelkette Perschling angewandt. Diese haben eine Tübbing-Außenschale und eine Betoninnenschale (Abbildung 2) [43]. Die zahlreichen Neubauprojekte wie der Brenner-Basistunnel, der Semmering-Basistunnel und der Koralmtunnel, etc. sind hier nicht berücksichtigt [29].

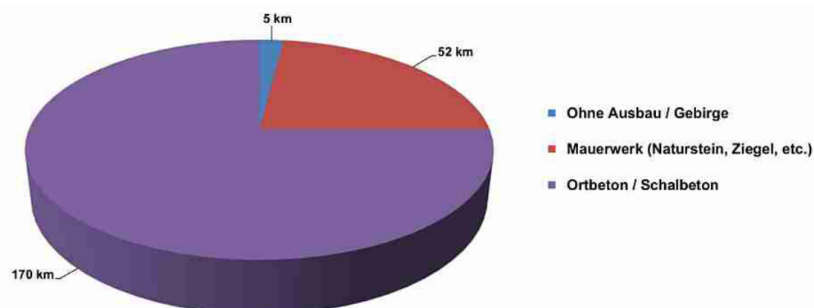


Abbildung 2: Auszug aus der Tunneldatenbank der ÖBB Stand 2020: Tunnelausbau [43].

2.2 Bestand alter Eisenbahntunnel

In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Instandhaltung von alten Eisenbahntunneln (Mauerwerkstunnel), welche mit der „Alten Österreichischen Tunnelbaumethode“ oder vergleichbaren Tunnelbaumethoden, wie der Englischen, der Deutschen oder der Belgischen Tunnelbaumethode, errichtet worden sind, gelegt. Diese Bestandsbauwerke der ÖBB werden hier im Detail beleuchtet.

Um die Relevanz des geplanten Projektes in dieser Arbeit hervorzuheben, wird der Modelltunnel (Kapitel 6.1) mit dem aktuellen Bestand (Tabelle 1) verglichen. Dieser besitzt eine Länge von 6250m und wurde im Jahr 1912 fertiggestellt (Tabelle 2). Vergleichbare Bauwerke in Österreich sind 13

Tunnelbauwerke in geschlossener Bauweise, welche eine Länge von mehr als einem Kilometer aufweisen und vor 1965 errichtet wurden (Tabelle 1) [29]. Der längste Tunnel, welcher gemäß den Prinzipien der „Alten Österreichischen Tunnelbaumethode“ errichtet worden ist, ist der Arlbergtunnel mit einer Länge von 10.65km, gefolgt vom Tauerntunnel mit einer Länge von 8.37 km und dem Karawankentunnel mit einer Länge von 7.98 km. Im alpinen Bereich, hauptsächlich in Deutschland und der Schweiz, gibt es auch zahlreiche vergleichbare Tunnelbauwerke. Einerseits wurden diese Tunnelbauwerke schon einer Erneuerung oder umfangreichen Instandsetzung unterzogen, andererseits besteht weiterhin noch ein hoher Bedarf daran [43; 46]. Eine der größten Kostentreiber bei alten Tunnelbauwerken ist die Instandhaltung des Gewölbes alter gemauerter Tunnel. Dies ist ein weiterer Faktor der die Aktualität dieser Arbeit unterstreicht [43].

Tunnelbauwerk	Baujahr	Tunnellänge [m]	Anzahl Gleise
Alter Semmering	1852	1 434	Eingleisig
Arlberg	1882	10 649	Mehrgleisig
Bosruck	1906	4 767	Eingleisig
Grosser Hartberg	1908	2 477	Eingleisig
Karawankentunnel	1904	7 975	Eingleisig
Langenberg	1959	1 443	Eingleisig
Martinswand II	1909	1 810	Eingleisig
Molterobel	1912	1 643	Eingleisig
Neuer Semmering	1950	1 512	Eingleisig
Sonnstein	1874	1 428	Eingleisig
Tauerntunnel	1907	8 371	Mehrgleisig
Wiesenhöf	1908	1 212	Eingleisig
Wildentöbel	1912	1 157	Eingleisig

Tabelle 1: Auflistung von Tunnelbauwerken der ÖBB, welche nach den Prinzipien der „Alten Österreichischen Tunnelbaumethode“ und vergleichbaren alten Bauweisen errichtet worden sind und eine Länge von mehr als einem Kilometer aufweisen [29].

Trotz einer steigenden Anzahl an Neubauten ist nach wie vor ein großer Anteil der Bauwerke, insgesamt 147 Stück mit einer Bauwerkslänge von 75.08km, über 100 Jahre alt (Abbildung 4). Nimmt man eine Gewichtung auf den derzeitigen in Betrieb befindlichen Tunnelbestand der ÖBB vor, ergibt dies einen Anteil von rund 59% bezogen auf die Anzahl und 33% bezogen auf die Tunnellänge. Unter den 147 Stück sind zwei Tunnel (1.4%) in offener Bauweise, sieben als Schutzbauwerke (4.8%) und 138 Stück (93.9%) als Tunnel in geschlossener Bauweise errichtet. Der überwiegende Teil dieser alten Tunnelbauwerke ist kürzer als 500m (117 Stück), lange Tunnelbauwerke verglichen mit heutigen Neubauprojekten sind die Ausnahme (Abbildung 3) [29].

In den nächsten Jahren wird sich dieses Verhältnis verschieben, aufgrund der zahlreichen Neubauprojekte (Brenner-Basistunnel, Semmering-Basistunnel, Koralmtunnel, etc.), die in Betrieb gehen werden [30; 43].

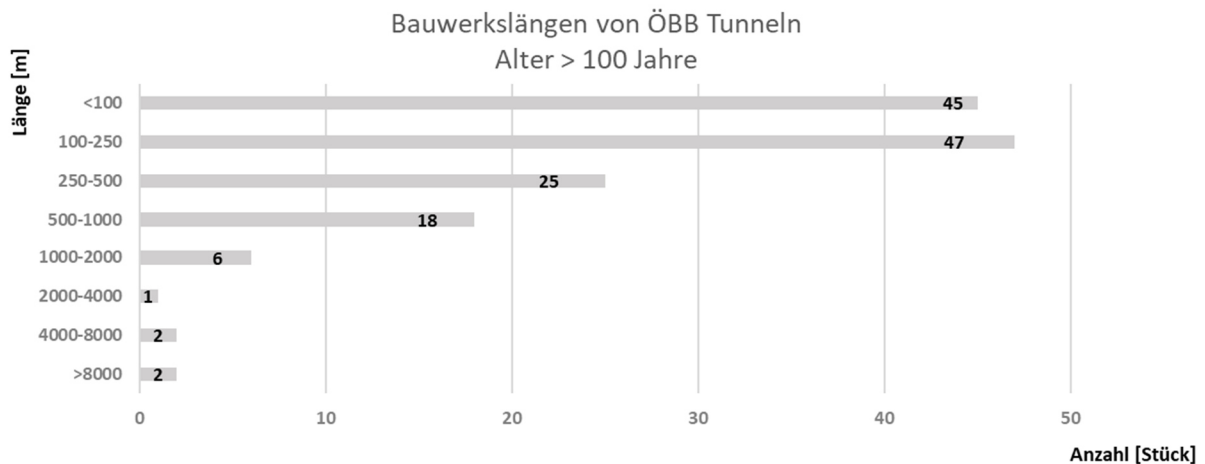


Abbildung 3: Bauwerkslängen von Tunnelbauwerken der ÖBB mit einem Bauwerksalter von mehr als 100 Jahren (vor 1922 errichtet). Stand 2022 [29].

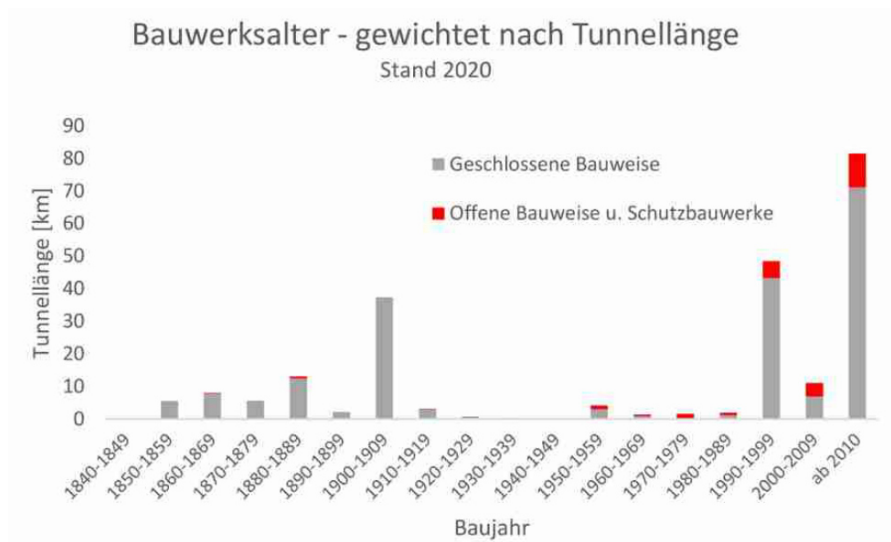


Abbildung 4: Auszug aus der Tunneldatenbank der ÖBB Stand 2020: Bauwerksalter gewichtet nach Tunnellänge [43].

2.3 Zustand und Investitionsbedarf

Nach dem Regelwerk der ÖBB 06.01.02: Konstruktiver Ingenieurbau [28], gibt es fünf Zustandsklassen nach denen der Bestand der Tunnelbauwerke beurteilt wird:

- **Klasse 1:** Sehr guter Erhaltungszustand und keine Einschränkungen.
- **Klasse 2:** Guter Erhaltungszustand und keinerlei Einschränkungen. Die Anlage weist kleinere Schäden auf, die längerfristig (>12 Jahre) eine Instandsetzung erfordern.
- **Klasse 3:** Schlechter Erhaltungszustand und keinerlei Einschränkungen. Die Anlage weist gröbere Schäden auf, die mittelfristig (5–12 Jahre) zu Einschränkungen und bzw. oder Substanzschädigungen führen.
- **Klasse 4:** Sehr schlechter Erhaltungszustand und keinerlei Einschränkungen. Die Anlage weist gröbere Substanzschädigungen auf, welche aus technischen und bzw. oder wirtschaftlichen Gründen nicht mehr behoben werden, oder die Anlage entspricht nicht mehr dem technischen Ausbaustandard der Strecke.
- **Klasse 5:** Sehr schlechter Erhaltungszustand und bereits Einschränkungen. Die Anlage weist gröbere Substanzschädigungen auf, die aus technischen und bzw. oder wirtschaftlichen Gründen nicht mehr behoben werden oder die Anlage entspricht nicht mehr dem technischen Ausbaustandard der Strecke. Eine Erneuerung der Strecke ist notwendig.



Abbildung 5: Auszug aus der Tunneldatenbank der ÖBB Stand 2020: Verteilung Zustandsklassen aller Tunnel [43].

Der Klassifizierung der Bestandstunnel wurde anhand des Zustandes der Tunnellaibungsfläche beurteilt (Abbildung 5). Zustandsklasse 4 ist ein Indikator dafür, dass für diese Tunnel in naher Zukunft eine Teil- oder Vollerneuerung absehbar ist, welche in einem signifikanten Ausmaß in Tunnelbauwerken der ÖBB vorkommt (Abbildung 5) [43].

In der Vergangenheit wurden Instandhaltungsarbeiten bei Tunnelbauwerken häufig nur lokal/bereichsweise durchgeführt, wodurch es zu einem heterogenen Zustand vieler Bestandsbauwerke gekommen ist. Bisher wurden nur wenige Vollerneuerungen umgesetzt, die meisten umgesetzten Projekte waren lediglich Umbauten von einem zweigleisigen auf einen eingleisigen Betrieb. Die nennenswertesten Projekte der letzten Jahre, bei denen eine Voll- bzw. Teilerneuerung durchgeführt wurde, sind der Kleine Dürreberg-, der Arlberg-, Karawanken- und der Bosrucktunnel [43].

Aus der Kombination des hohen Alters von über 100 Jahren bei 59% (gewichtet nach der Gesamtanzahl) der Tunnelbauwerke, einem signifikanter Anteil der Zustandsklasse 3 und 4 (Abbildung 5) und den nur in geringem Ausmaß an bis dato durchgeführten Erneuerungen, lässt sich für die Zukunft ein hoher Investitionsbedarf für Bestandstunnel ableiten [29; 43].

3 Technische Maßnahmen für die Instandhaltung

3.1 Allgemein

Nachfolgend werden technische Maßnahmen für die Tunnelinstandhaltung im Eisenbahnbereich vorgestellt. Diese sollen einen Überblick über den Stand der Technik, speziell auf angewandte Lösungen und Methoden geben. Sie dürfen nicht nur isoliert betrachtet werden, da sie oftmals für Instandsetzungs- und Erneuerungsprojekte in Kombinationen für eine gesamtheitliche Lösung eingesetzt werden.

3.1.1 Tragfähigkeit gemauerter Tunnel

Wichtig ist es, die Tragfähigkeit des Bestandstunnels abschätzen zu können, bevor es zu einer Auswahl diverser Maßnahmen für die Erneuerung bzw. Instandsetzung kommt. Viele dieser Maßnahmen setzen während bestimmter Bauzustände (Abtrag des Mauerwerks im Gewölbe, Abtrag des Sohlgewölbes, etc.) die Tragfähigkeit des Bauwerkes herab. Für die Planung und Bauausführung ist eine Kenntnis darüber essenziell. Die Tragfähigkeit eines bestehenden Tunnelbauwerkes wird hauptsächlich vom Ausbau, den geologisch/geotechnischen Randbedingungen und den Wechselwirkungen zwischen Gebirge und Ausbau bestimmt (Abbildung 6) [43].

Maßgebend für die Stabilität des Gesamtsystems sind [43]:

- Geotechnische Verhältnisse
- Äußere Einwirkungen (Gebirgs- und Wasserdruck, Auflockerungen, etc.)
- Belastungsänderungen (neue Auflasten, Grundwasserhebung bzw. Senkung)
- Erdbebenaktivität

Die Tragfähigkeit des gemauerten Ausbaus ist abhängig von [43]:

- Geometrie
- Qualität des Ausbaues
- Ausbaudicke
- Ist ein Sohlgewölbe bzw. eine Sohlaustraffung vorhanden?
- Ausführungsqualität von nachträglichen Erneuerungen und Instandsetzungen
- Verbund zwischen den Ausbauschichten
- Qualität und Art der Hinterpackung
- Bettung der Ulme durch die Hinterpackung
- Gründung und Tiefe der Widerlager

Die Beurteilung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von bestehenden Tunnelbauwerken fällt grundsätzlich in den Gültigkeitsbereich der EN 1997 [43].

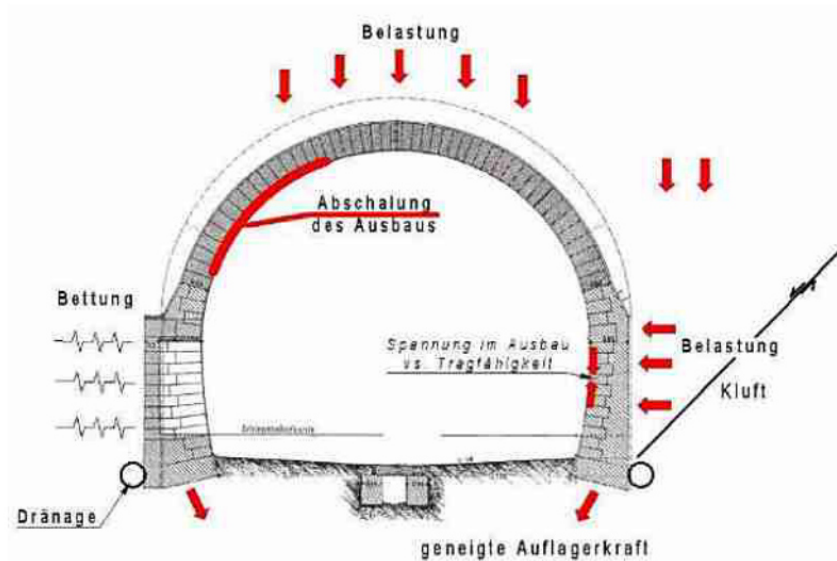


Abbildung 6: Maßgebende Einflussfaktoren zur Beurteilung der Tragfähigkeit eines gemauerten Tunnelausbaus [43].

Durch den häufigen Wechsel der Auszimmerungen bei den alten Tunnelbauweisen (z.B. „Alte Österreichische Tunnelbaumethode“), bildeten sich größere Auflockerungen, als dies bei modernen Tunnelbaumethoden, mit dem schnellen Einbau von Stützmitteln, stattfindet. Untersuchungen bei alten Tunnelbauwerken haben gezeigt, dass sich selbst in standfestem Fels, signifikante Auflockerungen gebildet haben [43].

3.2 Mauerwerksabtrag und Aufweitungen

Ein Abtrag bzw. Aufweitung von weniger als fünf Zentimetern, in unbewehrten Beton oder Mauerwerk, gilt als statisch unbedenklich. Tiefgreifendere Maßnahmen sind statisch zu untersuchen und gegebenenfalls Sicherungsmaßnahmen miteinzuplanen [44].

3.2.1 Profilsäge

Eine Möglichkeit zum Abtrag von Mauerwerk, Spritzbeton und Betonschalen ist der Einsatz einer Profilsäge (Sägeschnitte; Abbildung 7). Mehrere rotierende Sägeblätter sind auf einem hydraulischen Arm befestigt, welche je nach Maschinentyp und Konfiguration unterschiedliche Schnitttiefen und Stegbreiten erreichen. Anschließend werden die geschnittenen Mauerstege mittels Hydraulikhammer oder Teilschnittfräse abgetragen [41; 44].



Abbildung 7: a) Profilsäge während des Arbeitsvorgangs. b) Detaildarstellung Profilsäge [41].

3.2.2 Fräsköpfe

Eine weitere Möglichkeit für den flächenmäßigen Abtrag von Mauerwerk und Betonschalen stellt das Abfräsen mittels Fräskopf dar (Abbildung 8). Diese werden meist als Anbaufräse für einen Bagger, aber auch als separate Baumaschine angewandt [44]. Je nach geforderter Abtragtiefe kommen ein Längs- oder Querschneidkopf zum Einsatz. Ein weiteres Beispiel für die Nutzung von Fräsen ist die Herstellung von Schlitzten und Kabelkanälen. Weiters gibt es die Möglichkeit einer Anwendung von Flächenfräsen, diese haben den Vorteil, dass eine exakt einstellbare Solltiefe abgefräst werden kann [9; 20].



Abbildung 8: Anbaufräsen bei Profilierungsarbeiten [47].

3.2.3 TiT (Tunnel-im-Tunnel)

Eine bewegliche Stahleinhausung zum Schutz des Bahnbetriebsraumes, welche sich auf eigenen Schienen bewegt, bildet den funktionellen Kern der TiT (Abbildung 9). Außerhalb dieser Stahleinhausung finden die Aufweitungsarbeiten statt, ohne den Bahnverkehr zu beeinflussen. Die bergmännische, zyklische Vortriebsweise läuft meist in folgenden Arbeitsschritten ab: Lösen des Gewölbematerials, Sprengen und Sichern [49].

Die Tunnel-im-Tunnel Methode hat den Vorteil, dass der Bahnbetrieb weitgehend ungestört weiterlaufen kann. Lediglich in Zeiten der Baustelleneinrichtung und den vorbereitenden Maßnahmen muss eine zeitlich begrenzte Sperre des Betriebes erfolgen. Bei zweigleisigen Tunnelröhren muss auf einen eingleisigen Betrieb umgerüstet werden, bevor mit der TiT-Methode begonnen werden kann [49].



Abbildung 9: TiT-Anlage (Herrenknecht AG) [46]

Die TiT-Methode ist für Tunnelaufweitungen unter Betrieb sehr gut geeignet und bei der Deutschen Bahn (DB) in zahlreichen Projekten bereits erprobt [49], jedoch hat das System auch Anwendungsbeschränkungen. Bei Tunnel unterhalb des Grundwasserspiegels und bei Sohlgewölben, welche erneuert werden müssen, kann diese Methode nicht eingesetzt werden (Abbildung 10) [46].

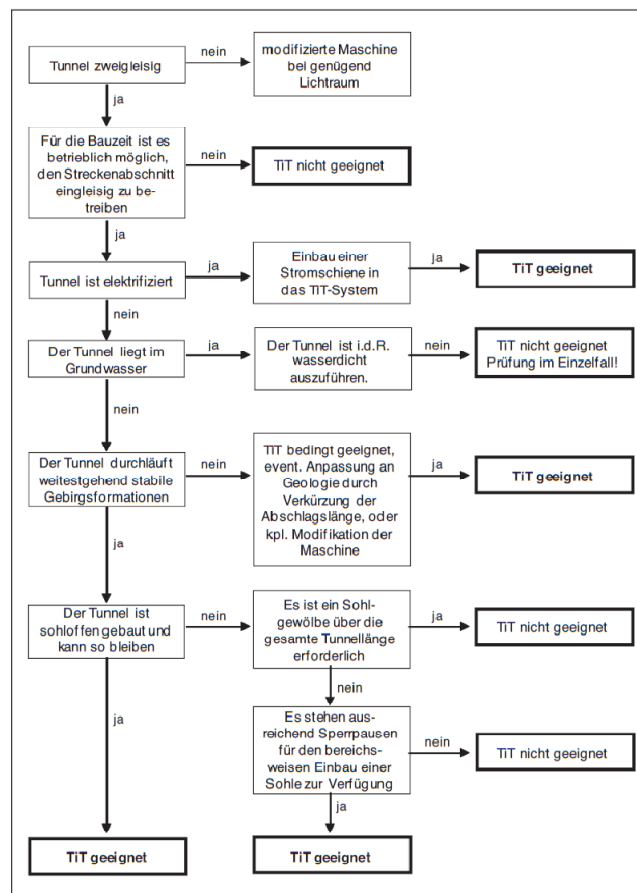


Abbildung 10: Entscheidungsbaum für die Anwendung der TiT-Methode [46].

3.3 Gewölbeinstandhaltung

3.3.1 Neuverfugung Mauerwerk

Um die Tragfähigkeit des Mauerwerks zu gewährleisten, ist bei großflächigen und linienhaften Ausbrüchen eine Neuverfugung erforderlich. Die Neuverfugung kann in kleinen Bereichen in Handarbeit oder in großen Bereichen maschinell erfolgen. Für die Neuverfugung des Mauerwerks müssen die Fugen ausgekratzt werden. Bei einem Ziegelmauerwerk beträgt die Tiefe ca. 3cm, bei einem Natursteinmauerwerk muss die Tiefe projektspezifisch abgestimmt werden [44].

Eine große Aufmerksamkeit gilt der Rezeptur des Fugenmörtels. Die Mischung darf weder zu weich (Sandungsneigung) noch zu hart sein (Rissbildungs- und Abplatzungsgefahr) und die Wasseraufnahmefähigkeit muss begrenzt bleiben. Eine Pauschalisierung der Mörtelrezeptur kann nicht getroffen werden, diese muss immer projektspezifisch abgestimmt werden. Es ist jedoch festzuhalten, dass reiner Zementmörtel ungeeignet ist und auf Kalkzementmörtel oder Trassmörtel gesetzt werden sollte [44].

3.3.2 Spritzbetonschalen

Es wird prinzipiell zwischen einer statisch wirksamen Spritzbetonschale und einer statisch nicht wirksamen Spritzbetonschale (Spritzbetonversiegelung) unterschieden. Die statisch wirksame Spritzbetonschale wird bei Standsicherheitsproblemen angewandt, während die Spritzbetonversiegelung bei Phänomenen wie Abschaltungen, Ausbrüchen und Ablösungen der Oberfläche des Ausbaus zum Einsatz kommt. Um eine Ablösung von Spritzbetonschalen zu vermeiden, ist eine erhöhte Verbundwirkung zwischen Spritzbeton und Ausbau zu schaffen. In der Praxis wird dies durch eine Verdübelung erreicht [44].

Essenziell bei Applikation einer neuen Spritzbetonschale ist, dass eine ausreichende Profilmfreiheit im Tunnel gegeben ist. Es darf zu keiner Einschränkung des Lichtraumprofils aufgrund der neuen Maßnahme kommen. Ist die Profilmfreiheit nicht gegeben, muss mit einer geeigneten Methode (Sägeschnitte, Fräsen, etc.) der Querschnitt nachprofiliert bzw. aufgeweitet werden [43; 46]. Zur Identifizierung potenzieller Unter- und Überprofile ist es nützlich flächendeckende Tunnel-scans durchzuführen, um einen Soll-Ist Abgleich für die Profilmfreiheiten zu erhalten [44].

Bei dem Einbau einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) muss eine statisch wirksame Spritzbetonschale zum Einsatz kommen, um bei Entfestigung des bestehenden Ausbaus die statische Gewölbesicherung übernehmen zu können. Des Weiteren ist bei elektrifizierten Bahnstrecken die Mattenbewehrung zu erden [44].

Kombiniert mit einer Spritzbetonschale kann eine Rippenbauweise verwendet werden. Dies ist bei Mauerwerksgewölben von Vorteil, welche eine bereits stark herabgesetzte Tragfähigkeit aufweisen. Zusätzlich zur Spritzbetonschale werden pfeilerartige Betonrippen mit Gitterbögen als tragende Elemente eingesetzt. In Abständen von ca. 2.5-2.0m sind senkrechte Schlitze mit Abmessungen von ca. 50x30cm aus dem Mauerwerk auszubrechen (Abbildung 11), dies geschieht z.B. mittels Profilsäge oder Fräsköpfen. In den ausgebrochenen Schlitzen werden Gitterträger montiert, anschließend rückverankert und mit Spritzbeton ausgefüllt [44; 46].

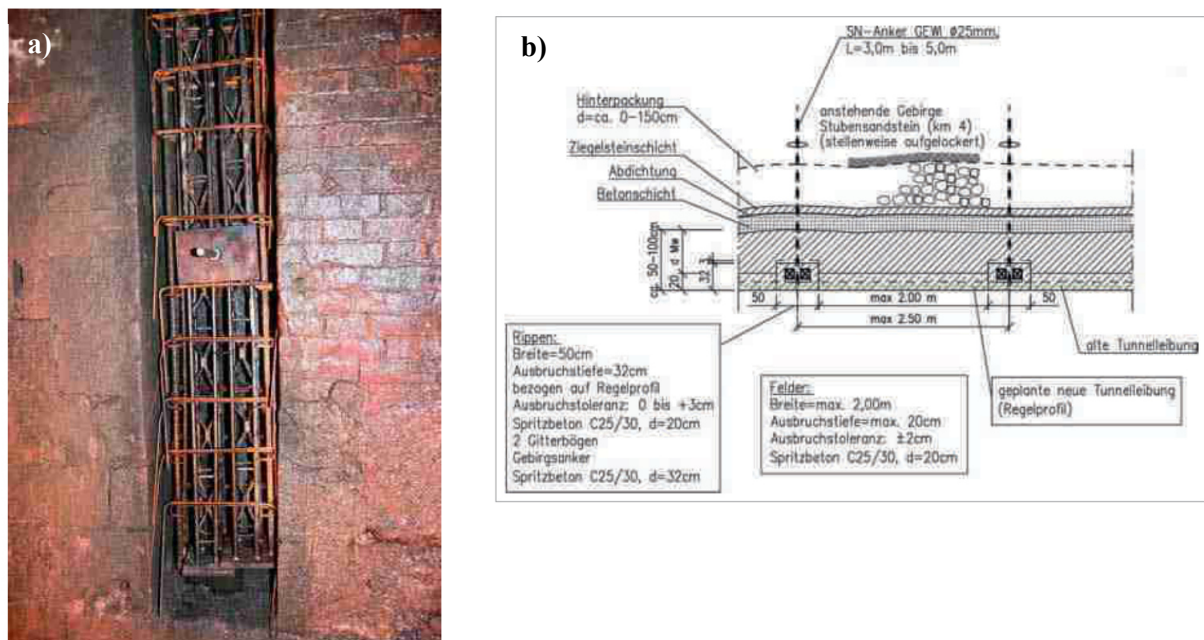


Abbildung 11: a) Rippe mit Bewehrung und Rückverankerung [46] b) Anwendungsbeispiel einer Rippenbauweise in bestehender Ziegelinenschale [44].

3.3.3 Stahlfaserspritzbeton

In der Tunnelinstandhaltung kommen aufgrund zahlreicher Vorteile gegenüber herkömmlichen Spritzbetonschalen gezielt Stahlfaserspritzbetonschalen zur Anwendung. Zu den Vorteilen gehören eine feingliedrige, dreidimensionale Bewehrungsstruktur, welche ein hohes Maß an mechanischer Widerstandsfähigkeit gewährleistet. Außerdem wird durch Stahlfasern ein sprödes Versagen der Spritzbetonschale verhindert, da Stahlfasern weiterhin Kräfte über die Risse hinweg übertragen können. Weitere Vorteile sind eine erhöhte Frühfestigkeit, eine Verringerung von Frühschwindrissen und eine bessere Homogenität aufgrund der Vermeidung von Spritzschatten. Der konstruktive Hauptvorteil von Stahlfaserspritzbetonschalen ist der Ersatz oder Ergänzung der Bewehrung, welcher besonders bei dünnen Spritzbetonschalen von Vorteil sein kann (Abbildung 11) [43; 44].

Ein Anwendungsbeispiel ist der Talberg und Kalmut Tunnel, hier kam eine Stahlfaserspritzbetonschale in der Tunnelinstandhaltung zur Anwendung [43].

3.3.4 Tübbingausbau

Ein Tübbingausbau in der Tunnelinstandhaltung ist bereits von der Rhätischen Bahn durchgeführt worden. Hierfür wurde ein Konzept mit Fertigteilen entwickelt, welche in Sperrpausen eingebaut werden. Im Gegensatz zu Tunnelvortriebsmaschinen (TVMs) kann bei dieser Methode kein Ringschluss angewandt werden. Vorteilhaft dabei ist die Tatsache, dass die Normalkräfte im Ringsystem verbleiben. Am Beispiel des Gletscherastunnels wurde der Querschnitt in fünf Fertigteilsegmente (Abbildung 12b) mit einer Länge von 1.5m und 30cm Wandstärke unterteilt. Die Tübbinge hatten keine vormontierten Dichtprofile, sondern eine Ringdichtung, welche zwischen den Ringen eingebaut wurde (Abbildung 12a). Dies hat den Vorteil, dass es beim Transport der Fertigteile zu keinen Beschädigungen der Dichtungen kommen kann.[43] [12].

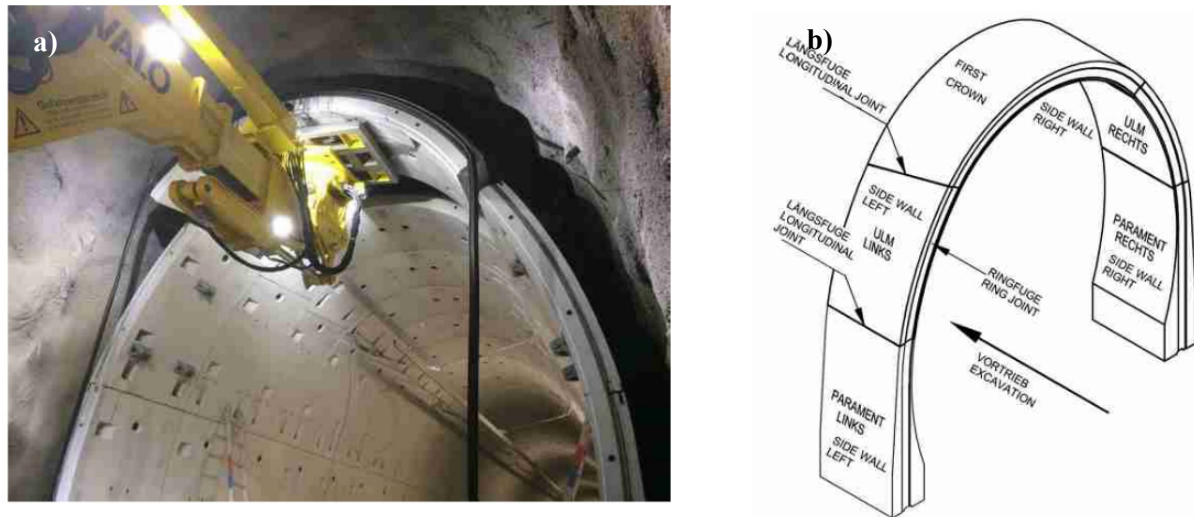


Abbildung 12: a) Einbau des Firststeines mit Ringdichtung [43]. b) Aufbau der Betonfertigteile. Plangrundlagen Normalbauweise-Amberg Engineering [12].

3.3.5 Tunnelaufweitungssystem (TAS)

Die Firma Herrenknecht hat ein Konzept entwickelt, welches die Aufweitung und den finalen Ausbau (mittels Tübbing) in einem kontinuierlichen Arbeitsgang ermöglicht (Abbildung 13). Die Grundidee hinter dem Konzept ist, die bisher vorhandenen TiT-Methode zu einer TVM aufzurüsten. Das Gesamtsystem ist in drei wesentliche Funktionseinheiten aufgeteilt: Vorläufer, Geräteträger (für die Aufweitung und Sicherung) und Tübbingversetzwagen [43; 46].

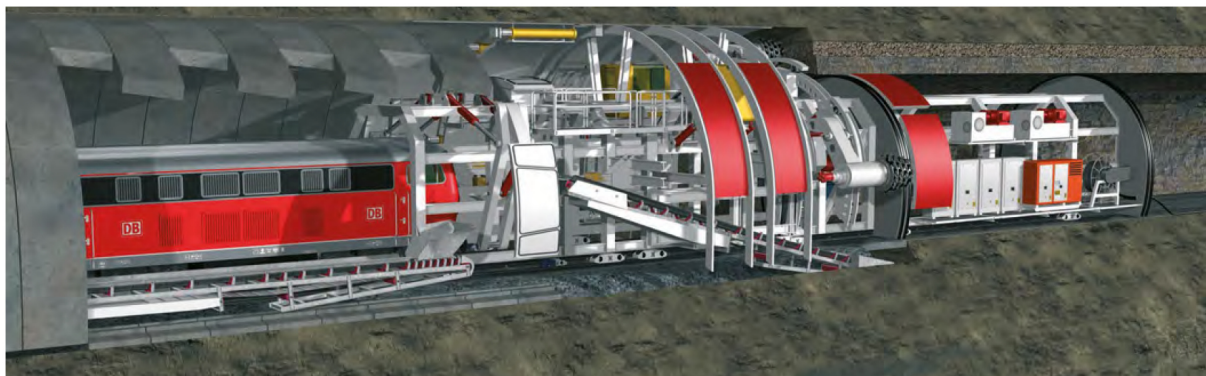


Abbildung 13: TAS von Herrenknecht [43].

Der vorderste Bereich des TAS, der Vorläufer, erfüllt zwei wesentliche Funktionen, die Stützung des vorhandenen Gewölbes und die Aufnahme der Versorgungseinheiten. Die Stützung erfolgt mittels beweglicher Stützplatten und verhindert einen Nachbruch während des Aufweitungsvorganges am Geräteträger. Die Versorgungseinheiten sind vergleichbar mit jenen auf dem Nachläufer einer TVM (Hydraulik, Pneumatik, Elektrik, Ventilation, etc.) [43].

Der Geräteträger, der den mittleren Teil im Aufbau des TAS bildet, übernimmt den Ausbruch, die Temporärsicherung und den Materialtransport. Die Bestückung der Abbauarme des TAS kann je nach geologischer Gegebenheit und Gewölbebeschaffung ausgewählt werden (Fräsen, Schlaghämmer, Sägen oder Bohrgeräte). Nach dem Ausbruch fällt der Abraum an der Überkopfsicherung des Geräteträgers seitlich herunter, wo entweder durch Förderanlagen das Material abtransportiert wird oder mittels Radlader geschuttet wird. Nach abgeschlossener Aufweitung drückt sich das TAS an den bereits vorhandenen Tübbingringen mittels Vortriebzylindern zum nächsten Hub [43].

Der hinterste Teil des TAS ist der Tübbingversetzwagen. Dieser besitzt drei teleskopierbare Versetzeinrichtungen für den Einbau der Tübbinge. Während des Aufweitungsvorganges fährt der Tübbingversetzwagen als Transporteinrichtung aus dem Tunnel und wird mit den Ausbaumaterialien beladen. Nach dem Beladevorgang fährt der Versetzwagen wieder in den Tunnel zurück und koppelt sich für die hydraulische und pneumatische Versorgung an das TAS an. Während des Einbauprozesses der Tübbinge ist der Aufweitungsprozess unterbrochen, erst bei Fertigstellung des Ringes kann dieser fortgesetzt werden [43].

Das Konzept des TAS wurde noch nicht in der Praxis eingesetzt, jedoch lassen sich anhand der Modellsimulationen Vortriebsleistungen von 5-10 m/Tag erreichen. Damit stellt das TAS eine zukünftige Möglichkeit dar, speziell für die Aufweitung besonders langer Tunnelbauwerke, die mit einer TiT-Methode zu unwirtschaftlich langen Bauzeiten führen würde [43].

3.3.6 Innenschalen

Kommt es zu einer großflächigen Entfestigung des Gewölbes, kann als langfristig nachhaltige Lösung der Einbau einer statisch wirksamen, bewehrten Innenschale angedacht werden (Abbildung 14). Eine Abdichtung kann, sowohl durch eine KDB oder eine wasserundurchlässige Innenschale (WDI) erreicht werden. Ebenso wie bei Spritzbetonschalen muss eine entsprechende Profilmfreiheit gegeben sein, andernfalls ist eine Ausweitung des Querschnitts erforderlich [43; 46].

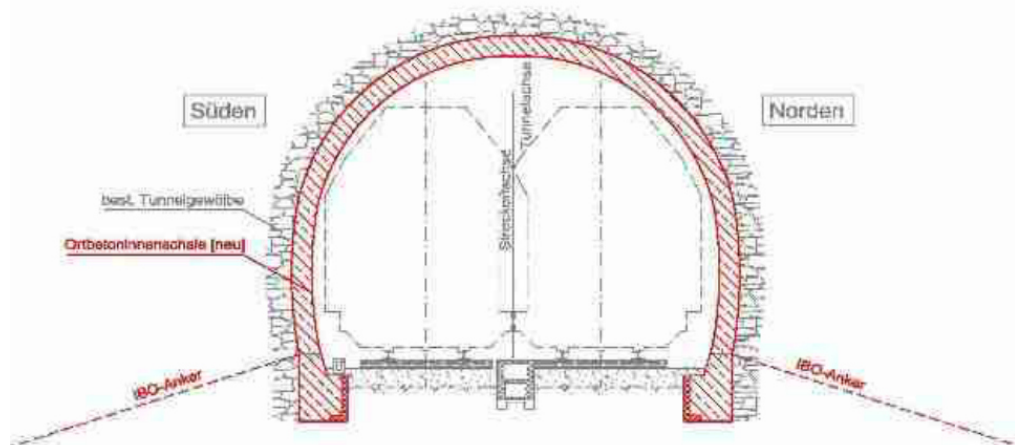


Abbildung 14: Beispiel für einen Ersatzneubau einer Innenschale in einem Bestandstunnel [43].

3.3.7 Injektionen

In der Tunnelinstandhaltung werden zur Verbesserung bzw. Vergütung des Ausbaues, der Hinterpackung oder des Gebirges Injektionen eingesetzt [44].

Mit Injektionsmaßnahmen gehen zahlreiche Effekte einher [44]:

- Erhöhung der Gebirgsfestigkeit
- Verringerung von Wasserandrang des Gebirges
- Verbesserung der Tragfähigkeit des Mauerwerks bei offenen Fugen, Rissen und Hohlstellen
- Verbesserung der Wasserdurchlässigkeit des Ausbaus
- Erhöhung der Bettung des Tunnelausbaus
- Eventuelle Verringerung der Drainagewirkung der Hinterpackung

Eine Vergütung des Mauerwerks ist oft verknüpft mit einer Vergütung der Hinterpackung und umgekehrt. Eine wechselseitige Beeinflussung ist nicht zu vermeiden. Besonders ist darauf zu achten, dass es durch die Injektionsarbeiten nicht zu einer zu starken Auffüllung der Hohlräume in der Hinterpackung kommt und somit die Drainagewirkung stark reduziert wird. Des Weiteren sind während der Injektionsarbeiten das Entwässerungssystem zu überwachen und zu spülen, um eine Blockade dieser zu verhindern [44].

3.3.8 Höchstdruckwasserstrahl-Verfahren (HDW-Verfahren)

Das HDW-Verfahren wird in der Tunnelinstandhaltung breitflächig eingesetzt. Durch einen zielgerichteten Wasserstrahl mit bis zu 3000 bar können Spritzbeton oder Teilflächen von Innenschalen abgetragen werden (Abbildung 15). Dieser Prozess kann, sowohl maschinell (teilautomatisiert) als auch händisch ablaufen [38].

Als Anwendung bei gemauerten Eisenbahntunneln kommt dieses Verfahren hauptsächlich zum Abtrag von Spritzbeton und zur Reinigung des Gewölbes zur Anwendung [46].



Abbildung 15: Maschineller Abtrag einer Tunnelbeschichtung in einem Straßentunnel [43].

3.4 Entwässerungs- und Abdichtungslösungen

Funktionstüchtige Entwässerungsanlagen sind für die Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit und für die Betriebssicherheit von höchster Bedeutung. Schadhafte und nicht funktionsfähige Entwässerungen können zu einer Vielzahl an Schadensbildern führen [43].

Alte gemauerte Tunnel sind in der Praxis ausnahmslos druckwasserentlastet gebaut. Die Drainagewirkung erfolgt über die Hinterpackung des Mauerwerks. Auch für Tunnelinstandhaltungsmaßnahmen gilt es das druckwasserentlastete Konzept beizubehalten [46].

Bei einer defekten oder nicht vorhandenen Abdichtung, versinterten Halbschalenentwässerungen kann Bergwasser zu einer Eisbildung im Tunnel, zu einer dauerhaften Entfestigung des Bauwerks, zur Korrosion von Bauwerksteilen, etc. führen [44].

3.4.1 Optimierung des Bestandes

Versinterte Leitungen können gespült, wenn keine Spülung mehr möglich ist, ausgetauscht oder mit Linern instandgesetzt werden [44]. Bei Ulmendrainagen ist ein Austausch nur unter sehr hohen bautechnischen Aufwand möglich. Zum Teil müssen dafür Innenschale, Bankette und Abdichtungsebenen abgetragen werden [42].

In vielen alten Eisenbahntunneln der ÖBB wurde nachträglich ein Entwässerungssystem mit Polyvinylchlorid-Rohren (PVC-Rohren) eingebaut. Im Zuge der frühen Drainagereinigungs-Methoden, wurde vielfach auf ein mechanisches Reinigungssystem (Kettenschleuder, Vibrationsdüsen) gesetzt, welches zu Schäden in den spröden PVC-Rohren geführt hat. Hier können Liner als hinhaltende Maßnahme eingebaut werden, um die Funktion der Drainage aufrechtzuerhalten [43].

Vorbeugende Maßnahmen sind Härtestabilisatoren mit Tabletten oder in flüssiger Form, um eine Versinterung der Entwässerungsleitungen möglichst zu verhindern [44].

3.4.2 Mittelentwässerungen

Typisch für die alten gemauerten Eisenbahntunnel ist ein System mit einer Mittelentwässerung als Sammelleitung (Abbildung 16). Dies ist eine Sohlängsentwässerung, welche aus gemauertem Naturstein- bzw. Ziegelmauerwerk mit einer Leitung aus Tonrohren bzw. Steinzeug gebaut wurde. Durch Schäden an der Mittelentwässerung und einem damit verbundenen Aufstau an Wasser im Oberbau, kann es zu einem Absacken des Gleisbettes, aber auch zu einem Aufweichen der Tunnelsohle, (bei entsprechenden geologischen Bedingungen), kommen. Resultierend daraus können auch Gleislagefehler als Folge des instabilen Oberbaus auftreten [43].

Bei einer Erneuerung der Mittelentwässerung muss bei der Materialwahl auf die Anforderungen an die neue Leitung geachtet werden. Die hohen Belastungen der Bauteile ergeben sich aus der Position im Druckspannungsbereich der Eisenbahnverkehrslasten kombiniert mit geringen Überlagerungshöhen. Typische Rohrmaterialien, welche zum Einsatz kommen, sind Kunststoff-, Stahl- oder Stahlbetonrohre, sowie Rohre aus duktilem Gusseisen [43].

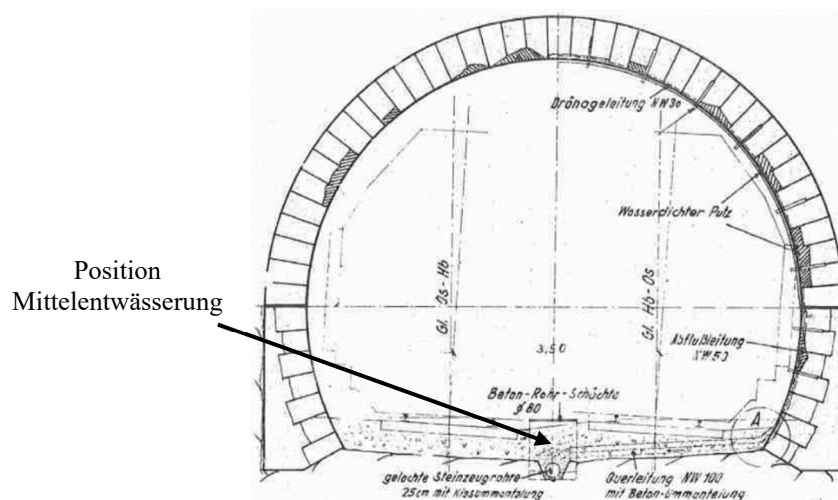


Abbildung 16: Beispiel einer Mittelentwässerung in einem 2-gleisigen Tunnel [43].

3.4.3 Halbschalentwässerungen, Noppenfolien

Eine direkte Fassung und gezielte Ableitung von Nasstellen in Tunneln mit Mauerwerksausbau erfolgen meist mit Halbschalentwässerungen oder streifenartigen Noppenbahnen. Diese werden in das Gewölbe mit schlitzzartigen Vertiefungen eingebaut und leiten das Bergwasser zu bestehenden oder neu installierten Entwässerungsleitungen ab (Abbildung 17). Versinterte oder beschädigte Halbschalentwässerungen, können ihre ableitende Funktion nicht mehr erfüllen und müssen entweder erneuert oder instandgesetzt werden [44].

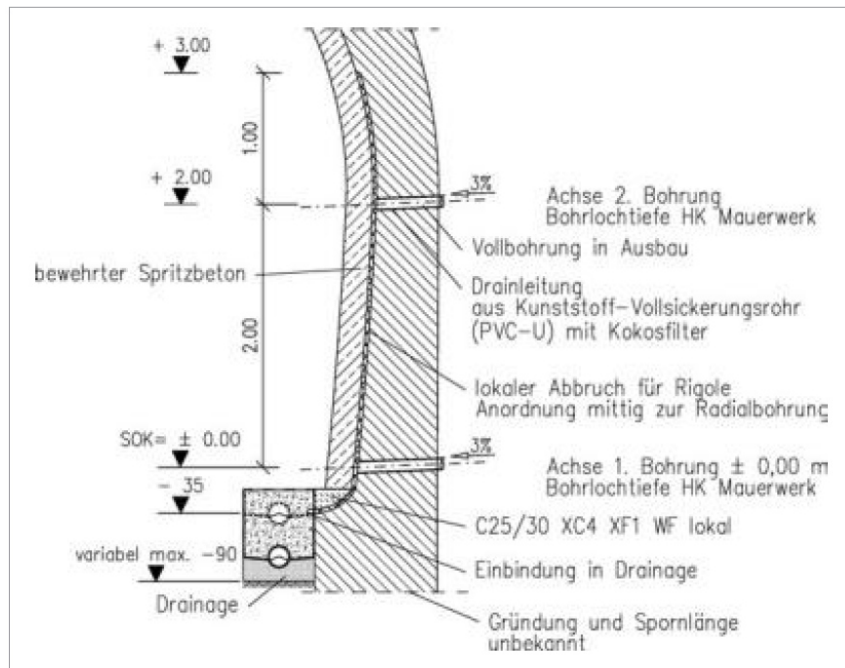


Abbildung 17: Beispiel einer Entwässerungslösung mit Rigole [44].

3.4.4 Abdichtung mit einer KDB

Bei großflächigen Nasstellen kann eine flächige, druckwasserentlastende Abdichtung mit einer KDB angewandt werden. Diese ist nur in Kombination mit einer statisch wirksamen Spritzbeton- oder Innenschale möglich [44]. Der Systemaufbau besteht aus einem Abdichtungsträger, einer geotextilen Schutzschicht und einer KDB. Typisch verwendete Materialien für die KDB sind PVC, Polyethylen (PE) oder Ethylen copolymerisat (ECB) [31].

3.4.5 Spritzabdichtungen

Spritzabdichtungen als Abdichtungslösung sind eine Möglichkeit, speziell bei geringen Wasserdrücken (von 0.5-1.0 bar) bzw. geringem Wasserandrang anstelle einer KDB. Diese werden als dünne Stützmembran auf einen gereinigten Spritzbetonuntergrund aufgebracht (Abbildung 18). Derzeit angewandte Materialien sind nicht reaktive latexähnliche Systeme, wie Pasten auf Basis von Ethylvinylacetaten (EVA), Acrylate, Reaktivharze und Polyurea. Aufgrund gemischter und kontroversieller Erfahrungen bei vergangenen Projekten ist es sinnvoll, diese nicht als einzige Abdichtungsmaßnahme zu implementieren, sondern durch andere Abdichtungs- und Entwässerungsmaßnahmen zu ergänzen [21; 24; 44].

Vorteilhaft an dieser Methode ist eine Reduzierung der Ausbaudicke durch den Wegfall des aufwendigeren Aufbaues mit einer KDB um bis zu 30 Prozent [22].

Spritzfolien werden nicht nur vermehrt im Tunnelbau, sondern auch immer häufiger in der Tunnelinstandhaltung verwendet. Projekte, bei denen diese Technologie bereits erfolgreich zum Einsatz gekommen ist, sind beispielweise Abschnitte der Metro Lausanne, drei Stationen des CrossRail Projektes und die Erneuerung des Selztaltunnels [22; 51].

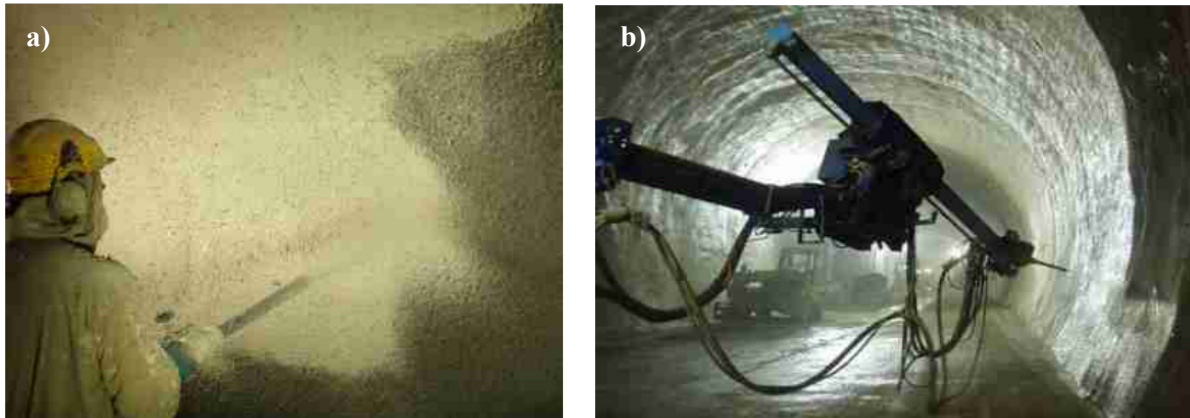


Abbildung 18: a) Aufbringung einer Spritzabdichtung im Gevingas Tunnel b) Applikation einer Spritzabdichtung mit einem Spritzroboter. [24]

3.5 Instandhaltung der Sohle und Sohlussteifung

Eine Notwendigkeit für eine Instandhaltung der Sohlkonstruktion in einem Bestandstunnel sind Schäden aufgrund mangelnder oder schadhafter Entwässerung. Dadurch kommt es zu einer Ansammlung von Wasser in der Sohle und im Oberbau. In Folge dessen können Sohlerosionen und Schlammauflösungen auftreten und somit zu Instabilitäten im Gleis und zu Gleisverschiebungen führen [46].

Weiters kann ein quellendes Gebirge Hebungen bzw. Senkungen und bei nach innen gerichteten Verformungen eine Sohlussteifung erforderlich machen. Sohlussteifungen können als geschlossene, bewehrte Sohle oder in Form von in regelmäßigen Abständen angeordnete Sohlrippen (Abbildung 19) ausgeführt werden. Eine weitere Anwendung zur Verstärkung der Tunnelsohle kann eine geforderte Erhöhung der Systemsteifigkeit sein; dies resultiert in einer höheren Tragsicherheit. Speziell zur Erhöhung der Grundbruchsicherheit ist diese Maßnahme zielführend [44].

Um eine funktionale Sohlussteifung zu erreichen, ist es zwingend erforderlich die neue Sohle kraftschlüssig mit dem Bestandsgewölbe zu verbinden. Möglichkeiten dafür sind verzahnende Bauweisen mit dem Bestandsgewölbe oder Injektionen zwischen Sohle und Gewölbe [44].

Im Zuge einer Sohlerneuerung werden der Gleisunterbau, Schotteroberbau bzw. die Feste Fahrbahn entfernt. Je nach Konzept werden auch Teile des anstehenden Gebirges in der Sohle abgetragen und durch eine bewehrte Ortbetonsohle ersetzt. Der Abtrag des anstehenden Gebirges in der Sohle kann abhängig von der Geologie mittels Hydraulikhammeraufsatz oder Teilschnittmaschinen erfolgen. Aus statischen Gründen kann es nötig sein, die Widerlager vor dem Abtrag der Sohle mit Ankern zu sichern. Zusätzlich kann durch Injektionen das umliegende Gebirge, die Hinterpackung bzw. das Mauerwerk nach Bedarf verstärkt werden [46].

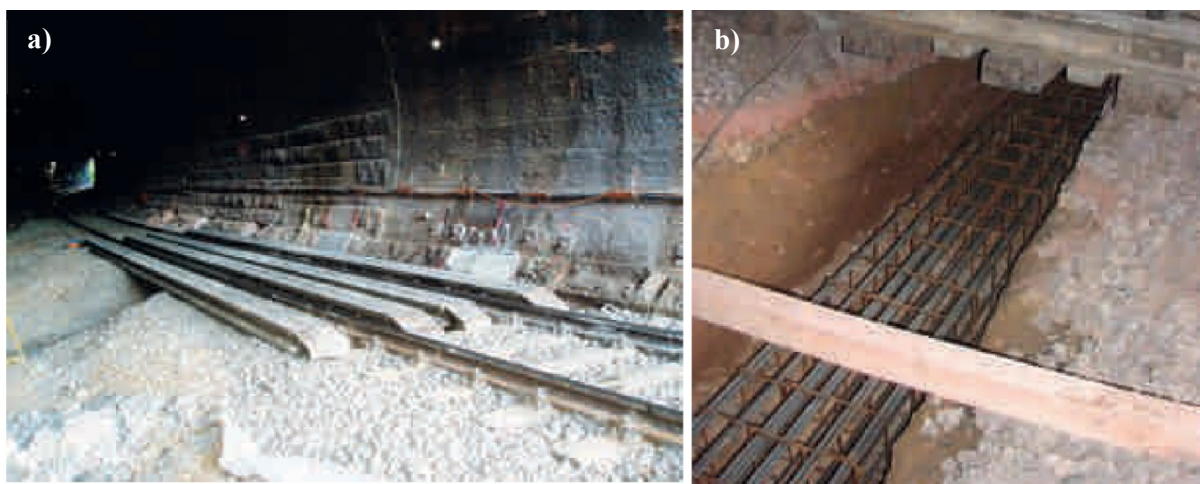


Abbildung 19: a) Kleinhilfsbrücke für die Sohlrippe. b) Bewehrung Sohlrippe [44].

3.6 Oberbau/Feste Fahrbahn

Statt des Schotterbettes wird bei einer Festen Fahrbahn eine lastverteilende Tragplatte aus Beton verwendet, auf welcher die Schienen elastisch gelagert sind (Abbildung 20). Es gibt viele verschiedene Bautypen, jedoch sind alle vom Grundaufbau ähnlich. Der unterste Teil des Aufbaus besteht aus einer Frostschuttschicht bzw. einem Unterbau, darüber ist eine hydraulisch gebundene Tragschicht und darauf liegt die Fahrbahn- bzw. Gleistragplatte [23].

Die Feste Fahrbahn hat im Gegensatz zu einem Schotteroberbau zahlreiche Vorteile, weshalb diese immer öfter eingesetzt wird. Dazu zählen im Allgemeinen [10] [23]:

- Kürzere Instandhaltungsintervalle und geringerer Aufwand
- Längere Lebensdauer
- Kein Schotterflug

Speziell für die Tunnelinstandhaltung und den Tunnelneubau ergeben sich weitere Vorteile [10]:

- im Tunnelbau wirtschaftlicher in der Herstellung
- Verringerung der Bauhöhe, aus der eine bessere Ausnutzung des Lichtraumprofils in beengten Querschnittsverhältnissen resultiert.
- Erhöhung der Tunnelsicherheit durch die Möglichkeit die Feste Fahrbahn für Radfahrzeuge befahrbar auszubilden. Dies ermöglicht im Notfall eine Befahrung durch Einsatzfahrzeuge

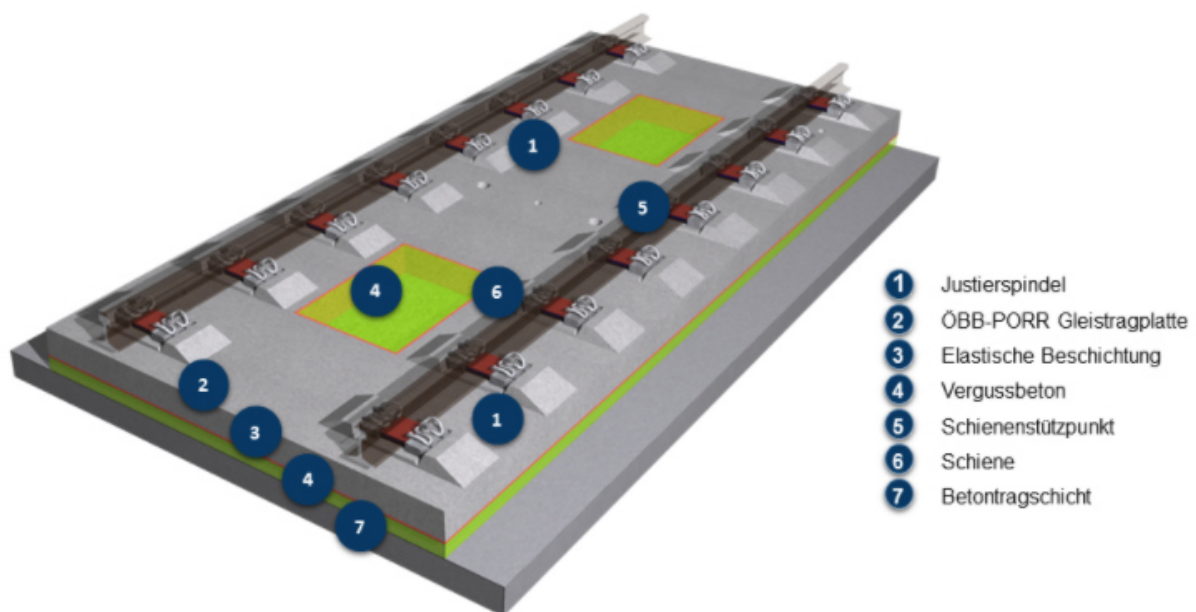


Abbildung 20: Gängiges System im österreichischen und deutschen Raum einer Festen Fahrbahn der Firma Porr. System Slab Track Austria [35].

Typische Schadensbilder, die bei einer Festen Fahrbahn auftreten können und im Zuge einer Instandsetzung bzw. Erneuerung behoben werden müssen, sind [10]:

- Unverhältnismäßige Rissbildungen und Fugenöffnungen, sowie daraus resultierende Korrosion in der Gleistragplatte
- Im Bereich der Stützpunkte Abplatzungen und Ausbrüche
- Korrosion von Kleinteilen
- Schwellenlockerungen

4 Spannungsfeld Betrieb und Tunnelinstandhaltung

4.1 Netzplanung

Wird eine Baumaßnahme in einem Einzelprojekt geplant, muss dabei auch immer die übergeordnete Strecken- und Netzplanung berücksichtigt werden. Die ÖBB verfolgen eine strategische Netzplanung, welche in drei Ebenen gegliedert wird: Gesamtnetz-Netzentwicklungsplan (NEP), Strecken/Bahnhöfe-Streckenentwicklungsplan (SEP) und Einzelmaßnahmen-Infrastrukturentwicklung (IE). Konkret werden für ein Instandhaltungsprojekt in der letzten Ebene der IE, die technischen, wirtschaftlichen und betrieblichen Lösungen erarbeitet und bewertet. Diese Lösungen müssen mit den Instandhaltungs- und Reinvestitionsstrategien des SEP und der Konzernstrategie NEP strategisch übereinstimmen. Dazu gehören beispielsweise die Streckenklasse, die Ausbaugeschwindigkeit und das Lichtraumprofil [43].

Neben der strategischen Netzentwicklung müssen bei der Planung und Durchführung von Instandhaltungsprojekten zahlreiche Faktoren, wie die Dauer der Betriebseinschränkung (Totalsperre, Stundensperren, etc.), die Verlängerung der Brauchbarkeitsdauer und die Kosten im wechselseitigen Spannungsfeld betrachtet werden (Abbildung 21). Zusätzlich sind in diesem Spannungsfeld Arbeitssicherheit, Betriebssicherheit, Umwelteinwirkungen und eventueller Denkmalschutz zu berücksichtigen (Abbildung 21). Um ein optimales Ergebnis der Instandhaltung zu erreichen, ist ein Wechsel von einer klassischen inputorientierten Herangehensweise (Vorgabe Sperrdauer und Budget) hin zu einer ergebnisorientierten Herangehensweise (optimales Ergebnis) notwendig [43].



Abbildung 21: Randbedingungen und Wechselwirkungen einer Einzelmaßnahme [43].

4.2 Sperrarten und die Auswirkungen

Nach dem UIC-Kodex 779-10 „Grundsätze für die Verwaltung und Instandhaltung bestehender Eisenbahntunnel“ [48] gibt es verschiedene Arbeitsmethoden, um bei Berücksichtigung des Bahnbetriebes Instandhaltungsmaßnahmen durchführen zu können [43]:

- Totalsperre
- Stundensperren

Meist wird schon in einer frühen Projektphase die Entscheidung getroffen, welche Methode zur Einschränkung des Betriebes zur Anwendung kommt. Anhand dieser Entscheidung wird dann die Dauer der Sperre abgeleitet und beantragt [43].

Nach dem UIC-Kodex [48], dem STUVA Sachstandsbericht 2011 und 2017 [44; 46] werden die möglichen Varianten zur Einschränkung des Bahnbetriebes erläutert [43].

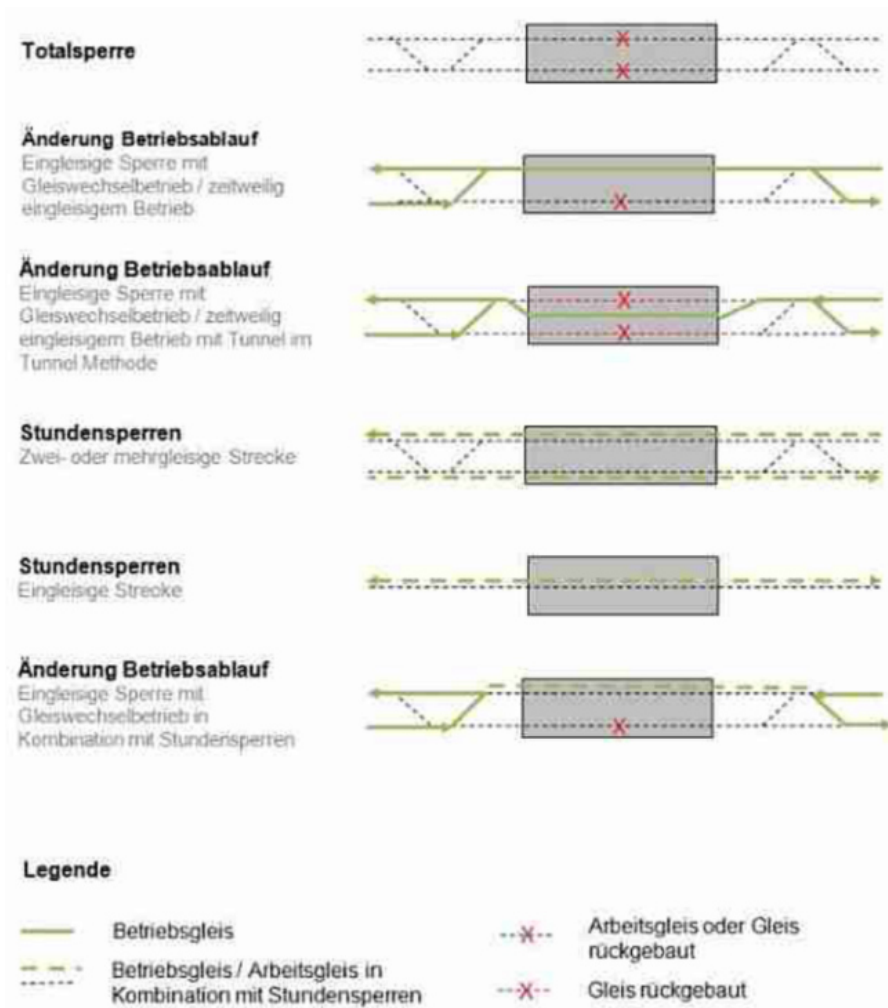


Abbildung 22: Schematische Darstellung der maßgeblichen Sperrvarianten [43].

4.2.1 Totalsperre (Vollsperrung, Streckensperre, Gesamtsperre)

Obwohl die Totalsperre (Abbildung 22) die größte Einschränkung für den Betrieb darstellt, ist sie aus wirtschaftlicher und bautechnischer Sicht die beste Variante, da sie die kürzeste Bauzeit im Vergleich zu den anderen Varianten ermöglicht. Durch die im Vergleich größte Einschränkung der Anlagenverfügbarkeit wird diese Möglichkeit auf hochrangigen Strecken oft ausgeschlossen [43].

4.2.2 Teilsperre: Änderung des Betriebsablaufs (Gleissperre)

Im Vergleich zu einer Totalsperre ist eine Gleissperre (Abbildung 22) aus rein wirtschaftlicher Sicht nachteilig. Die Bauzeit ist länger und die Kosten entsprechend höher. Der Vorteil liegt darin, dass der Bahnbetrieb eingeschränkt aufrechterhalten werden kann. Liegt die Priorität des Betreibers bei einer teilweisen Aufrechterhaltung des Betriebes ist eine Gleissperre im Vergleich zur Totalsperre zu bevorzugen. Eine Einschränkung des Betriebsablaufes kann bei Bedarf mit Stunden-, Tages- und Nachtsperren kombiniert werden [43].

Für die Änderung des Betriebsablaufes in Tunnelbauwerken gibt es mehrere Möglichkeiten (Abbildung 22) [43] :

- Bei zwei- oder mehrgleisigen Bauwerken kann eines der Gleise als Arbeitsgleis benutzt werden, die anderen als Betriebsgleise.
- Bei zwei- oder mehrgleisigen Bauwerken kann eines der Gleise in die Mitte gelegt werden und mit einer TiT-Methode gearbeitet werden.
- Bei eingeleisigen Bauwerken kann lediglich aufgrund der Querschnittgröße eine TiT-Methode angewandt werden.

Es sind bei allen Möglichkeiten die Anforderungen an freizuhaltende Lichträume, Maschineneinsatz und Sicherungsmaßnahmen zu beachten [43].

4.2.3 Teilsperre: Stundensperren (Tages- und Nachtsperren, Zugpause)

Ist es für den Betreiber möglich den Betrieb stundenweise zu beschränken, sind Stundensperren (Abbildung 22) eine Option, um Baumaßnahmen durchführen zu können. Dies kann z.B. als Nachtsperre umgesetzt werden, wenn der Betrieb auf manchen Strecken ohnehin in geringerer Taktung stattfindet. Sinnvoll nutzbar für Bauarbeiten sind jedoch nur Sperren, welche mehr als vier Stunden betragen. Es gilt zu beachten, dass am Ende der Sperre immer Vorkehrungen für einen sicheren Bahnbetrieb getroffen werden müssen, welche die begrenzten Arbeitszeiten weiter verkürzen [43].

4.2.4 Auswirkungen von Sperren

Je länger einer Sperre/Einschränkung dauert, desto größer ist die Auswirkung auf den Betrieb (Abbildung 23). Bei einer hoch frequentierten Strecke sind die Auswirkungen entsprechend größer als bei niedrig frequentierten Strecken (Abbildung 23). Am verträglichsten für den Betrieb sind Stundensperren (Abbildung 23), welche jedoch auch aus wirtschaftlicher und bautechnischer Sicht die geringste Effizienz mit sich bringen [43].

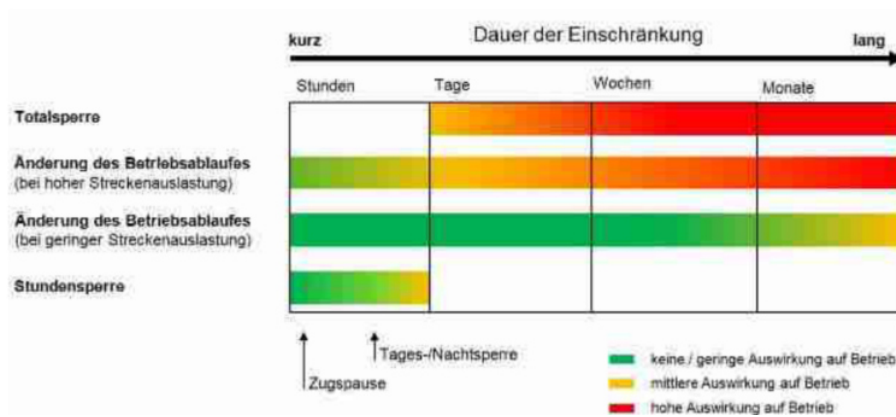


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Sperrarten und den betrieblichen Auswirkungen für den Bahnbetrieb [43].

4.2.5 Vorlaufzeit von Sperren

Bereits in einer frühen Projektphase ist die Entscheidung über Sperrvarianten und deren betriebliche Einschränkungen zu treffen. Um dies mit dem Bahnbetrieb abzustimmen sind bestimmte Vorlaufzeiten für diese Maßnahmen einzuhalten [43].

Bei der ÖBB-Infrastruktur AG bildet die Grundlage für die planmäßigen Einschränkungen die europäische Richtlinie 2012/34/EU (zur Schaffung eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraumes) [2]. Je nach Dauer und Grad der Einschränkung für den Bahnverkehr erfolgt eine Klassifizierung in vier Kategorien (Kat I ist jene Kategorie mit der höchsten Einschränkung, Kat IV ist jene Kategorie mit der geringsten Einschränkung; Abbildung 24a). Den Kategorien werden Fristen für die Bekanntgabe bzw. Veröffentlichung zugewiesen (Abbildung 24b) [43].

a)		Ausfall oder Umleitung von Zugtrassen pro Tag			
		< 10 %	10 – 30 %	30 – 50 %	> 50 %
Dauer der Einschränkung	> 30 Tage	Kat. IV	Kat. III	Kat. II	Kat. I
	7 Tage – 30 Tage	Kat. IV	Kat. III	Kat. II	Kat. II
	24 h bis 7 Tage	Kat. IV	Kat. III	Kat. III	Kat. III
	< 24 h	Kat. IV	Kat. IV	Kat. IV	Kat. IV

b)	Fristen für die Koordinierung und Veröffentlichung				
	X-24	X-18	X-13,5	X-12	X-6
Kat. I	Erste Veröffentlichung ¹	Abschluss-Koordinierung	-	Zweite Veröffentlichung	Update
Kat. II	Erste Veröffentlichung ¹	-	Abschluss Koordinierung	Zweite Veröffentlichung	Update
Kat. III	-	-	Abschluss Koordinierung	Erste Veröffentlichung	Update
Kat. IV	-	-	-	-	Erste Veröffentlichung

1) soweit bekannt

Abbildung 24: a) Kategorisierung in Abhängigkeit von der Dauer der Einschränkung und Ausfall/Umleitung der Zugtrasse. b) Darstellung der Fristen für die Koordinierung und Veröffentlichung der Einschränkungen. Die Kategorie „X“ stellt den Zeitpunkt des Fahrplanwechsels dar, welcher bei der ÖBB-Infrastruktur AG einmal jährlich im Dezember stattfindet. Die Zahl nach dem „X“ ist die Fristdauer in Monaten vor dem Fahrplanwechsel in der die Koordinierung und Veröffentlichung erfolgen muss [2; 43].

Bei Teil- oder Vollerneuerungen sind i.d.R. Einschränkungen des Betriebes von mehreren Monaten bzw. Jahren, in Kombination mit einer Totalsperre, üblich. Somit fallen diese Maßnahmen in die Kategorie I (Abbildung 24a). Die Frist für diesen Fall beträgt 24 Monate vor dem Fahrplanwechsel (Abbildung 24b). Für den Fall, dass Teil- oder Vollerneuerungen in den Rahmenplan der ÖBB mitaufgenommen sind, kann eine Fristdauer von bis zu 48 Monaten vor dem Fahrplanwechsel anfallen. Der Rahmenplan der ÖBB wird jährlich aktualisiert und die umfangreichen Eisenbahnbauprojekte abgebildet. Eine Herabstufung von Kategorie I auf Kategorie II oder III kann bei einer teilweisen Aufrechterhaltung des Betriebes erfolgen (z.B. bei einer Gleissperre oder der Anwendung einer TiT-Methode) [43].

Aufbauend auf der Kategorisierung und den daraus resultierenden Einschränkungen für den Bahnbetrieb leitet die ÖBB eine Koordination mit den betroffenen Nachbarbahnen und Terminalbetreibern (national und international) ein. Damit wird das Ziel verfolgt, Kapazitäten für Umleitungen zu gewährleisten. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die vorgegebenen Fristzeiten (Abbildung 24b) oft nicht ausreichen, um Einschränkungen für den Bahnkunden zu minimieren, daher sollten diese weiter ausgedehnt werden [43].

4.3 Rechtliche Aspekte und Arbeitssicherheit

4.3.1 Allgemein

Für die Bahn in Österreich gelten, bezogen auf Zulassungsentscheidungen von Tunnelinstandhaltungen im Allgemeinen folgende Aspekte [43]:

- Instandsetzungs- und sonstige Erhaltungsmaßnahmen benötigen keine Zulassungsentscheidung (eisenbahnrechtliche Baugenehmigung bzw. Betriebsbewilligung).
- Bei einer Teilerneuerung ist zu überprüfen, ob die neuen Maßnahmen von der ursprünglichen Zulassungsentscheidung abgedeckt sind
- Bei einer Vollerneuerung ist ein neues behördliches Zulassungsverfahren nötig

Die in Österreich geltenden Rahmenbedingungen zur Arbeitssicherheit, bezogen auf Bauarbeiten im Tunnel, sind [43]:

- ArbeitnehmerInnenschutzgesetz-ASchG
- Allgemeine Arbeitnehmerschutzverordnung-AAV
- Bauarbeiterschutzverordnung-BauV
- Eisenbahn-ArbeitnehmerInnenschutzverordnung-EisbAV
- ÖBB 40: Schriftliche Betriebsanweisung ArbeitnehmerInnenschutz
- ÖBB 30.04.15: Organisation von Bauarbeiten im Bereich von Gleisen

4.3.2 Sicherungsmaßnahmen

Werden gemäß des EisbAV § 25a [6] Bauarbeiten in der Nähe des Gefahrenraumes der Gleise durchgeführt, so gilt es, ein Eindringen in den Gefahrenraum zu verhindern. Soweit wie möglich ist dies mit technischen Maßnahmen zu unterbinden.

Der Gefahrenraum ist jener Raum, welcher von bewegten Schienenfahrzeugen und der Ladung eingenommen wird, inklusive des Raumes neben und unter den Gleisen, wodurch Personen durch bewegte Schienenfahrzeuge gefährdet werden können. Allgemein gilt bei Tunnelbauwerken der gesamte Querschnitt als Gefahrenraum [26].

Technische Maßnahmen zur Verhinderung des Eindringens in den Gefahrenraum von Gleisen können sein [26]:

- Barrieren: z.B. Mobile Instandhaltungseinheit (Abbildung 25a), feste Absperrungen (Abbildung 25b)
- Technische Begrenzungen: z.B. Einschränkung des Schwenk- und Hubbereichs zum Gleis und zur Oberleitung für Kräne, Bagger, etc.

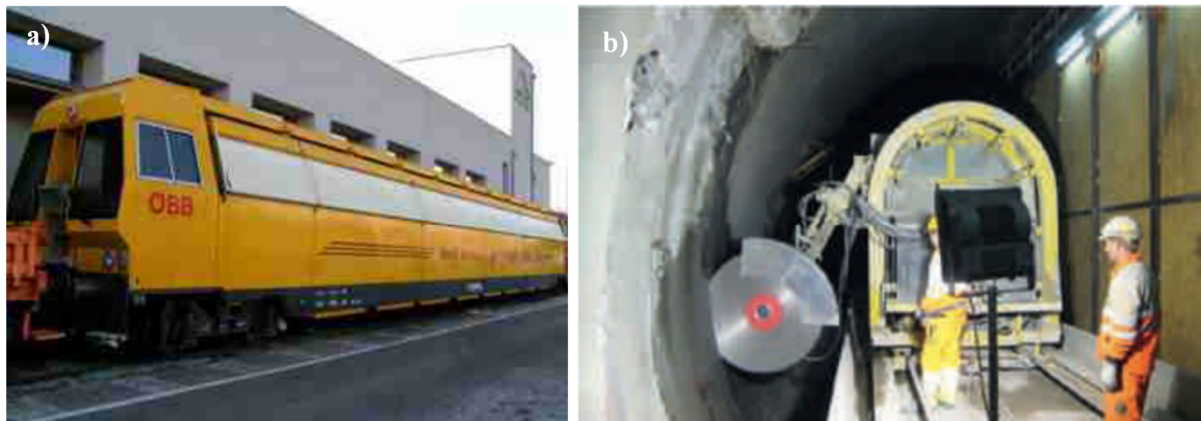


Abbildung 25: a) Mobile Instandhaltungseinheit (MIE) [13]. b) Auf der rechten Seite des Bildes ist eine feste Absperrung zu erkennen, um ein Eindringen in den Gefahrenraum zu verhindern [44].

Sicherungsmaßnahmen im Tunnel sind in zwei Ebenen gegliedert [26]:

- Sicherungsmaßnahmen zum Schutz der Arbeitnehmer vor Annäherung von Schienenfahrzeugen.
- Sicherer Aufenthalt bei Vorbeifahrt von Schienenfahrzeugen.

Sofern ein Eindringen in den Gefahrenraum nicht verhindert werden kann (im Tunnel gilt der gesamte Querschnitt als Gefahrenbereich), werden folgende Sicherungsmaßnahmen gemäß EisbAV § 26 [6] im Tunnel durchgeführt. Diese dienen zum Schutz der Arbeitnehmer vor Annäherung von Schienenfahrzeugen:

- **1. Fahrten nicht zulässig:** Es sind technische Maßnahmen vorzusehen, mit denen die Gleise nicht befahren werden können, wie z.B. eine abweisende Stellung gesperrter Weichen, Gleissperrschuhe, provisorische Gleisabschlüsse etc.
- **2. Technischer Fahrtrückhalt:** Dies wird durch technische Abhängigkeiten sichergestellt, indem die Arbeitnehmer auf der Baustelle vor Zulassung einer Fahrt eines Schienenfahrzeuges verständigt werden. Erst nach erfolgter technischer Zustimmung der Baustelle darf die Fahrt zugelassen werden. Technisch kann dies z.B. durch eine Signalabhängige Arbeitsstellensicherungsanlage (SAS) umgesetzt werden.
- **3. Betrieblicher Fahrtrückhalt:** Dies wird durch betriebliche Abhängigkeiten mit technischer Unterstützung sichergestellt, indem die Arbeitnehmer auf der Baustelle vor Zulassung einer Fahrt von Schienenfahrzeugen verständigt werden und erst nach erfolgter Bestätigung darf die Fahrt zugelassen werden.
- **4. Technische Warnung:** Durch ein automatisches Warnsystem (SCWS oder AWS) kann eine technische Warnung erfolgen. Daraufhin verlassen, überwacht vom Sicherungsposten, die Arbeitnehmer den Gefahrenraum. Der Sicherungsposten muss während des gesamten Vorganges die Arbeitnehmer im Blick behalten.

Dabei ist erstens: „Fahrten nicht zulässig“ aus arbeitssicherheitstechnischer Sicht die beste Lösung. In absteigender Reihenfolge bis viertens „Technische Warnung“ sinkt der Aspekt der Arbeitssicherheit stetig [26].

Finden Fahrten mit Schienenfahrzeugen während Bauarbeiten statt, so sind auch hier Sicherheitsmaßnahmen anzuwenden [26]:

- Sperre eines bestimmten Bereiches mit Haltescheiben
- Technische Warnung
- Warnung durch einen Sicherungsposten

Für eine sichere Vorbeifahrt von Schienenfahrzeugen müssen sich die Arbeitnehmer vorrangig in vierseitig geschützte Bereiche zurückziehen wie Querschläge, bereitgestellte Schienenfahrzeuge oder bereitgestellte mobile Instandsetzungseinheiten. Dabei darf die Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge während der Vorbeifahrt höchstens 160km/h betragen [26].

Sollte ein Zurückziehen in vierseitig geschützte Bereiche nicht möglich sein, so sind dreiseitig geschützte Bereiche zu benutzen. Hier gilt während der Vorbeifahrt ebenfalls eine Höchstgeschwindigkeit von 160km/h [26].

Sollte der Rückzug in vier- bzw. dreiseitig geschützte Bereiche nicht möglich sein, so dürfen Schienenfahrzeuge gemäß EibAV §26a [6] bei gleichzeitigem Aufenthalt der Arbeitnehmer am Randweg vorbeifahren:

- Bei einem zweigleisigen Tunnel mit einer Betriebsvariante von Arbeitsgleis und Betriebsgleis, dürfen sich die Arbeitnehmer auf dem Arbeitsgleis aufhalten. Die maximale Geschwindigkeit während der Vorbeifahrt beträgt, dabei 40km/h.
- Bei einem zweigleisigen Tunnel mit einer Betriebsvariante von Arbeitsgleis und Betriebsgleis, einem Abstand von mind. 7.0m zwischen der Gleisachse des Betriebsgleis und der Tunnelwand des Arbeitsgleises, dürfen Schienenfahrzeuge mit maximal 100km/h vorbeifahren.
- Im eingleisigen Tunnel wird die Vorbeifahrt nur zugelassen, wenn der Abstand zwischen Gleisachse und Tunnelwand mindestens 2.5m beträgt, was in einer Standfläche von 0.8m² für den Arbeitnehmer resultiert. Die maximale Geschwindigkeit während der Vorbeifahrt darf, maximal 10km/h betragen.
- Bei Arbeiten mit Arbeitskorb oder Hubarbeitsbühnen im Bereich der Tunneldecke, darf die Höchstgeschwindigkeit während der Vorbeifahrt maximal 80km/h betragen. Die Arbeiten sind währenddessen zu unterbrechen [26].

4.4 Maßnahmentechnische Einschränkung

Die folgenden Punkte schildern Erfahrungen und „Best Practice“ bei diversen Instandhaltungsmaßnahmen. Sie basieren auf in der Praxis angewandten Maßnahmen und den dazu nötigen Betriebseinschränkungen. Dies kann nicht als allgemein gültig angesehen werden und muss bei jedem Projekt einzeln betrachtet werden.

- Spritzbetonarbeiten erfordern i.d.R. eine Totalsperre, wenn diese im Firstbereich durchgeführt werden [44].
- Für den Einbau von Vernagelungen (Anker, Mikropfähle) ist bei größeren Längen eine Totalsperre vorzusehen [44].
- Netzsicherungen und Ankerungen im Firstbereich sind unter einer Totalsperre durchzuführen. [44].
- Ein Ersatz der bestehenden Tragschale kann i.d.R. nur unter einer Totalsperre erfolgen [44].
- Erneuerungsarbeiten von Entwässerungsanlagen sind aufgrund der Nähe zum Fahrweg (z.B. Mittelentwässerungen, Halbschalentwässerungen, Ulmendrainagen) oft nur unter Teil- oder Totalsperren möglich [43].
- Besonders bei Mittelentwässerungen, welche meist in alten gemauerten Tunneln anzutreffen sind, ist durch die Überlagerung des Gleisbaus die Wartung, Instandsetzung oder auch Erneuerung meist nur unter einer Totalsperre möglich [43].
- Der Einbau einer neuen Innenschale aus Ort beton ist eine komplexe bauliche Aufgabe, welche eine Totalsperre des Tunnels erfordert [43].
- Bei Verwendung einer TiT-Methode ist keine Totalsperre nötig, der Betrieb kann eingleisig unter Einschränkungen weiterhin stattfinden. Die Haupteinschränkung ist gegeben, wenn während der Sprengarbeiten zum Lösen des Gebirges keine Durchfahrt stattfinden kann. Beim Aufbau des TiT-Systems und beim unter Umständen notwendigen Umbau auf einen eingleisigen Betrieb ist ebenfalls keine Durchfahrt möglich [46].
- Der Einbau von Rippen im Gewölbe der Spritzbetonschale kann mit Teilsperren durchgeführt werden (z.B. bei zweigleisigen Tunneln mit wechselseitigen Gleissperren) [46].
- Bei Verwendung einer TAS kann der Betrieb ohne zusätzliche Sperren erfolgen. Jedoch gibt es betriebliche Einschränkungen beim Aufbau des TAS-Systems und beim unter Umständen erforderlichen Umbau auf einen eingleisigen Betrieb [46].

5 Kostenermittlung

Die Ausführungen in diesem Kapitel sind dem „Handbuch zur Kostenermittlung“ der ÖBB Infrastruktur AG zu entnehmen [27]. Ergänzungen sind mit der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) „Richtlinie für die Kostenermittlung für Projekte der Verkehrsinfrastruktur“ [32] erläutert.

5.1 Einführung

Jedes Verkehrsinfrastrukturprojekt befindet sich in einem Spannungsfeld aus Qualitäts-, Kosten- und Zeitzielen. Die Kostenermittlungen bilden in regelmäßigen Zeitabständen den Kostenstatus von Projekten ab und erlauben somit eine gezielte Kostenkontrolle und Steuerung.

Kennzeichnend für Verkehrsinfrastrukturprojekte ist eine hohe Anzahl an Projektbeteiligten und schwer vorhersehbare Einflüsse wie Finanzierbarkeit, Kenntnisse des Baugrundes, langwierige Genehmigungsverfahren, Gesetzeslage, etc. Die Projektkosten sind abhängig vom Status der Genehmigungen, der Planungstiefe und vom Ausführungsstand. Das Ziel der Kostenermittlung ist trotz genannter Randbedingungen und Abhängigkeiten eine stabile Prognose der Kosten zu erhalten (Abbildung 26) [32].

5.2 Kostenbestandteile

Bei der Durchführung der Kostenermittlung werden folgende Kostenbestandteile unterschieden:

- Basiskosten (B)
- Kostenansätze für Wertanpassung und Gleitung (G)
- Kostenansätze für Risiken (R)
- Kostenansätze für Vorausvalorisierung (V)

Bei der Nennung der Gesamtkosten sind alle Kostenbestandteile (BGRV) zu addieren (Abbildung 26). Wurde mindestens ein Kostenbestandteil probabilistisch ermittelt, so ist eine Zusammenrechnung nach den Regeln der Probabilistik durchzuführen [32].

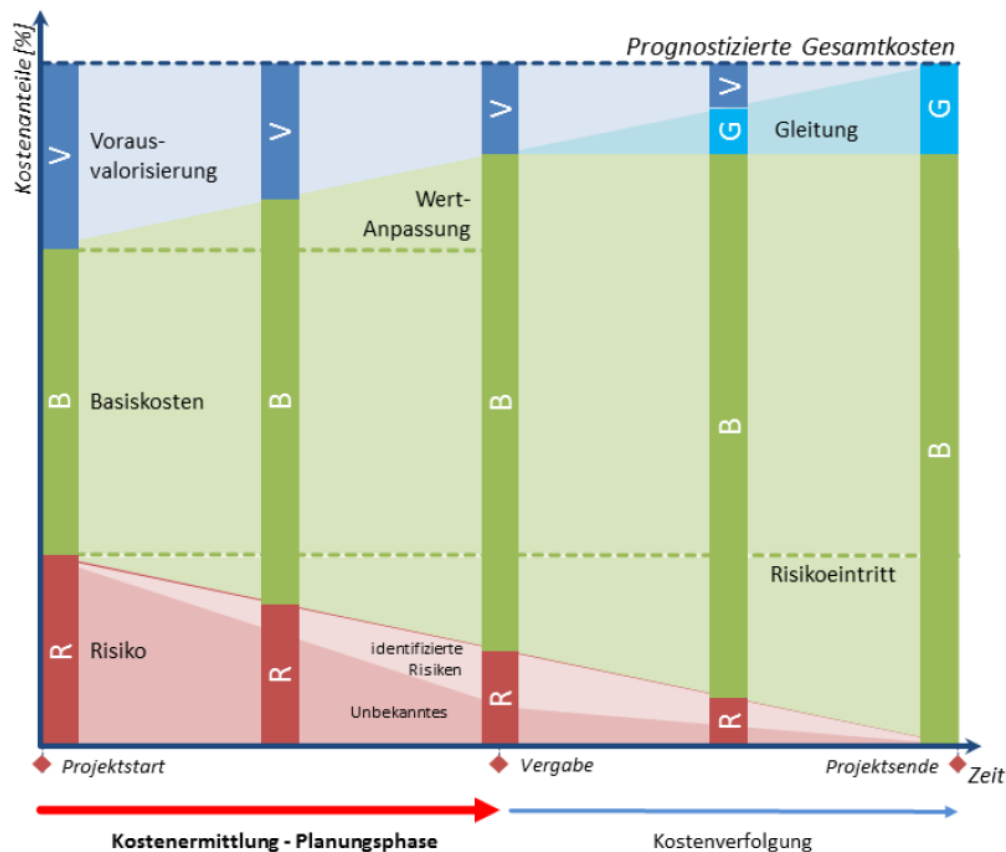


Abbildung 26: Schematische Grafik der zeitlichen Entwicklung der Kostenbestandteile [32].

5.2.1 Basiskosten

Basiskosten bilden die Grundlage der Kostenermittlung, darauf aufbauend werden die Kostenaufschläge für Wertanpassung und Gleitung, Risiken und Vorausvalorisierung angenommen. Die Basiskosten beruhen auf der Einschätzung des Preisniveaus am Baupreismarkt zu einem bestimmten Zeitpunkt, dies definiert die Preisbasis der Basiskosten.

Das Projekt muss in einzelne Kostenelemente gegliedert werden, für die eine Massenermittlung vorgenommen wird, um die Elementkosten zu ermitteln.

$$\text{Elementkosten} = \text{Elementmenge} \times \text{Elementeinheitskosten}$$

Die Elementkosten sind um den Bestandteil des Unberücksichtigten zu erhöhen. Dies wird maßgeblich durch den Detaillierungsgrad der Planung beeinflusst. Je weiter fortgeschritten ein Projekt ist, desto geringer kann der Anteil für Unberücksichtigtes gehalten werden.

$$\text{Basiskosten} = \text{Elementkosten} + \text{Unberücksichtigtes}$$

Die Beschaffungen der Leistungen finden in den meisten Fällen in der Zukunft statt und erstrecken sich über einen längeren Zeitraum. Verschiedene Beschaffungszeiträume mit den unterschiedlichen Marktpreisentwicklungen sind deshalb bedeutend für die tatsächlichen Endkosten. Daher muss ein Mittelabflussplan erstellt werden, welcher als Basis einen Bauphasenplan und eine Bauablaufbeschreibung hat.

5.2.2 Wertanpassung und Gleitung

Über den Kostenbestandteil Wertanpassung und Gleitung erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt ein Aufschlag der Marktverhältnisse. Sie erlauben die Veränderung in Marktentwicklung am Baustoffmarkt zwischen zwei Zeitpunkten in die Kostenermittlung miteinfließen zu lassen. Wertanpassung findet in der vorvertraglichen, Gleitung in der vertraglichen Phase statt.

5.2.3 Risiken

Es ist stets das Risiko gegeben, dass es zu einer Abweichung von Planvorgaben und somit zu einer Erhöhung der Projektkosten kommt. Um in diesem Risikoumfeld dennoch stabile Kostenschätzungen tätigen zu können, werden Kostenansätze für Risiken in der Kostenermittlung berücksichtigt. Bei fortschreitender Planungstiefe verringern sich die Risikoansätze. Der Risikoansatz ergibt sich aus identifizierbarem und unbekanntem Risiko:

$$\text{Risiko } R = \text{identifizierbare Risiken} + \text{Unbekanntes}$$

Es wird zwischen mehreren Risiken unterschieden: Planungsrisiken, Grundeinlöserisiken, Kalkulationsrisiken, Vertragsrisiken, Baugrundrisiken, Bestandsrisiken, Genehmigungsrisiken, Marktrisiken und Risiko aus höherer Gewalt, welches innerhalb der üblichen langjährigen Mittel liegt (Hochwasser, Sturm u.ä.), etc. Nicht enthalten sind Bestelländerungsrisiken, Finanzierungsrisiken und Risiko aus höherer Gewalt, welches über ein übliches langjähriges Mittel hinausgeht (Erdbeben, Extrem-Hochwasser, Krieg, Streik, u.ä.).

Prozentsätze für die Risikovorsorge sind dem Handbuch zur Kostenermittlung der ÖBB zu entnehmen [27]. Diese tabellarisch aufgelisteten Richtwerte basieren auf Erfahrungen und sind bei Bedarf projektspezifisch anzupassen. Für frühe Projektphasen (Vorprojekt, Operative IE) sind die Streuungen der Risikoansätze so groß, dass es hier keine Angaben dazu gibt. Diese gilt es fachmännisch zu extrapolieren.

Berechnet wird der Kostenansatz je Projektteil R_{Allg} indem ein Prozentsatz r_{Allg} mit dem Prognoseanteil der Basiskosten B des Projektteiles multipliziert wird:

$$R_{\text{Allg}} = r_{\text{Allg}} \times B$$

Der Kostenansatz für Baugrundrisiken berechnet sich nur aus dem Prognoseanteil der Basiskosten, der von den Baugrundrisiken betroffen ist (B^{Baugrund}):

$$R_{\text{BG}} = r_{\text{BG}} \times B^{\text{Baugrund}}$$

$$R_{BG} = r_{BG} \times B \times BG\text{-Anteil}$$

Gemäß dem „Handbuch zur Kostenermittlung“ der ÖBB Infrastruktur AG gibt es für r_{Allg} keine Angaben für frühe Projektphasen, wie IE und Vorprojekte [27]. In der ÖGG Richtlinie „Kostenermittlung für Projekte der Verkehrsinfrastruktur“ [32] gibt es, speziell für Bauwerksinstandsetzungen und Erneuerungen, pauschalisierte Risikozuschläge (Abbildung 27).

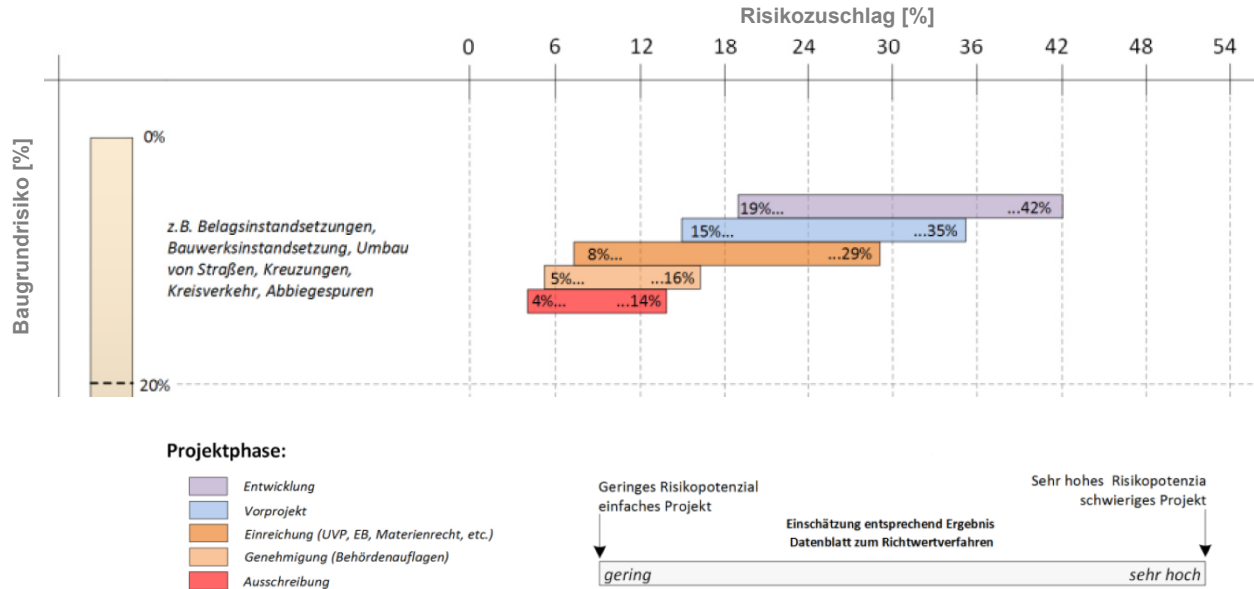


Abbildung 27: Bestimmung des pauschalen Risikozuschlages [32].

5.2.4 Vorausvalorisierung

Die Beschaffung von prognostizierten Leistungen erfolgt meist über einen längeren Zeitraum in der Zukunft. Die Marktverhältnisse entwickeln sich von der angenommenen Preisbasis weiter und verursachen in der Regel eine Preissteigerung und somit erhöhte Kosten. In der Vorausvalorisierung werden zwei Entwicklungen abgebildet.

Einerseits der Beschaffungsmarkt des Auftraggebers bis zum Vertragsschluss, andererseits die Beschaffungsmärkte des zukünftigen Auftraggebers. Zur Prognose dieser Marktentwicklungen dienen Baukostenindizes.

Im Regelfall wird ein mittlerer Zinssatz in der ÖBB Infrastruktur AG ermittelt und für die Kostenermittlung vorgegeben. Die Vorausvalorisierung wird im Weiteren mit den Formeln der Zinseszinsrechnung berechnet.

6 Modelltunnel

6.1 Technische Daten und Randbedingungen des Modelltunnels

Die verwendeten Tunnelprofile, Ausbautypen und Bauweisen im Modelltunnel sind abgeleitet von Rziha [40], sowie Archivunterlagen der K.K. Eisenbahnbaudirektion des Tauern- und Karawankentunnels [18; 19]. Sie repräsentieren keinen Querschnitt eines bereits existierenden Eisenbahntunnels, sondern sollen zeigen, wie ein vergleichbarer Eisenbahntunnel Ende des 19., Anfang des 20. Jahrhunderts gebaut sein könnte. Weiters wird angenommen, dass im Zuge von vorangegangenen Instandhaltungen, vereinzelt Spritzbetonversiegelungen, Halbschalenentwässerungen, Oberbauerneuerungen, Nachrüstungen der Ausrüstung, etc. durchgeführt wurden.

Der von den Jahren 1898-1909 nach der „Alten Österreichischen Tunnelbaumethode“ errichtete, zweigleisige Eisenbahntunnel mit einer Länge von 6250m, besitzt ein Natursteinmauerwerk aus Gneis (Tabelle 2). Der gewählte Querschnitt hat einen 4.10m Radius im Gewölbe und einen 5.15m Radius in der Ulme (Abbildung 28, Anhang 9.1). Abzüglich des Schotteroberbaus resultiert dies in einem nutzbaren Lichtraumprofil von 47.4m² (Tabelle 2).

Je nach geologischen Gegebenheiten sind beim damaligen Bau drei verschiedene Ausbautypen (Druckprofile) zur Anwendung gekommen (Anhang 9.1, Anhang 9.8, Abbildung 30). Für die Lockermaterialbereiche des West- und Ost-Portals, sowie in der kataklastischen Störungszone, kam ein schweres Druckprofil zum Einsatz (Abbildung 30, Anhang 9.1). Dieses hat eine Gewölbstärke von 1.15m, eine Widerlagerstärke von 1.75m und ein Sohlgewölbe mit einer Dicke von 80cm (Anhang 9.1). Das mittlere Druckprofil (Ausbautyp 2) mit einem 65cm dicken Sohlgewölbe misst eine Gewölbstärke von 80cm, eine Widerlagerstärke von 1.10m (Anhang 9.1, Abbildung 28) und wurde in den Formationen des quellenden Serizitphyllites verwendet (Abbildung 30). Das leichte Druckprofil (Ausbautyp 3) ist im standfesten Gebirge der Paragneis Formation angewandt worden (Anhang 9.8, Abbildung 30). Es ist für damalige Verhältnisse mit einer Gewölbstärke von 50cm, einer Widerlagerstärke von 80cm und einer sohloffenen Bauweise, schlank gebaut (Anhang 9.1).

Errichtungszeit	1898-1908
Tunnelsystem	zweigleisig
Anzahl Tunnelröhren	1
Oberbau	Schotteroberbau mit Betonschwellen
Länge	6250m
Blocklänge	10m
Gleisabstand	3.50m
Verwendetes Lichtraumprofil	Streckenspezifisches Lichtraumprofil von ÖBB. (Eingeschränkte Leistungsfähigkeit im Vergleich zu LPR1)
Querschnittsfläche	47.4m ²
Tunnelentwässerung	Sammelleitung Mittelentwässerung DN 350
Ausmauerung	Trockenmauerwerk aus Naturstein (behauener Gneis). Teilweise Spritzbetonversiegelung vorhanden.
Bauweise	„Alte Österreichische Tunnelbaumethode“
Lüftung	Natürliche Belüftung
Zustandsklasse	Gemäß ÖBB Klassifizierung [43]: 3-4

Tabelle 2: Kerndaten des Modelltunnels.

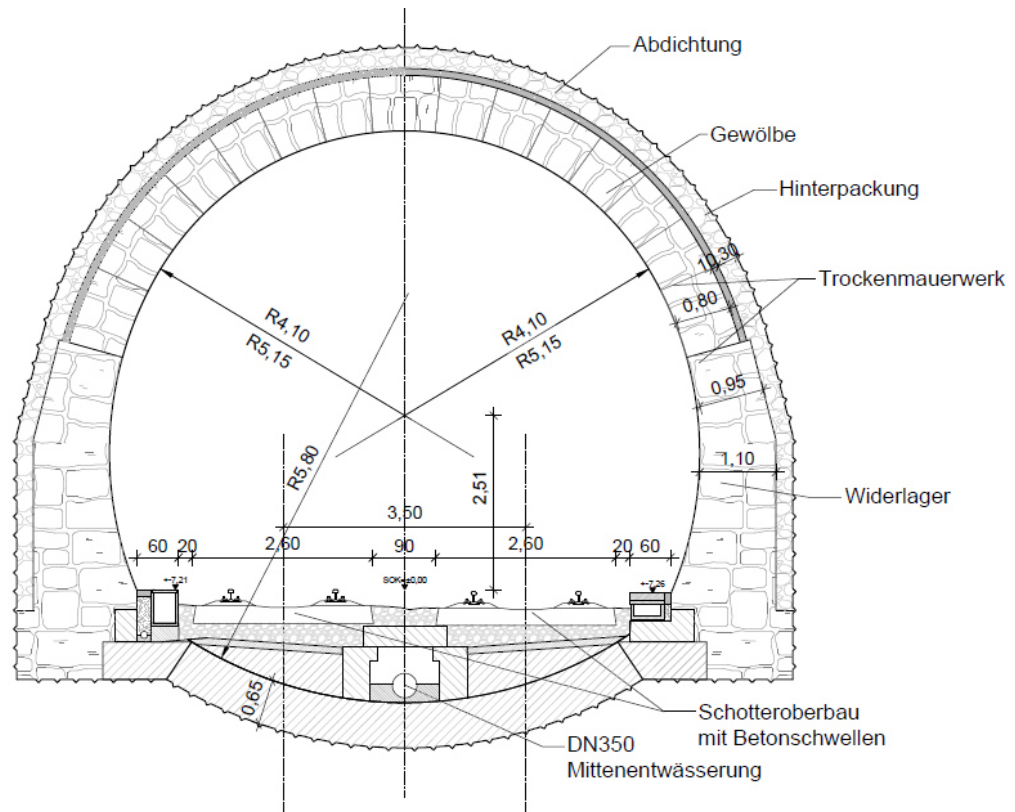


Abbildung 28: Tunnelprofil (mittleres Druckprofil) des Modelltunnels.

In den alten Tunnelbauweisen, bedingt durch Abweichungen in der Genauigkeit der Herstellung, waren Schwankungsbreiten im Ausmaß von mehreren zehner Zentimetern in den Abmaßen der Tunnelprofile nichts Ungewöhnliches [40]. Laserscanauswertungen aus der Praxis haben gezeigt [17], dass Abweichungen bei vergleichbaren Tunnelbauwerken (verglichen mit dem Modelltunnel) zwischen dem Minimalprofil (Tunnelprofil mit den kleinsten Abmessungen) und dem Maximalprofil (Tunnelprofil mit den größten Abmessungen), bis zu 65cm betragen können (Abbildung 29). Diese Abweichungen treten auch bei den drei angegebenen Druckprofilen im Modelltunnel auf (Anhang 9.1).

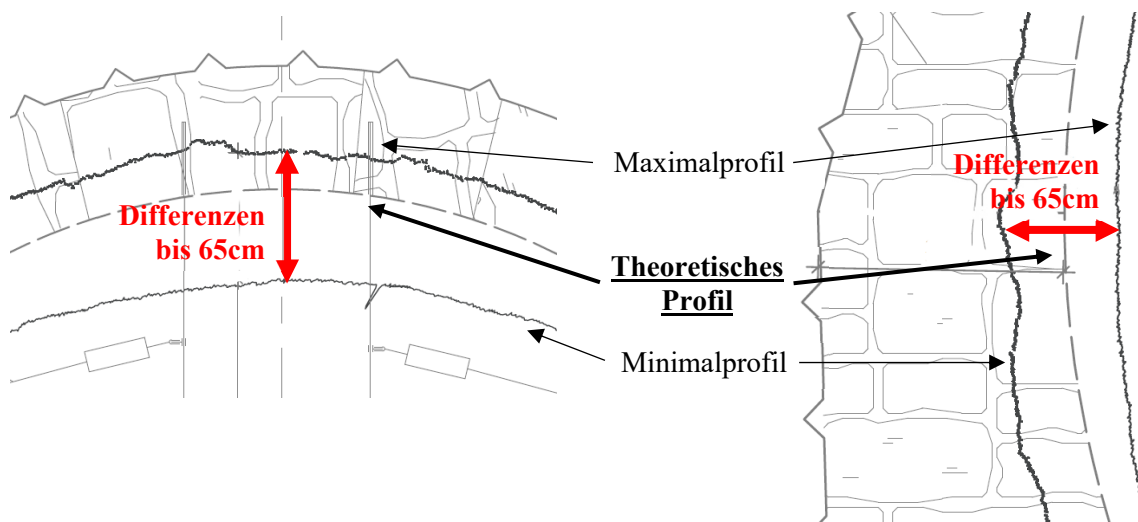


Abbildung 29: Profildifferenzen in alten Eisenbahntunneln [17].

Das Tunnelbauwerk liegt auf keiner transeuropäischen Verkehrsachse, sollte aber im Zuge des strategischen NEP der ÖBB eine höhere Streckenpriorität und Auslastung bekommen. Die derzeitige Kernstrecke ist zu ca. 70 Prozent ausgelastet. Bedingt durch den Ausbau neuer Strecken, kann in den nächsten 30 Jahren die Auslastung auf über 100% steigen. Eine Umfahrung für den Güterverkehr ist über eine weiträumige Umleitung möglich. Die Option für einen Schienenersatzverkehr ist über Landes- und Bundesstraßen gegeben und mit 30 Minuten zusätzlicher Reisezeit einzukalkulieren.

6.2 Geologie

Es gilt festzuhalten, dass für den Modelltunnel keine geologischen Kartierungen durchgeführt worden sind. Der geologische Längsschnitt setzt sich aus spärlich vorhandenen Archivunterlagen und Beobachtungen zusammen. Der Tunnel befindet sich zum Großteil in standfestem Gebirge einer Paragneis Formation (Abbildung 30), mit einer maximalen Überlagerung von 610m und einer durchschnittlichen einaxialen Druckfestigkeit von 100-150Mpa. Das Gebirge ist weitgehend homogen aufgebaut, teilweise treten auch zerklüftete und wasserführende Gebirgszonen auf. Das generelle Einfallen der Paragneis Formation beträgt rund 50 Grad Südwest.

In den Bereichen Tunnelmeter (TM) 4590-4640 und TM 4960-4970 treten quellende Serizitphyllit Formationen auf (Abbildung 30). Das quellende Gebirgsverhalten im Serizitphyllit wird durch die Tonminerale Montmorillonit und Smektit hervorgerufen.

Bei Tunnelmeter TM 4087-4151 ist eine kataklastische, wasserführende Störungszone in den Paragneisen eingeschaltet (Abbildung 30). Sowohl die kataklastische Störungszone als auch die Serizitphyllit Formation, haben, wie die Paragneis Formation, ein ähnliches Schichteinfallen.

Die Tunnelportale, bei Tunnelmeter TM 0-180 und TM 6120-6250, sind beide in Alluvium (Lockermaterial und Hangschuttmaterial) gebaut (Abbildung 30). Bei beiden Portalen sind aufgrund von Abforstungen in den letzten 15 Jahren zunehmende Kriechhangbewegungen zu beobachten.

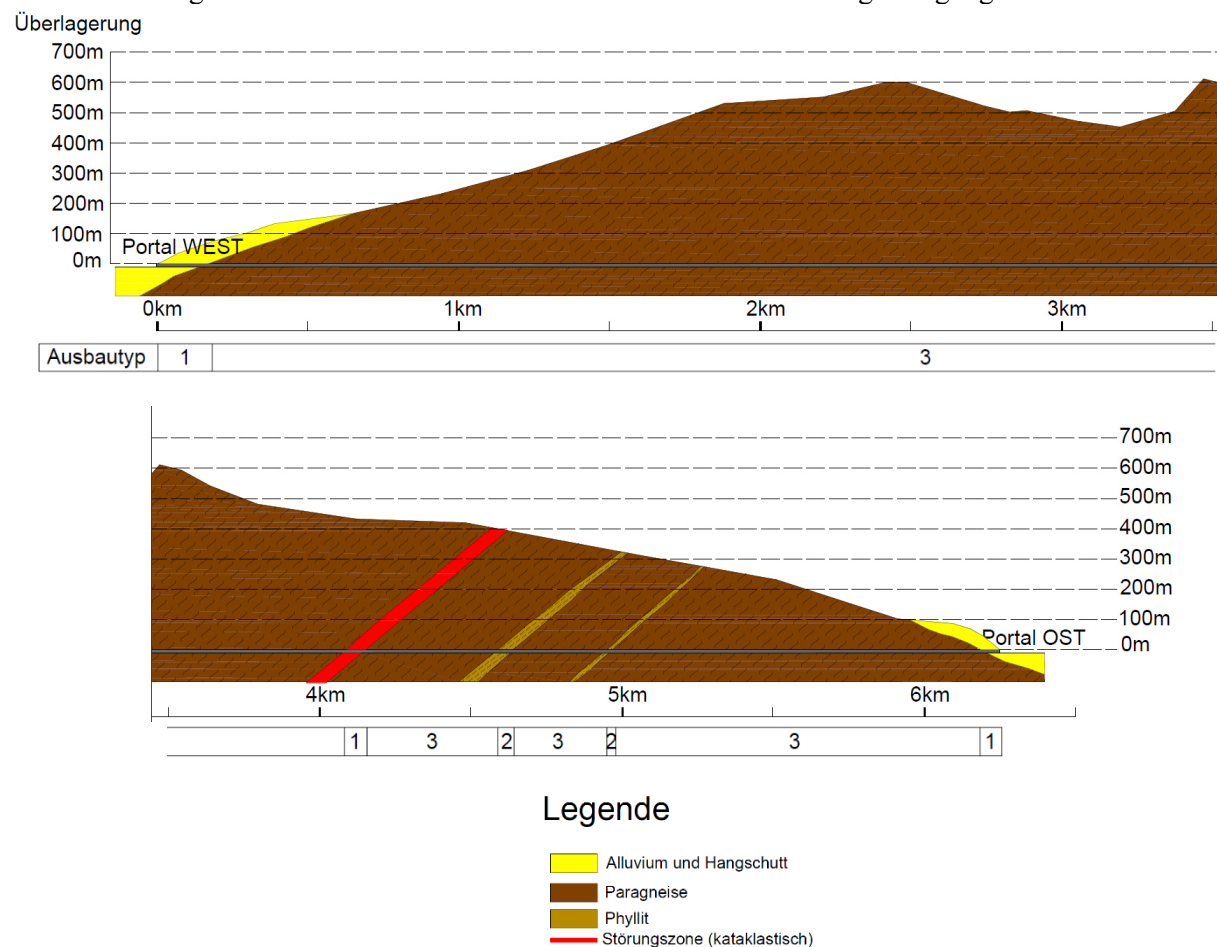


Abbildung 30: Geologischer Längsschnitt des Modelltunnels.

6.3 Schäden

6.3.1 Allgemein

Eine Aufnahme der Schadensbilder und Wasserzutritte erfolgte über Aufzeichnungen des Betriebspersonals, sowie durchgeführte Tunnelkartierungen externer Dienstleister. Diese erlauben eine Betrachtung von Schadensbildern und deren Entwicklung über einen längeren Zeitraum.

Ergänzend dazu wurde ein Tunnellaserscan durchgeführt. Dieser bietet eine Übersicht über den Tunnelzustand und zeichnet zusätzlich die Tunnelgeometrie mit einem 3D-Punktenetz auf. Somit bildet er den Zustand der Tunnellaibung übersichtlich ab und schafft eine wesentliche Planungsgrundlage (Abbildung 31) [14]. Ein Laserscan ist jedoch nur als Momentaufnahme zu betrachten, speziell jahreszeitliche Schwankungen der Wasserzutritte sind in den regelmäßig durchgeführten Beobachtungen des Betriebs zu erkennen.

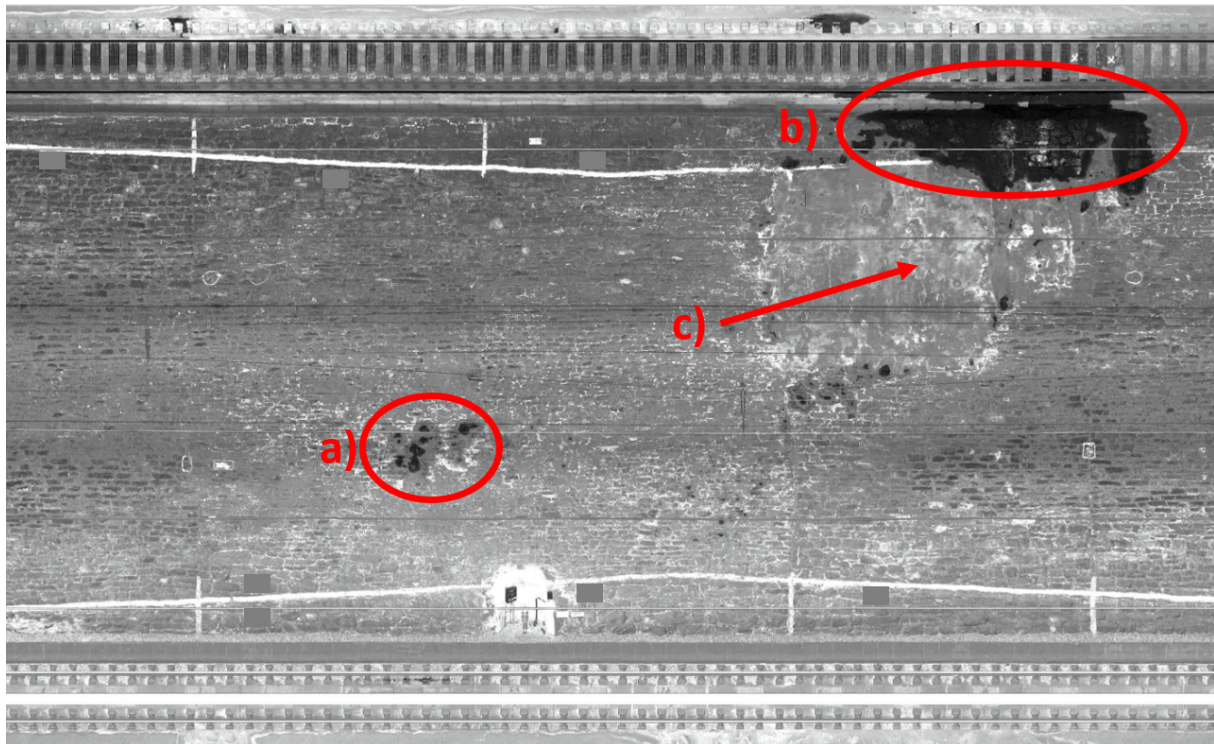


Abbildung 31: Beispielfotografie Laserscanfoto des Modelltunnels [16]. a) Erkennbare Feuchtstellen im Kämpferbereich.
b) Nass-Tropfstelle im Ulmbereich. Das Bergwasser sammelt sich im Bereich des Oberbaus ohne Ableitung.
c) Alte Spritzbetonversiegelung aus vorheriger Instandsetzung.

6.3.2 Schadensbilder und Wasserzutritte

Identifiziert wurden zehn unterschiedliche Schadenstypen wie Rissbildungen, Eisbildungen, Abplatzungen, Versinterungen, etc. (Abbildung 32B).

Wasserzutritte werden durch subjektive Beurteilung in fünf verschiedene Intensitätsklassen im Modelltunnel unterteilt (Abbildung 32A). In der niedrigsten Intensitätsklasse „vereinzelt feucht“ (Abbildung 32A), handelt es sich um einzelne, nicht großflächige Feuchtstellen an der Tunnellaibung, welche keine nennenswerten negativen Einflüsse haben. Bei der Intensitätsklasse „feucht“ (Abbildung 32A) handelt es sich um großflächige Feuchtstellen an der Tunnellaibung, welche bereits negative Auswirkungen auf die Tunnelstruktur haben können. Die Intensitätsklasse „nass“ (Abbildung 32A) zeigt eine großflächige Konzentration von Wassereintritten an der Tunnellaibung an und führt zu negativen Einflüssen, wie Korrosion von Bewehrungen und Ausrüstungsgegenständen. Bei der Intensitätsklasse „tropfend“ (Abbildung 32A) wirkt sich der Wasserzutritt nicht nur auf die Tunnellaibung durch z.B. Eisbildung in den Portalbereichen aus, sondern auch auf den Oberbau (Verschlammung und Aufweichen der Tunnelsohle, Verschiebung der Gleislage, Korrosion der Festen Fahrbahn). In der Intensitätsklasse „rinnend“ (Abbildung 32A) ist ein starker Zutritt von Wasser gegeben, welcher in allen Bereichen der Tunnelkonstruktion zu Schäden führt und den Betrieb erheblich einschränkt.

(A) Kategorisierung Wasserzutritte	(B) Auftretende Schadenstypen
<ul style="list-style-type: none"> • vereinzelt feucht • feucht • nass • tropfend • rinnend 	<ul style="list-style-type: none"> • Eisbildung • Ausbrüche Natursteinmauerwerk • Abplatzungen Spritzbetonschale • Sohlhebung • Verformungen • Längsrisse • Richtungslose, kurze Risse • versinterte Halbschalenentwässerung • schadhafte, versinterte Mittelentwässerung

Abbildung 32: (A) Kategorisierung der Wasserzutritte im Modelltunnel. (B) Kategorisierung der Schadenstypen im Modelltunnel

Die Schadenshäufung und Intensität sind am stärksten in Bereichen der wasserführenden Klüfte, den Portalbereichen, in der kataklastischen Störungszone und den Bereichen mit quellenden Serizitphylliten (Abbildung 34, Abbildung 35, Anhang 9.8). Im Großteil der Tunnelstrecke, welche sich im Paragneis befindet (Abbildung 30), treten nur vereinzelt Schäden wie Abplatzungen im Mauerwerk und der Spritzbetonschale, versinterte Halbschalenentwässerungen und vereinzelte Feuchtstellen auf (Abbildung 34, Abbildung 35, Anhang 9.8).

Gemäß dem Regelwerk der ÖBB „06.01.02: Konstruktiver Ingenieurbau“ [28] befindet sich der Modelltunnel in Zustandsklasse 3-4, also in schlechtem bis sehr schlechtem Erhaltungszustand.

6.3.3 Portalbereiche

Vorhandene Schadensbilder im Portalbereich sind Abplatzungen in den großflächig vorhandenen Spritzbetonversiegelungen (Abbildung 33a), oberflächliche Ausbrüche im Natursteinmauerwerk (Abbildung 33b) durch die teilweise Überschreitung der Festigkeiten des Ausbaues, sowie Frostabsprengungen (Anhang 9.8). Des Weiteren treten in regelmäßigen Abständen Längsrisse auf, bedingt durch die Bewegung des Kriechhanges. Risse ohne bevorzugte Richtung (Abbildung 33d) sind häufig, bedingt durch die Überschreitung der Ausbaufestigkeit (Anhang 9.8).

Durch die zahlreichen Risse findet ein erhöhter Wasserzutritt statt. Dies führt im Winter zu verstärkter Eisbildung (Abbildung 33c) im Bereich der Firste und somit zu betrieblichen Einschränkungen (Anhang 9.8). Weiters sind in den Portalbereichen Halbschalen- und Mittelentwässerungen versintert, das zu einem Aufstau des Bergwassers im Schotteroberbau führt und damit verbunden zu Schäden an der Gleislage und der Tunnelsohle führt (Anhang 9.8).

6.3.4 Kataklastische Störungszone

Die kataklastische Störungszone ist stark wasserführend (Abbildung 34) mit abschnittsweise rinnenden Zutritten im Bauwerk (Anhang 9.8). Schadensbilder in diesem Bereich sind Ausbrüche aus dem Natursteinmauerwerk (Abbildung 33b) und Rissbildungen ohne bevorzugte Richtung (Abbildung 33d), bedingt durch eine Überbeanspruchung der Ausmauerung. Durch den erhöhten Wasserandrang sind die Halbschalenentwässerungen in diesem Bereich versintert (Anhang 9.8).

6.3.5 Serizitphyllit

Ein quellendes Verhalten in den Bereichen des Serizitphyllits trat kurz nach der Fertigstellung des Tunnelbauwerkes auf. Durch mehrere Maßnahmen im nennenswerten Umfang, wie ein Mauerwerksaustausch, sowie eine Spritzbetonversiegelung, wurde den auftretenden Schäden entgegengewirkt. Die Verformungen haben seit zehn Jahren stetig abgenommen und sind nur noch geringfügig (<1mm/Jahr radiale Verformung) vorhanden. Dennoch sind Risse im Ausbau (Abbildung 33d), Abplatzungen (Abbildung 33a, b), eine Einschränkung des Lichtraumprofils durch Deformationen, sowie eine Sohlhebung von fünf Zentimetern das bestehende Schadensbild (Anhang 9.8). Probebohrungen im Sohlbereich haben ergeben, dass die bereits mehrfach erneuerte Ortbetonsohle Risse und eine weit klaffende Sohlfuge, verursacht durch die Sohlhebung, aufweist.

6.3.6 Standfester Fels (Paragneis) im Tunnel

Bedingt durch den standfesten Paragneis treten in dieser Formation wenige Schäden auf. Zu diesen zählen vereinzelte Wasserzutritte und Ausbrüche im Natursteinmauerwerk (Abbildung 33b, Anhang 9.8), sowie Abplatzungen in der lokal vorhandenen Spritzbetonschale (Abbildung 33a, Anhang 9.8). Lediglich in Zonen mit wasserführenden Kluftsystemen bei Tunnelmeter TM 1230-1260, TM 2060-2094, TM 2772-2882, und TM 5742-5780 kommt es zu stärkeren Wasserzutritten und versinterten Halbschalenentwässerungen. (Anhang 9.8).

6.3.7 Schotteroberbau

Der Schotteroberbau befindet sich am Ende der Nutzungsdauer, der Gleisschotter ist weitgehend abgenutzt und die Gleislage befindet sich nicht mehr im vorhergesehenen Sollbereich.



Abbildung 33: Schadensbilder im Modelltunnel. a) Abschalung, Abplatzung, Ausbruch von Spritzbeton. b) Abschalung, Abplatzung, Ausbruch von Natursteinmauerwerk. c) Eisbildung in den Portalbereichen. d) Risse in Mauerwerk. [44].

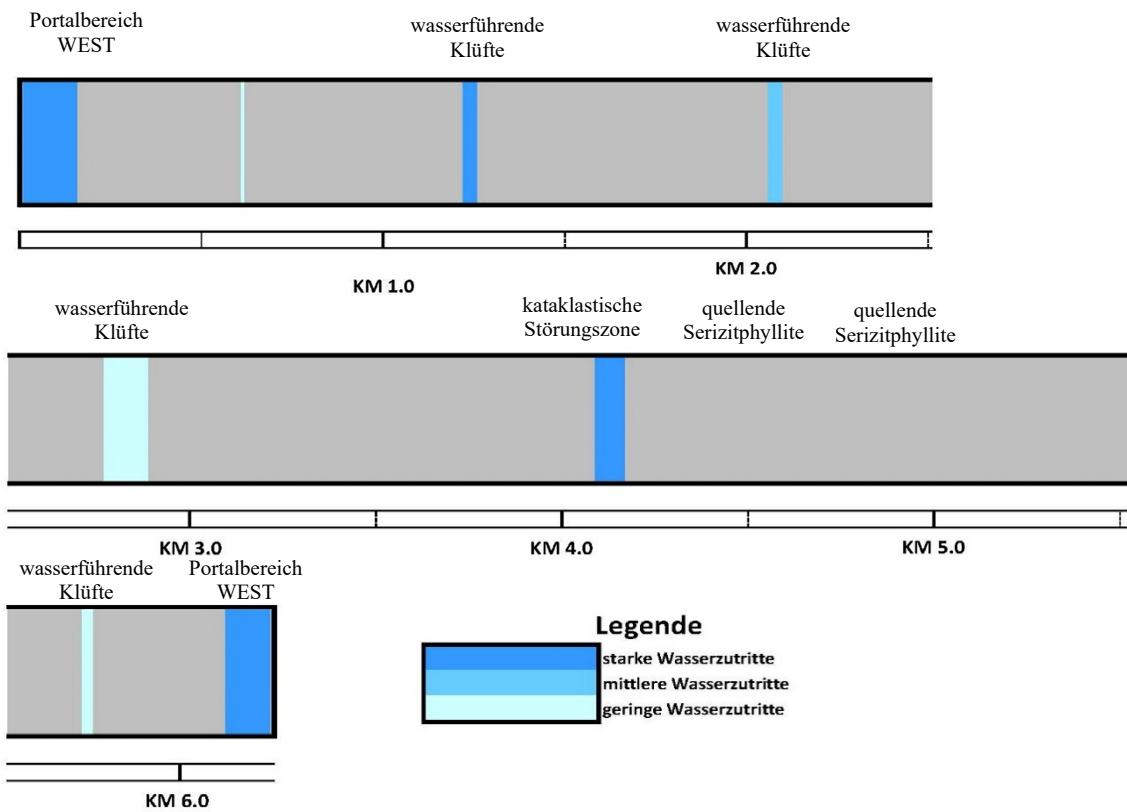


Abbildung 34: Verteilung der Intensität bzw. Häufigkeit von Wasserzutritten. Die Kategorisierung der Wasserzutritte (Abbildung 32A) ist für eine bessere Übersicht in dieser Abbildung in die Intensitäten stark, mittel und gering gegliedert. Die exakte Aufteilung erfolgt gemäß Anhang 9.8.

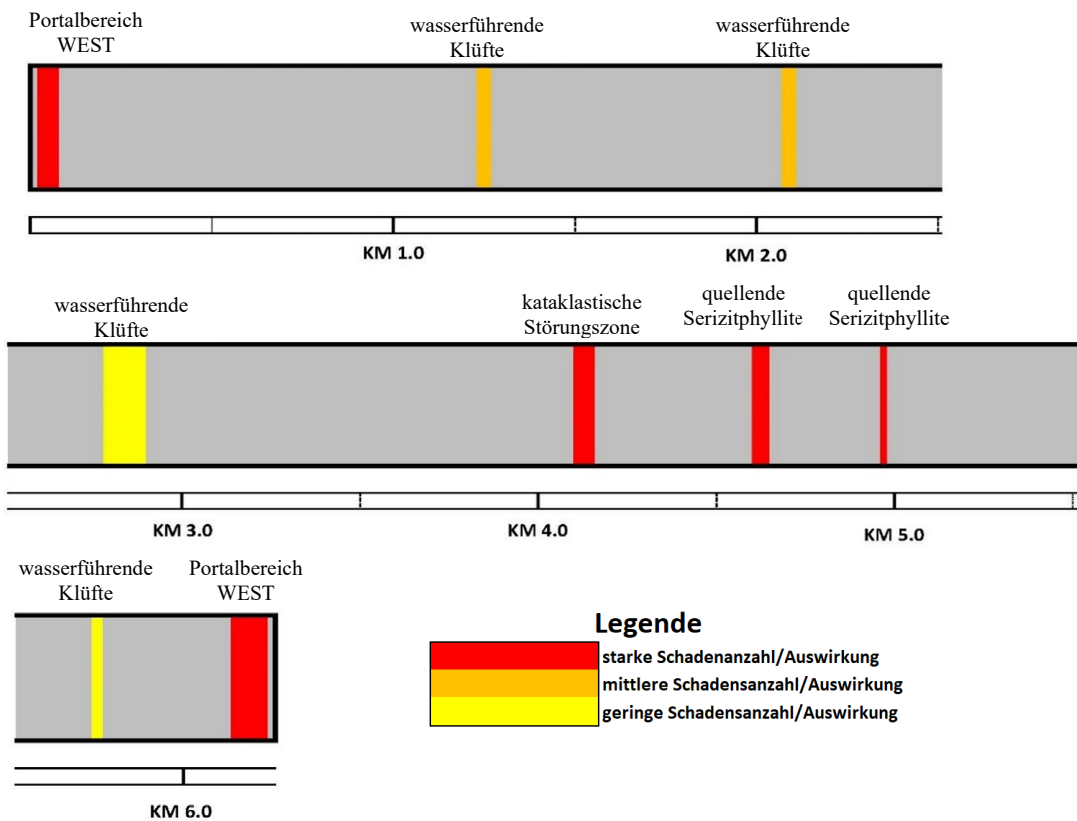


Abbildung 35: Verteilung der Schadensintensität bzw. Häufigkeit entlang des Modelltunnels. Die Kategorisierung der Schadenstypen (Abbildung 32B) ist für eine bessere Übersicht in dieser Abbildung in die Intensitäten stark, mittel und gering gegliedert. Die exakte Aufteilung erfolgt gemäß Anhang 9.8.

6.4 Projektziele

6.4.1 Allgemein

Für einen übergeordneten Projekterfolg bei Infrastrukturprojekten, speziell bei Tunnelinstandsetzungen bzw. Erneuerungen, sind klar definierte Ziele essentiell [45]. Diese werden bei dem Modelltunnel in allgemeine Ziele (Lebensdauer, Dauer einer Vollsperrung, etc.) und spezifische Ziele (Unterbindung der Wasserzutritte, Stabilisation der Portalbereiche, etc.) gegliedert (Abbildung 36). Diese Ziele sind basierend auf der Ist-Situation bzw. den Rahmenbedingungen festgelegt (Abbildung 36).

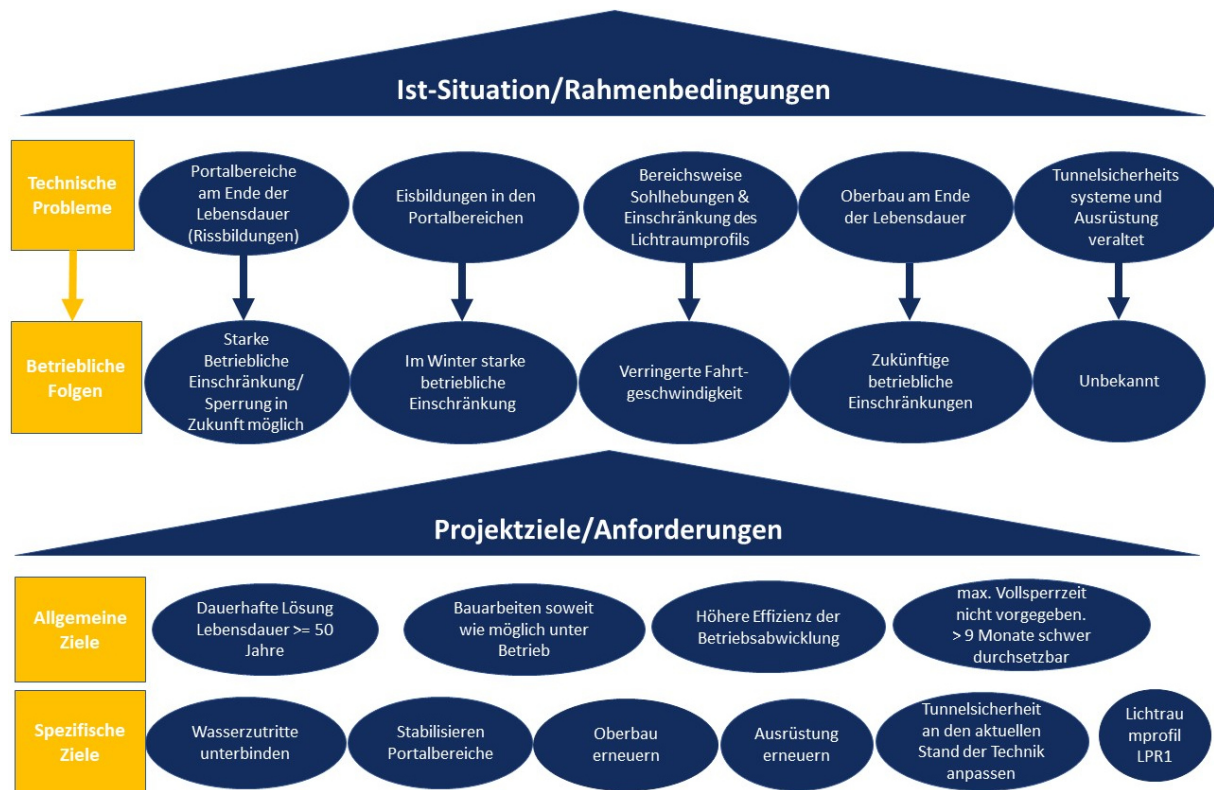


Abbildung 36: Übersicht Situation/Rahmenbedingungen und Projektziele/Anforderungen des Modelltunnels.

Die spannungsbedingte Überlastung in den Portalbereichen ist derzeit nicht kritisch für die Stabilität des Bauwerks. Es kann jedoch bei längerem Zuwarten oder unzureichend gesetzten Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen zu Tragfähigkeitsproblemen kommen, welche ungeplante Total- bzw. Teilsperren erfordern können. Die rinnenden Wasserzutritte in den Portalbereichen und die damit verbundene Eisbildung führt nicht nur zu betrieblichen Einschränkungen, sondern auch zu erhöhten Betriebskosten, bedingt durch die notwendige Entfernung des Eises in den Wintermonaten.

Die umfangreichen Projektziele, wie eine dauerhafte Lösung mit einer Lebensspanne von mehr als 50 Jahren, eine Stabilisierung der Portalbereiche, eine Erneuerung des Oberbaus und eine Unterbindung der Wasserzutritte (Abbildung 36), zusammen mit den umfangreichen Schadensbildern (Abbildung 35), lassen schon zu Beginn des Projektes darauf schließen, dass eine Instandsetzung nicht zielführend ist. Das Projekt ist als Teil- oder Vollerneuerung durchzuführen.

6.4.2 Vorgabe-Lichtraumprofil

Um den sicheren Betrieb von schienengebundenen Fahrzeugen zu ermöglichen, regelt ein Lichtraumprofil den Raum, der unbedingt frei- und aufrechtzuerhalten ist. Im Wesentlichen definiert das gewählte Lichtraumprofil Rechenregeln und Prüfbedingungen für die Begrenzungslinien von Schienenfahrzeugen [46].

Das Lichtraumprofil eins (LPR1; Abbildung 37) ist jenes Lichtraumprofil der ÖBB, welches den meisten Schienenfahrzeug-Typen die Durchfahrt ermöglicht [46] und wird deshalb als Projektziel für den Modelltunnel festgelegt (Abbildung 36). Darüber hinaus ist das Lichtraumprofil LPR1 im NEP für die Strecke des Modelltunnels empfohlen.

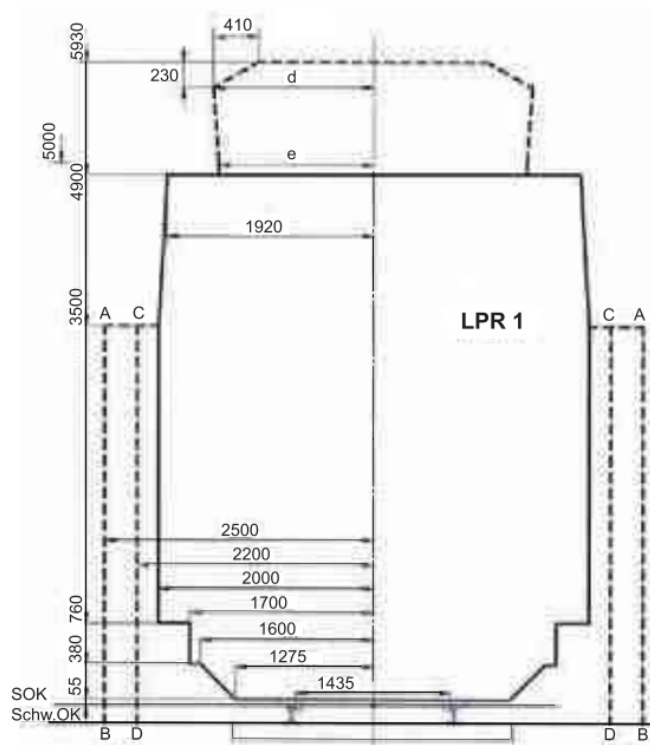


Abbildung 37: Maße in [mm]. Lichtraum LPR 1 inkl. Seitenräume für $R \geq 250$ m in Anwendung bei der ÖBB [46].

6.5 Variantenstudie

6.5.1 Allgemein

Die Planungstätigkeit ist ein dynamischer Prozess, welcher am Anfang mehrere Varianten untersucht und je nach Projektzielen und Rahmenbedingungen eine Vorzugsvariante bestimmt [45].

Die dargestellten Varianten (Abbildung 38) erheben keinen Anspruch auf eine vollständige Auflistung aller technischen Möglichkeiten beim Modelltunnel oder vergleichbaren Tunnelbauwerken. Sie sollen einen Überblick geben, welche Varianten für eine Instandsetzung bzw. Erneuerung des Modelltunnels möglich sind und als Entscheidungsgrundlage für die Variantenfindung dienen. Kosten, Verlängerung der Nutzungsdauer, Einschränkungen des Betriebes und Zukunftssicherheit werden aufgrund von Erfahrungen abgeschätzt und qualitativ bewertet (Abbildung 47).



Abbildung 38: Variantenaufstellung für den Modelltunnel und vergleichbare Bauwerke.

6.5.2 Ausführungen zu den Varianten

Variante 0: Die Variante 0 ist die sogenannte Nullvariante, d.h. es werden nur die nötigsten Instandsetzungsarbeiten in den Hauptschadensbereichen durchgeführt, um weiterhin einen sicheren Bahnbetrieb gewährleisten zu können. Eine wesentliche Verlängerung der Nutzungsdauer ist mit dieser Variante nicht gegeben. Zur wichtigsten Maßnahme für einen zukünftig sicheren Betrieb gehört die Stabilisation der Portalbereiche (Abbildung 39), sowie die Unterbindung der Eisbildungen. Des

Weiteren werden Instandsetzungsarbeiten im Bereich der quellenden Serizitphyllite, der kataklastischen Störungszone und des Oberbaus umgesetzt (Abbildung 39). Technische Maßnahmen für die Variante 0 könnten beispielsweise Injektionen, Aussteifungen, Spritzabdichtungen und Spritzbetonschalen sein.

Die allgemeinen und spezifischen Ziele des Projektes (Abbildung 36) können mit dieser Variante größtenteils nicht erreicht werden, des Weiteren ist die Zukunftssicherheit nicht gegeben (Abbildung 47). Im Vergleich zu den anderen Varianten ist sie die kostengünstigste und schnellste Möglichkeit, jedoch bringt auch sie betriebliche Einschränkungen in Form von Vollsperrungen und Teilsperren mit sich (Abbildung 47).

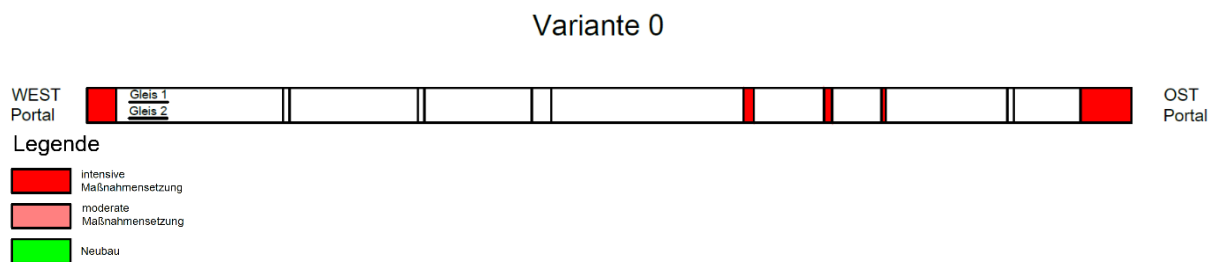


Abbildung 39: Schematische Skizze der Instandsetzungen bei Variante 0.

Variante 1: Der Bestandstunnel wird aufgelassen und stattdessen ein zweiröhriger Eisenbahntunnel errichtet (Abbildung 40). Der Bestandstunnel erfüllt entweder keine Funktion mehr oder er kann mit einer Instandsetzung, ähnlich wie bei Variante 0, weiterhin als Umfahrungsstrecke genutzt werden. Eine Sperre der Strecke während der Bauphase ist nicht notwendig, da der Bestandstunnel so lange betrieblich genutzt werden kann, bis das Neubauwerk fertiggestellt ist.

Die Vorteile dieser Variante liegen in einer stark erhöhten Nutzungsdauer durch den Bau eines neuen Tunnelbauwerks, einer problemlosen Anwendung des aktuellen Standes der Technik, besonders in Bezug auf Tunnelsicherheit, Lichtraumprofile und erhöhte Streckenauslastung. Die allgemeinen und spezifischen Ziele werden erfüllt und bereichsweise übertroffen (Abbildung 47). Jedoch sind die Kosten der Variante 1, verglichen zu den anderen Varianten, am höchsten (Abbildung 47).

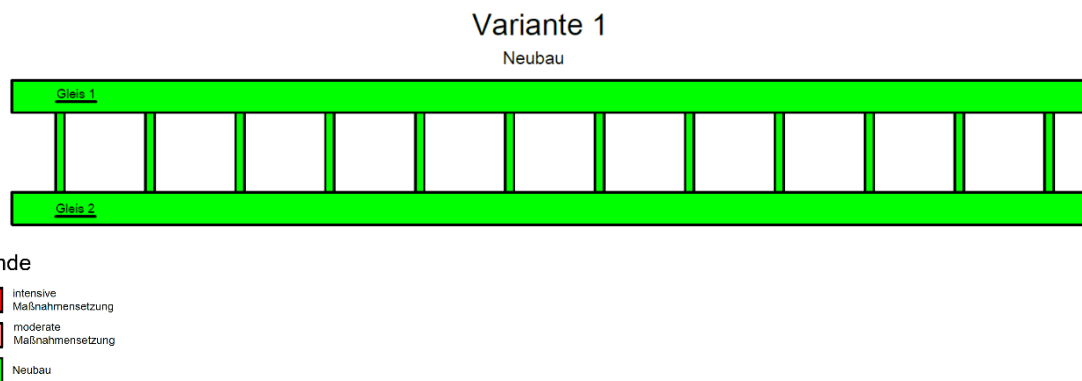


Abbildung 40: Schematische Skizze Neubau zweiröhriger Tunnel der Variante 1.

Variante 2: Diese Variante besteht aus einem zweiröhrigen Tunnelsystem, wobei der Bestandstunnel als zweite Röhre genutzt wird (Abbildung 41). Dieser wird im Zuge einer Vollerneuerung auf einen eingleisigen Betrieb umgebaut. Alle Schadensbereiche wie die Portalbereiche, die quellenden Serizitphyllite, die kataklastische Störungszone und wasserführenden Klüfte, werden umfangreich erneuert (Abbildung 41). Zielführend dafür sind Maßnahmen wie statisch wirksame Spritzbeton- bzw. Ortbetonschalen, Abdichtungen, Aussteifungen, Injektionsmaßnahmen, etc. Die zweite Tunnelröhre wird nach dem aktuellen Stand der Technik als Neubau ausgeführt und mit Querschlägen zum Bestandstunnel verbunden (Abbildung 41). In beiden Tunnelröhren ist das Lichtraumprofil LPR1 möglich.

Ähnlich wie Variante 1 bietet Variante 2 eine wesentliche Erhöhung der Nutzungsdauer und eine Zukunftssicherheit durch die Möglichkeit der Nutzung des Lichtraumprofils LPR1. Außerdem kommt es zu keinen betrieblichen Einschränkungen während der Bauphase und bei einer zukünftig stärkeren Befahrung bietet Variante 2 hohe Auslastungsreserven. Die allgemeinen und spezifischen Ziele (Abbildung 36, Abbildung 47) werden erfüllt und teilweise übertroffen. Verglichen zu den anderen Varianten sind die geschätzten Kosten am zweithöchsten (Abbildung 47).

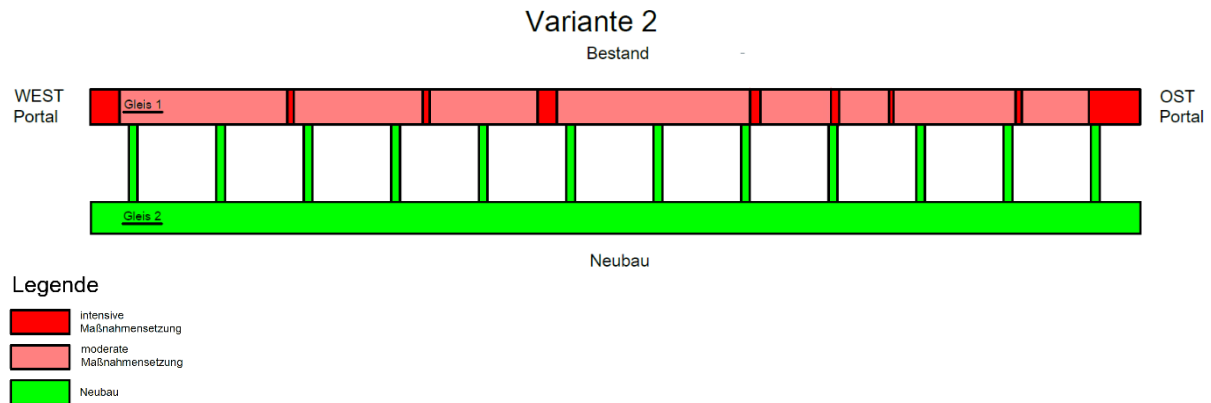


Abbildung 41: Schematische Skizze der Vollerneuerung am Bestandstunnel und Neubau zweite Röhre.

Variante 3: Der Bestandstunnel wird minimal instandgesetzt und umgerüstet (Abbildung 42), um die Funktionen eines Rettungsstollens erfüllen zu können. Hierzu wird der Oberbau entfernt, die Portalbereiche mit minimalem Aufwand stabilisiert und die entsprechende Tunnelsicherheitstechnik nachgerüstet. Der Betrieb wird über einen zweigleisigen Neubautunnel abgewickelt, welcher mit Querschlägen zum Rettungsstollen verbunden wird (Abbildung 42). Sperren sind während der Bauphase nicht notwendig, der Zugverkehr wird weiter über den Bestandstunnel geführt, bis der Neubau abgeschlossen ist.

Ein Pluspunkt dieser Variante ist, dass im Gegensatz zur Variante 1 und 2 keine umfangreiche Erneuerung des Bestandstunnels notwendig wird. Die weiteren Vorteile sind ident wie bei Variante 1 und 2 (Lichtraumprofil LPR1 ist möglich, keine betrieblichen Einschränkungen während der Bauphase, Erfüllung der allgemeinen und spezifischen Projektziele, etc.; Abbildung 36, Abbildung 47). Lediglich die allgemeine Tunnelsicherheit ist durch einen zweigleisigen Betrieb in einer Röhre geringer, verglichen mit einem zweigleisigen Betrieb in zwei getrennten Tunnelröhren, bedingt durch die Kollisionsgefahr von zwei entgegenkommenden Züge [1].

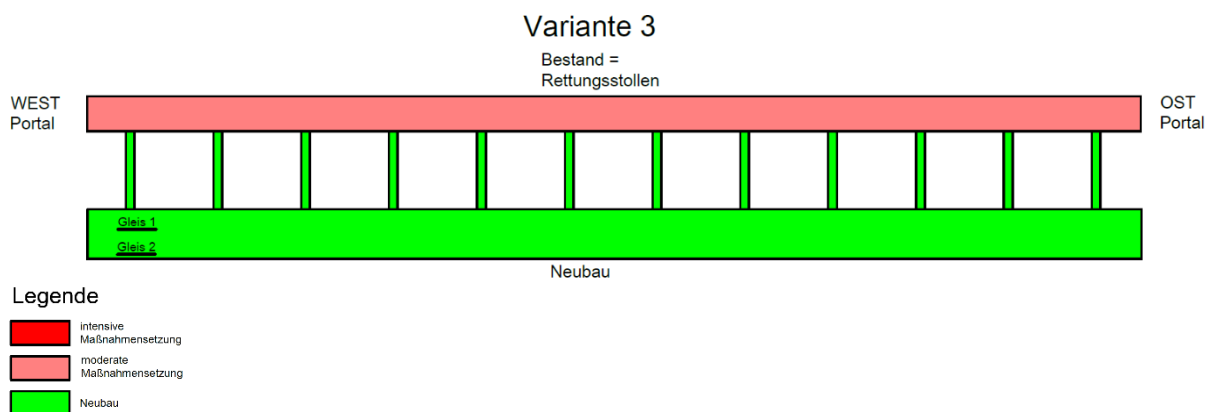


Abbildung 42: Schematische Skizze des Rettungsstollens (Bestandstunnel) und Neubau zweite Röhre.

Variante 4: Bei dieser Variante wird der Bestandstunnel einer Vollerneuerung, inklusive einer Aufweitung, unterzogen (Abbildung 43). Die Aufweitung ist notwendig, um im vorhandenen Querschnitt einen zweigleisigen Betrieb mit dem Lichtraumprofil LPR1 zu ermöglichen. Für die Aufweigungsarbeiten kann, aufgrund der Bauwerkslänge von über 6km, keine TiT-Methode verwendet werden [43]. Somit ist ausgeschlossen, dass die Aufweigungsarbeiten unter Betrieb stattfinden können.

Für die Aufweitungen können z.B. Profilsägen oder Fräsköpfe verwendet werden. Geht man von einer nötigen Aufweitung von radial 40-50cm aus und dem gegenübergestellt Gewölbestärken von 50-115cm, je nach Druckprofil (Anhang 9.1), resultiert dies in einer vorübergehend massiven Schwächung bis zur völligen Wirkungslosigkeit des Ausbaues. Hierfür sind abschnittsweise Systemankerungen, Voraussicherungen, Injektionen und Spritzbetonschalen zur Stabilisation notwendig. Dies verdeutlicht, dass solche Arbeiten nur unter sehr hohem Aufwand während einer Vollsperrung möglich sind, welche verglichen zu den Varianten 5-7, erheblich länger andauern würden.

Eine wesentliche Verlängerung der Nutzungsdauer, die Zukunftssicherheit und die teilweise Erfüllung der allgemeinen und spezifischen Projektziele sind mit dieser Variante gegeben (Abbildung 47). Nachteile sind eine hohe baubedingte Betriebseinschränkung, eine Vollsperrung, welche nach erster Abschätzung länger als neun Monate dauert und hohe Kosten verursacht (Abbildung 47, Abbildung 36).

Variante 4

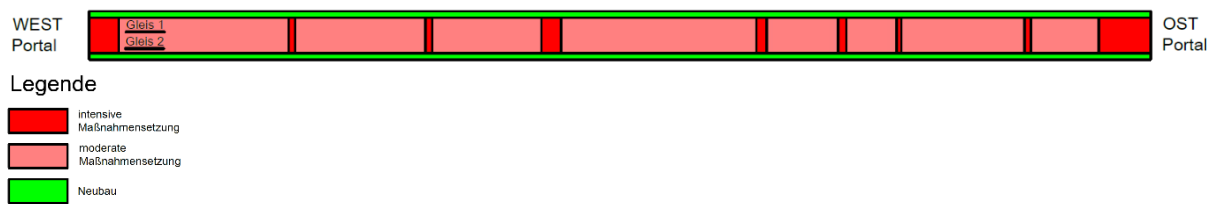


Abbildung 43: Schematische Skizze der Vollerneuerung und Aufweitung des Bestandstunnels.

Variante 5: Es erfolgt eine Vollerneuerung des Bestandstunnels mit der Beibehaltung des zweigleisigen Betriebskonzeptes (Abbildung 44). Die Maßnahmen sind, bis auf die Aufweitung, ident zu Variante 4. Es werden alle Schadensbereiche in den Portalbereichen, den quellenden Serizitphylliten, der kataklastischen Störungszone, sowie den wasserführenden Klüften erneuert (Abbildung 41). Geeignet dafür sind beispielsweise statisch wirksame Spritzbeton- bzw. Ortbetonschalen, Abdichtungen, Aussteifungen, Injektionsmaßnahmen, Entwässerungsmaßnahmen, etc. Im Bestandstunnel ist das Lichtraumprofil eng bemessen, sodass zusätzliche Einbauten, wie Spritzbeton- oder Ortbetonschalen, das Lichtraumprofil in einer Weise einschränken, dass dieses nicht mehr eingehalten werden kann. Daher muss das Mauerwerk des Modelltunnels um jene Stärke vorab aufgeweitet werden, welche die neuen Einbauten platztechnisch einnehmen.

Diese Aufweitungen resultieren in einer bereichsweisen statischen Schwächung des Ausbaues und somit, verglichen mit Variante 6 und 7, in einem höheren Aufwand. Der Vorteil an dieser Variante, verglichen mit Variante 1-4, sind die geringeren Kosten (Abbildung 47) und der geringere Umfang. Die Variante ist nur bedingt, aufgrund der Nichtverwendung des Lichtraumprofils LPR1, zukunftsfähig. Voll- und Teilsperren sind bei den angewandten Maßnahmen nicht vermeidbar und verglichen zu Variante 0-3, schlechter zu bewerten (Abbildung 47). Die Übereinstimmung mit den allgemeinen und spezifischen Zielen ist als befriedigend zu beurteilen (Abbildung 47).

Variante 5

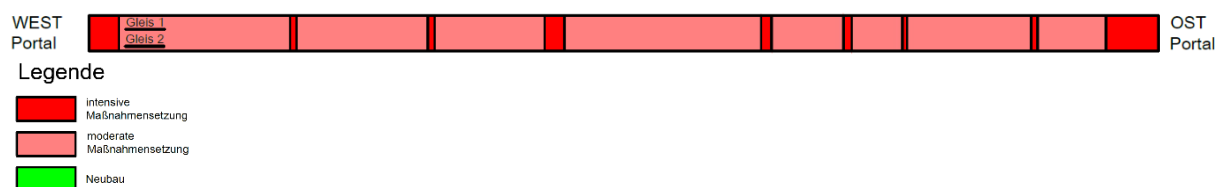


Abbildung 44: Schematische Skizze der Vollerneuerung Bestandstunnels zweigleisig.

Variante 6: Eine Vollerneuerung des Bestandstunnels und ein Rückbau auf einen eingleisigen Betrieb, ähnlich zu Variante 2 (Abbildung 41), wird vorgenommen (Abbildung 45). Die zielführenden technischen Maßnahmen sind vergleichbar zu Variante 2 und 5.

Für diese Variante sprechen die niedrigen Kosten im Vergleich zu Variante 1-4, der geringere Umfang zu Variante 5, sowie eine wesentliche Erhöhung der Nutzungsdauer und Zukunftssicherheit durch die Nutzung des Lichtraumprofils LPR1 (Abbildung 47). Nachteilig ist, dass trotz einer Optimierung der Tunnelausrüstung, die Auslastung des Tunnels nicht gesteigert werden kann. Außerdem sind betriebliche Einschränkungen durch Vollsperrungen und Teilsperren während der Bauphase nicht zu vermeiden. Jedoch kann eine zweite Röhre, ähnlich wie bei Variante 2 (Abbildung 41), nachträglich gebaut werden, falls dies die Netzplanung aufgrund von geplanten Auslastungssteigerungen erfordert.

Variante 6

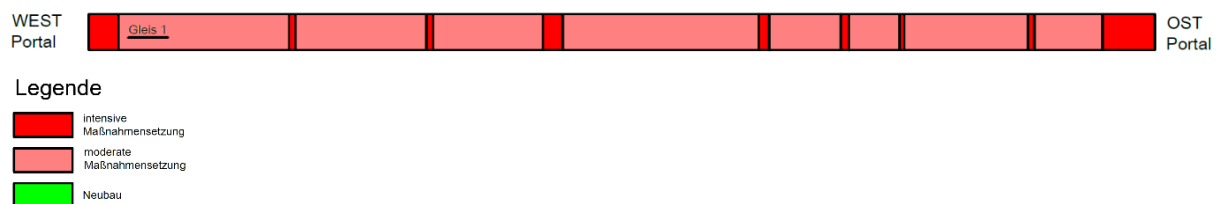


Abbildung 45: Schematische Skizze der Vollerneuerung Bestands-tunnels zweigleisig.

Variante 7: Diese Variante entspricht im Wesentlichen einer abgeminderten Version von Variante 5 (Abbildung 44, Abbildung 46). Teilerneuerungsmaßnahmen werden in den Portalbereichen, den quellenden Serizitphylliten, der kataklastischen Störungszone und den Bereichen mit wasserführenden Klüften durchgeführt (Abbildung 46, Abbildung 35). Die zielführenden technischen Maßnahmen sind ähnlich der Variante 5, aus Kostengründen werden sie jedoch in begrenzter Form umgesetzt.

Vorteilhaft an dieser Variante sind die im Vergleich zweitniedrigsten Kosten und eine geringe baubedingte, betriebliche Einschränkung. Von Nachteil sind die nur befriedigende Übereinstimmung mit den allgemeinen und spezifischen Projektzielen, die geringe Zukunftssicherheit, sowie eine beschränkte Verlängerung der Nutzungsdauer (Abbildung 47).

Variante 7

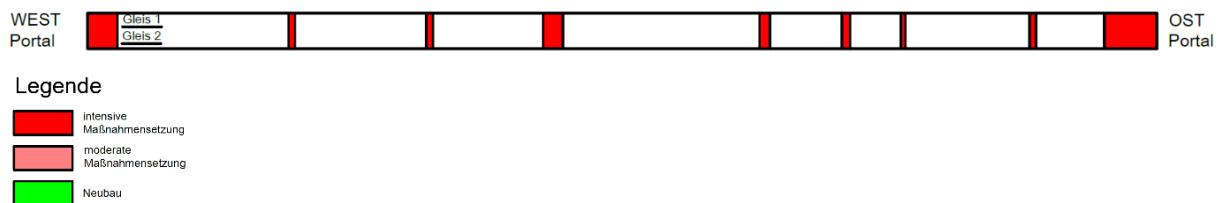


Abbildung 46: Schematische Skizze der Teilerneuerung Bestands-tunnels zweigleisig.

6.5.3 Festlegung und Entscheidungsfindung

	Verlängerung Nutzungsdauer	Baubedingte Einschränkung	Zukunfts- sicherheit	Kosten	Allgemeine & spezifische Ziele	Bewertungs- schnitt
Variante 0	5	2	5	1	4	3,4
Variante 1	1	1	1	5	1	1,8
Variante 2	1	1	1	5	1	1,8
Variante 3	1	1	1	4	1	1,6
Variante 4	2	5	2	4	3	3,2
Variante 5	2	3	4	2	3	2,8
Variante 6	2	3	2	2	2	2,2
Variante 7	4	2	4	1	3	2,8

Bewertungssystem

1	Sehr gut
2	Gut
3	Befriedigend
4	Genügend
5	Nicht Genügend

Abbildung 47: Bewertungsmatrix der Varianten, beurteilt auf einer Skala von 1 bis 5.

Für die Entscheidungsfindung, welche Variante weiterverfolgt werden soll, wurde eine Bewertungsmatrix für den Modelltunnel erstellt (Abbildung 47). Diese beinhaltet die Kriterien Verlängerung der Nutzungsdauer, baubedingte Einschränkung, Zukunftssicherheit, sowie Kosten und Erfüllung der spezifischen Ziele, welche qualitativ nach Schulnotensystem 1-5 bewertet werden (Abbildung 47).

Jene Varianten, welche mit der Note 5 in einem oder mehreren Bereichen beurteilt sind, werden von Anfang an ausgeschlossen. Dies trifft auf die Varianten 0-2 und Variante 4 zu (Abbildung 47), welche bereichsweise mit „Nicht Genügend“ gegenüber den Projektanforderungen zu beurteilen sind.

Unter den restlichen Optionen hat Variante 3 den besten Bewertungsschnitt mit 1.6 gefolgt von Variante 6 mit 2.2 (Abbildung 47). Somit sind diese Varianten gegenüber Variante 5 und 7 zu bevorzugen. Bei genauer Analyse der Bewertungen von Variante 6 und 3 zeigt sich, dass Variante 3 zwar den besseren Bewertungsschnitt aufweist, aber auch wesentlich höhere Kosten als Variante 6 besitzt (Abbildung 47). Variante 3 hingegen erfüllt alle Projektanforderungen im Durchschnitt am besten, ohne bei einem Bewertungskriterium mit „Genügend“ beurteilt zu werden (Abbildung 47). Ein weiterer Vorteil, der für Variante 6 gegenüber Variante 3 spricht, ist die eingebaute Flexibilität. Die Option, dass nachträglich eine zweite Röhre ohne Betriebseinschränkung gebaut werden kann, wie bei Variante 2 (Abbildung 41), gleicht die Schwachpunkte der Variante 6 gegenüber Variante 3 aus.

Somit ist unter Betrachtung der berücksichtigten Gesichtspunkte die Variante 6 jene Option, welche in dieser Arbeit weiterverfolgt wird.

6.6 Technischen Maßnahmen

6.6.1 Allgemein

Die in der Variantenstudie ermittelte Variante 6 wird für das konkrete bautechnische Konzept weiter unterteilt in eine nachhaltige (6A), moderate (6B) und minimale Variante (6C). Diese unterscheiden sich im Umfang der Maßnahmen, dabei werden konkret die Regelmaßnahmen (RM) und die Anwendungslänge variiert (Abbildung 48).

Die Ausarbeitungen in dieser Arbeit sollen mit der Planungstiefe eines komprimierten Vorprojektes vergleichbar sein. Daher wird bei den Plänen der Regelmaßnahmen und des Oberbaus darauf verzichtet, sich auf Detailplanungen zu konzentrieren. Die Fokussierung liegt bei den gesetzten Hauptmaßnahmen (Tunnelschale, Entwässerungs- und Abdichtungskonzept, Ankerungen, etc.).

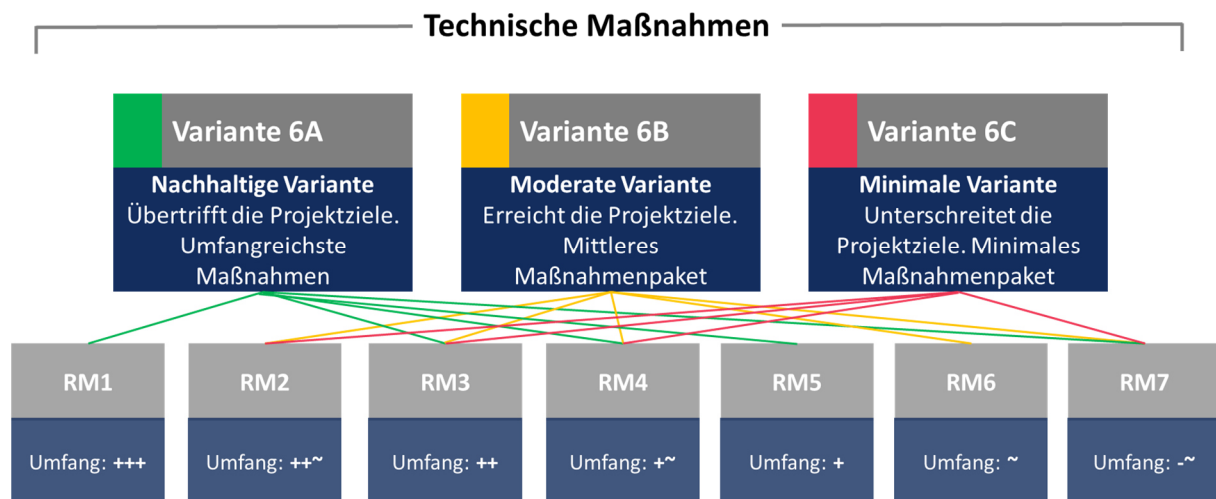


Abbildung 48: Überblick der verschiedenen Varianten und den Regelmaßnahmen (RM). Die Symbole „+, ~, -“ repräsentieren den Umfang der RM.

Durch den Umfang der gesetzten Maßnahmen handelt es sich bei den im Modelltunnel gemäß dem STUVA Sachstandsbericht 2021 [43] um eine bereichsweise Vollerneuerung. Die minimale Variante 6C unterschreitet die geforderten Projektziele (Abbildung 36, Abbildung 48), weshalb sie vorab ausgeschieden und nicht mehr weiter behandelt wird.

6.6.2 Regelmaßnahme 1 und 2 (RM1, RM2)

Erneuerungskonzept im Bereich der Kriechhänge

Kriechhänge sind eine spezielle geotechnische Herausforderung, daher sind einzelne bautechnische Maßnahmen meist unzureichend, um den Kriechvorgang zu stoppen. Numerische, sowie analytische Berechnungen, können Kriechhänge nur unzureichend abbilden. In der Praxis hat sich daher gezeigt, dass eine Kombination aus verschiedenen Maßnahmen (z.B. Entwässerungen, Ankerwände, Injektionen, etc.), gekoppelt mit der Beobachtungsmethode, zielführend sind. Dies ist die sogenannte semi-empirische Dimensionierung [5].

Für die Portalbereiche des Modelltunnels wird daher eine Kombination aus mehreren Maßnahmen vorgesehen: Absenkung des Grundwasserspiegels durch Mehrfachbrunnen, Wiederaufforstung im Kriechhang (Wurzeln wirken stabilisierend und entwässernd), sowie Ankerungen oder Injektionssäulen durch die Gleitfläche der Kriechbewegung (Abbildung 49). Der Erfolg der Maßnahmen wird mit geotechnischen Messungen nach dem Stand der Technik überwacht (z.B. Inklinometer, Piezometer, Messanker, Verschiebungsmessungen) und falls notwendig mit einer semi-empirischen Dimensionierung neue Maßnahmen zur Kriechhangstabilisierung gesetzt. Vorgezogen zu der Erneuerung des Modelltunnels, werden diese Maßnahmen umgesetzt.

Die Baumaßnahmen im Tunnel sind in den schwierigen geotechnischen Bedingungen des Kriechhangs abzuwiegen (Abbildung 49). Injektionsmaßnahmen (Abbildung 49) des umliegenden Lockermaterials wirken sich mit großer Wahrscheinlichkeit positiv auf die Stabilität des Bauwerkes aus und vermindern die Kriechhangproblematik. Jedoch hat die praktische Erfahrung bei Injektionen gezeigt [4], dass

nachträgliche Injektionen sehr aufwendig sind und nur unter extensiven Materialaufwänden zu den gewünschten Ergebnissen führen. Hohlräuminjektionen bzw. Kontaktinjektionen [33] (Abbildung 49) sind sinnvoll, wenn das vorhandene Mauerwerk Hohlräume aufweist, die stabilisiert werden sollen. Dies ist im Fall der spannungsbedingten Überbeanspruchung im Modelltunnel zweckmäßig. Da aber eine statisch wirksame Spritzbetonschale mit 40cm Dicke in der Variante 6B und eine Ortbetonschale mit 35cm Dicke plus eine Spritzbetonschale mit 20cm Dicke in der Variante 6A vorgesehen ist (Abbildung 49, Abbildung 50), und diese die Druckkräfte aufnehmen, ist eine zusätzliche Injektion des Mauerwerks nicht erforderlich. Dasselbe Prinzip gilt auch bei den Rissverpressungen (Abbildung 49). Die neue statisch wirksame Tunnelschale macht die Notwendigkeit dieser Maßnahme obsolet, bedingt durch die Aufnahme der wirkenden Kräfte. Die Tragfähigkeit ist mit den vorgegebenen Ausbaudicken ausreichend, sodass Aussteifungen (Abbildung 49) nicht notwendig sind.

Aufgrund der starken Wasserzutritte und Eisbildungen in den Portalbereichen (Abbildung 34) ist ein flächiges und widerstandsfähiges Abdichtungssystem notwendig. Dies wird am besten mit einer Tunnelabdichtung (mit einer KDB) und Ulmendrainage, in Kombination mit einer statisch wirksamen Innen- bzw. Spritzbetonschale erreicht (Abbildung 49, Abbildung 50). Um die Kohäsion im umliegenden Hangschutt zu erhöhen, ist eine System- und Sohlankerung vorzusehen (Abbildung 49, Abbildung 50). Des Weiteren dient die Systemankerung zur Erhöhung der globalen Standsicherheit und Systemduktilität [46].

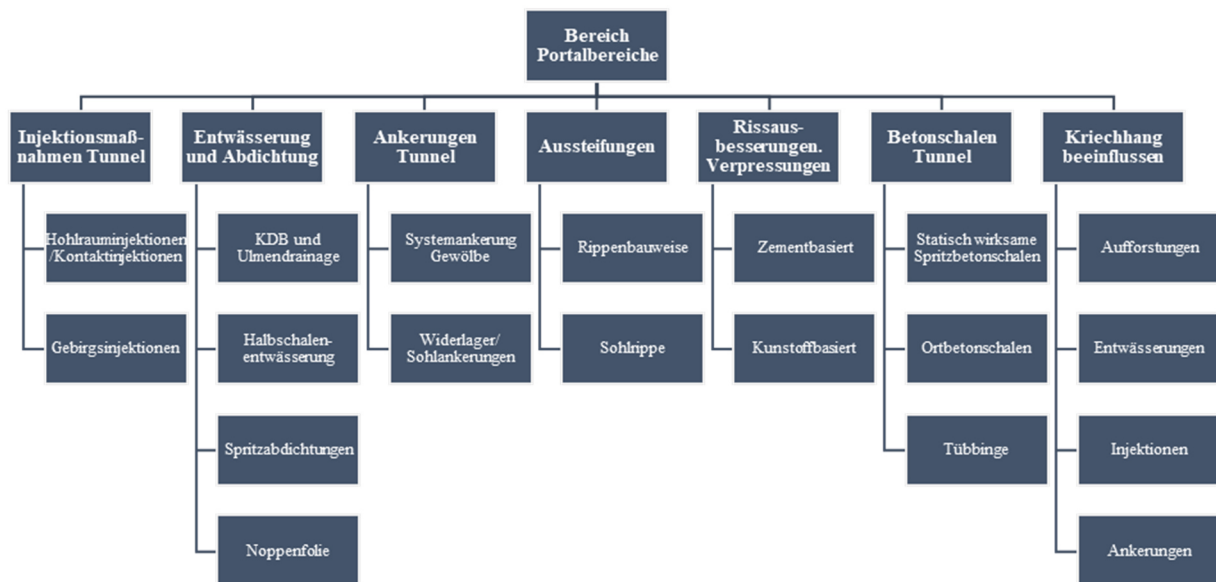


Abbildung 49: Optionsbaum für die Portalbereiche.

Die nachhaltige Variante 6A und die moderate Variante 6B sind größtenteils identisch, der einzige Unterschied liegt in der Ausgestaltung der Tunnelschale. In der nachhaltigen Variante 6A ist eine 20cm Spritzbeton- und eine 35cm bewehrte Ortbetonschale vorgesehen (Abbildung 50), die Spritzbetonschale dient als zusätzliche Tragfähigkeitsreserve. Bei der moderaten Variante 6B wird ausschließlich eine 40cm Spritzbetonschale eingesetzt (Abbildung 50).

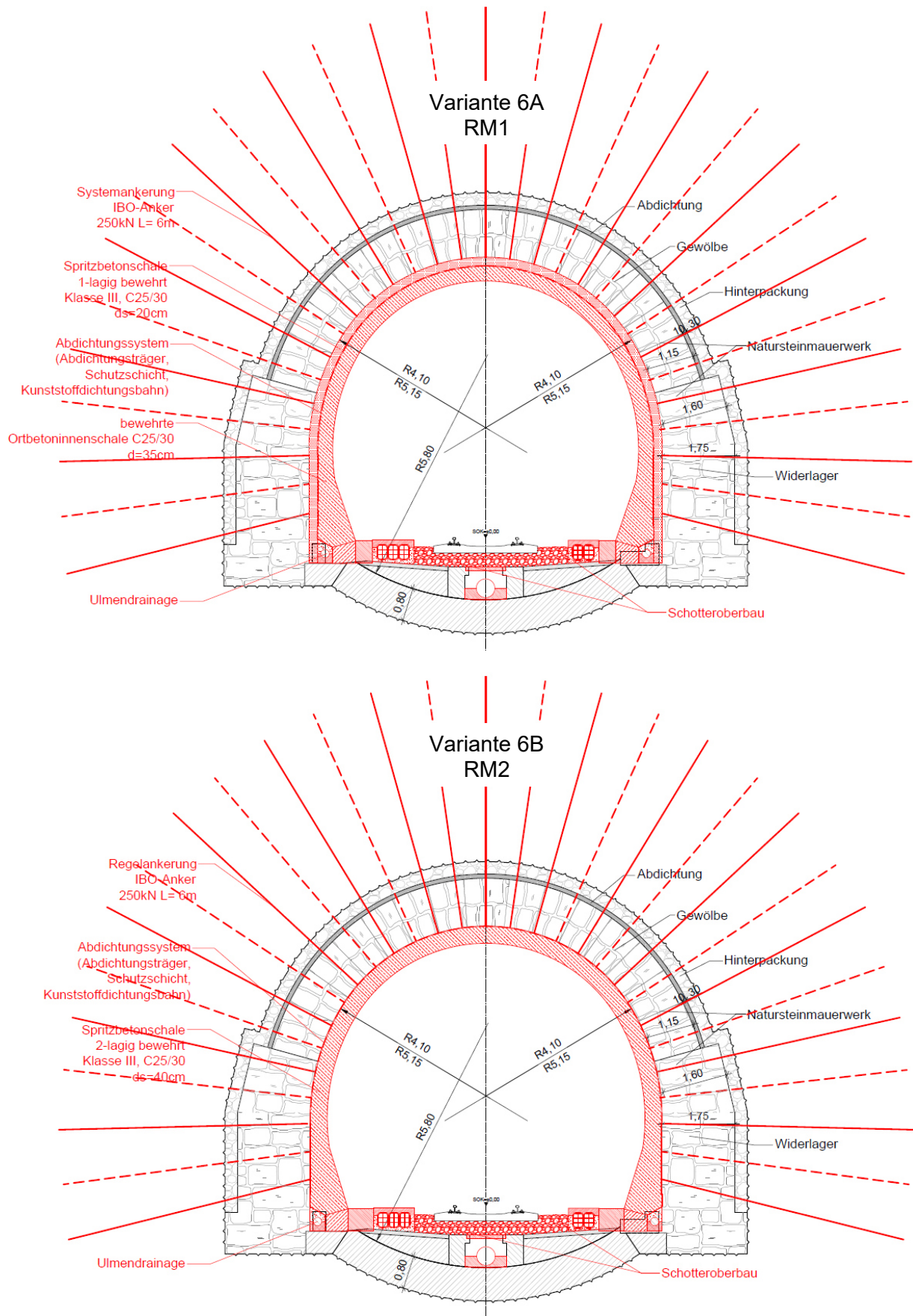


Abbildung 50: **Variante 6A**. RM1 in den Portalbereichen: TM (0-160; 6120-6250) mit dem Ausbautyp 1: Schweres Druckprofil.
Variante 6B. RM2 in den Portalbereichen: TM (0-160; 6120-6250) mit dem Ausbautyp 1: Schweres Druckprofil.

6.6.3 Regelmaßnahme 3 (RM3)

Erneuerungskonzept im Bereich der kataklastischen Störungszone

Hohe Steifigkeiten ziehen nach den Prinzipien der NATM hohe Gebirgsspannungen an [25; 37], daher ist es nicht zielführend in einer Störungszone einen steifen Ausbau vorzusehen. Aussteifungen wie eine Rippen-, eine Sohlrippenbauweise oder Tunnelschalen, wie steife Ortbetonschalen oder Fertigschalen, sind daher nicht empfohlen (Abbildung 51). Stattdessen sind geringer steife Spritzbetonschalen anzuwenden (Abbildung 51, Abbildung 52). Dennoch muss der Ausbau die lokal vorhandene Überbeanspruchung der Ausmauerung ausgleichen können. Geeignet ist hierfür eine statisch wirksame Spritzbetonschale, welche beim Modelltunnel angewandt wird (Abbildung 51, Abbildung 52).

Die starken Wasserzutritte im Bereich der kataklastischen Störungszone fordern ein nachhaltiges Entwässerungskonzept. Bei starken Wasserzutritten sind Entwässerungslösungen mit Halbschalenentwässerungen und Noppenfolien unzureichend. Spritzabdichtungen und eine Abdichtung (mit einer KDB) bieten in Kombination mit einer Ulmendrainage eine dauerhafte und effiziente Ableitung der Bergwässer (Abbildung 51, Abbildung 52). Aufgrund kontroversieller Erfahrungen mit Spritzabdichtungen in der Vergangenheit [21], gekoppelt mit Projektzielen, welche eine Lebensdauer von mehr als 50 Jahren anstreben (Abbildung 36), ist eine konventionelle Abdichtung mit einer KDB vorteilhaft und damit anzuwenden. Bei Verwendung einer KDB ist eine statisch wirksame Spritzbetonschale notwendig, welche mit einer Stärke von 30 cm im Modelltunnel vorgesehen wird (Abbildung 52).

Injektionsmaßnahmen, wie eine Hohlrauminjektion im Mauerwerk oder Gebirgsverbesserungen, wie Eindringinjektionen, Verdichtungsinjektionen oder Kontaktinjektionen [33], haben positive Auswirkungen auf die Ausbaufestigkeiten und die Gebirgsparameter (Abbildung 51). Systemankerungen, dienen zur Erhöhung der Standsicherheit und Systemduktilität [46]. Eine kostengünstige Möglichkeit, welche die Vorteile von Injektionen und einer Regelankerung nutzt, ist eine Systemankerung im Gewölbe mit Injektionsbohrankern (IBO-Anker), über welche gebirgsverbessernde Injektionen durchgeführt werden.

Da eine Lebensdauer von über 50 Jahren und eine Unterbindung der Wasserzutritte in den Projektzielen vorgegeben sind (Abbildung 36), wird die RM3, sowohl in der nachhaltigen (6A) als auch in der moderaten Variante (6B) umgesetzt (Abbildung 52).

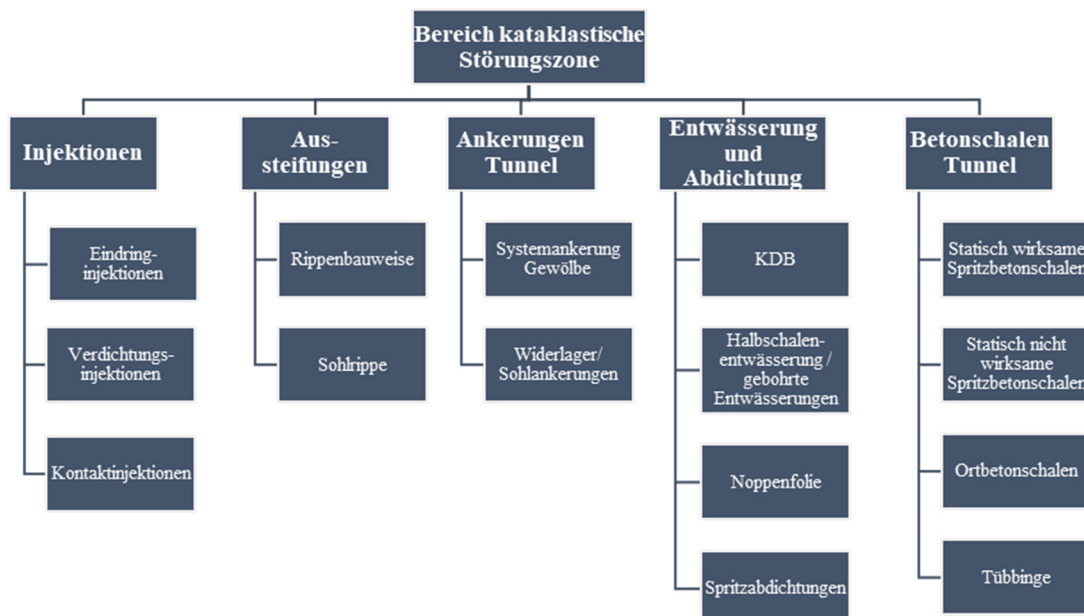


Abbildung 51: Optionsbaum für den Bereich der kataklastische Störungszone.

Variante 6A und 6B
RM3

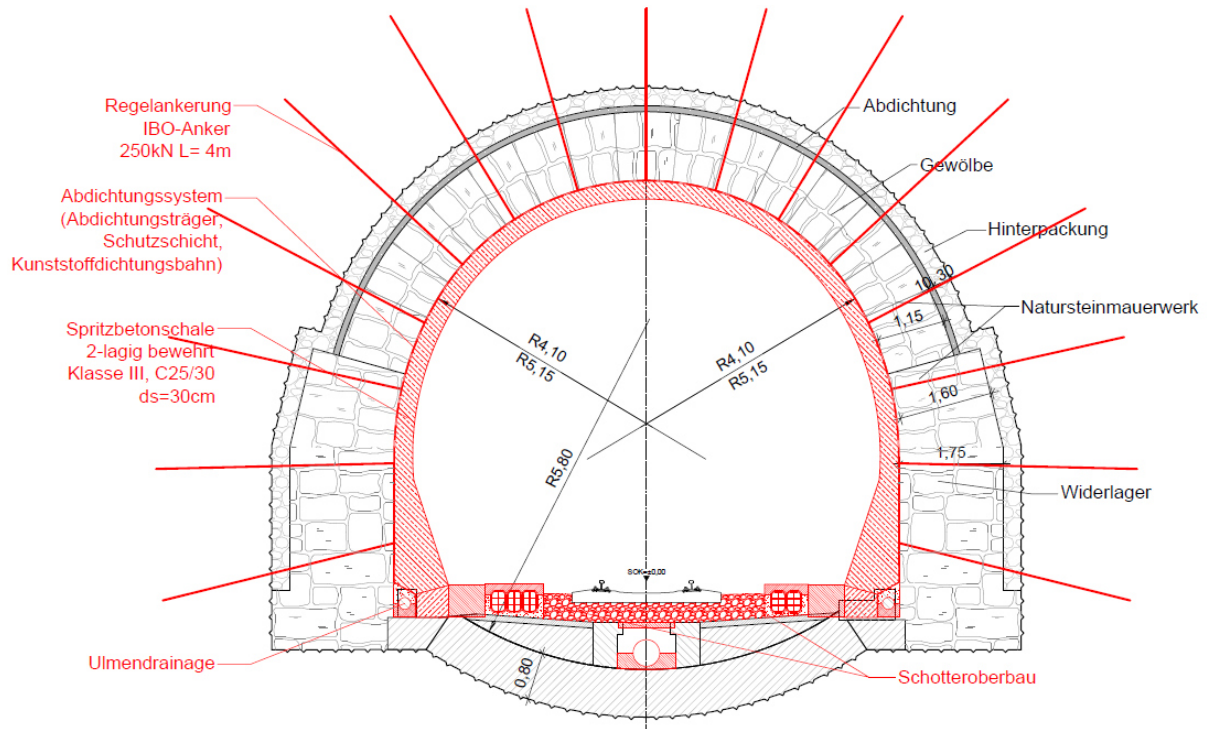


Abbildung 52: Variante 6A und 6B: RM3 in den Bereichen der kataklastischen Störungszone: TM (4090-4160) mit dem Ausbautyp 1: Schweres Druckprofil.

6.6.4 Regelmaßnahme 4 (RM4)

Erneuerungskonzept im Bereich der quellenden Serizitphyllite

Das dominante Schadensbild in diesem Bereich sind Sohlhebungen und Verformungen der Tunnelschale, bedingt durch den quellenden Phyllit. Eine Aufweitung des Gewölbes ist trotzdem nicht notwendig, da auch mit der radialen Verformung von 5cm und der neuen Spritzbetonschale keine Einschränkung des neuen Lichtraumprofils gegeben ist.

Betrachtet man das Schadensbild im Sohlgewölbe, insbesondere die weit auseinanderklaffenden Sohlfugen, so ist eine Instandsetzung bzw. Aussteifung des Sohlgewölbes (Abbildung 53) nicht ausreichend. Ein Neubau des Sohlgewölbes ist hier zielführend und wird in Form einer bewehrten Ortbetonschale ausgeführt (Abbildung 53). Im Sohlbereich wird ein Abtrag des aufgequollenen Gebirges (Abbildung 53) durchgeführt, um zukünftige Quellerscheinungen weitgehend zu unterbinden. Der Abtrag des aufgequollenen Gebirges ist ohnehin bei einem Neubau des Sohlgewölbes mit einem geringeren Aufwand, verglichen zu einer Instandsetzung, verbunden.

Aufgrund der seit zehn Jahren abnehmenden Verformungen der quellenden Phyllite ist davon auszugehen, dass ein Großteil der Verformungen bereits abgeschlossen ist. Dennoch sollten für eine Wiedererstarkung des Quelldruckes Maßnahmen vorgesehen werden. Eine Rippenbauweise im Gewölbebereich (Abbildung 53) wirkt zusätzlich aussteifend entgegen und wird deshalb beim Modelltunnel angewandt. Die Verstärkungsrippen (alle zwei Laufmeter) werden im Gewölbebereich mit drei Meter langen Füllmörtelankern (SN-Ankern; Abbildung 50) fixiert [44].

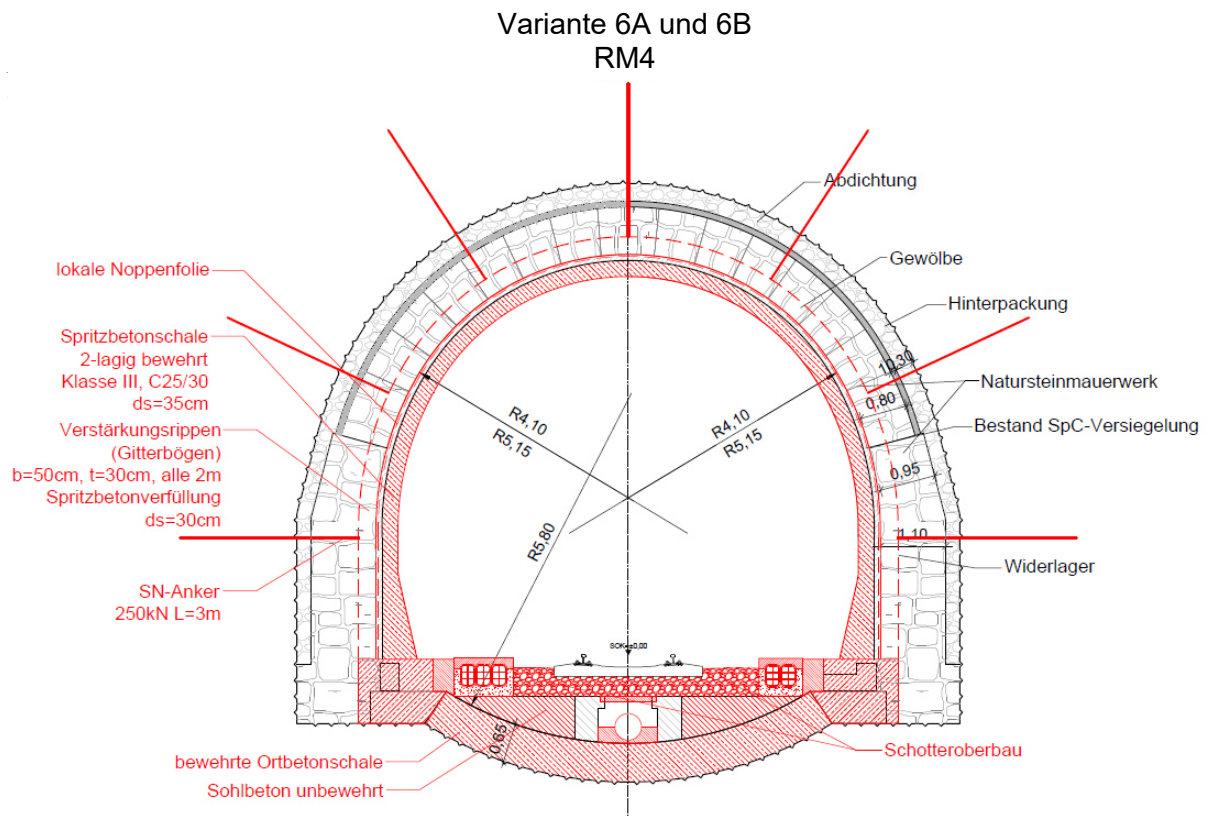
Betonschalen mit einer aussteifenden Wirkung sind Spritzbeton- und Ortbetonschalen (Abbildung 53). Statisch nicht wirksame Spritzbetonschalen und Fertigteilschalen sind für die Anwendung nicht geeignet (Abbildung 53). Fertigschalen (Abbildung 53) haben meist einen Hohlraum zwischen dem ursprünglichen Ausbau und dem Fertigteile, und können so die auftretenden Kräfte nur bedingt übertragen. Eine Ortbetonschale (Abbildung 53) ist mit einem hohen bauphysikalischen und technischen Aufwand, bedingt durch die Verwendung eines Schalwagens, verbunden. Zusammenfassend bietet eine statisch wirksame Spritzbetonschale aufgrund ihres aussteifenden Effektes kombiniert mit einer Systemduktilität die beste Lösung und wird deshalb im Modelltunnel umgesetzt.

Im Bereich der quellenden Serizitphyllite sind kaum Feuchtstellen bzw. Wasserzutritte dokumentiert. Sollten jedoch während der Bauphase Wasserzutritte auftreten, werden diese über lokale Noppenfolienstreifen drucklos abgeleitet (Abbildung 53, Abbildung 54). Aufwendigere Entwässerungslösungen (KDB mit Ulmendrainage, Halbschalentwässerungen, Spritzabdichtungen, etc.; Abbildung 53) sind bei den zu erwartenden geringen Wasserzutritten zu aufwendig und kostenintensiv.

Für die nachhaltige und moderate Variante (6A und 6B) sind die zu setzenden technischen Maßnahmen identisch (Abbildung 54), eine weniger umfangreiche Maßnahmensetzung ist bei einer geplanten Lebensdauer von mehr als 50 Jahren (Abbildung 36) nicht zielführend.



Abbildung 53: Optionsbaum für den Bereich der quellenden Serizitphyllite.



6.6.5 Regemaßnahme 5 und 6 (RM5, RM6)

Erneuerungskonzept im Bereich der wasserführenden Klüfte

In den Bereichen der wasserführenden Klüfte ist die Hauptproblematik eine andere als bei den Erneuerungskonzepten in den Portalbereichen, der kataklastischen Störungszone und den quellenden Serizitphylliten. In diesem Bereich gibt es keine statische Überbeanspruchung oder signifikante Schäden am Mauerwerk (Anhang 9.8), welche eine Erneuerung erfordern. Das Hauptziel besteht darin, die geringen bis mittelstarken Wasserzutritte (Abbildung 34) zu unterbinden.

Bei den dokumentierten Wasserzutrittsmengen eignen sich gezielte bzw. systematische Noppenstreifen und Halbschalentwässerungen in Kombination mit einer statisch nicht wirksamen Spritzbetonschale (Abbildung 55). Eine druckwasserentlastete Tunnelabdichtung bietet jedoch eine zuverlässigere Unterbindung von Wasserzutritten. Unter Rücksichtnahme der Projektziele (Abbildung 36), dass die Lebensdauer über 50 Jahre betragen und die Wasserzutritte zuverlässig unterbunden werden sollen (Abbildung 36), sowie der höheren Lebensdauer (z.B. Versinterungsproblematik) ist eine Lösung mit einer Tunnelabdichtung (mit einer KDB) oder Spritzabdichtung notwendig (Abbildung 55). Beide sind in Kombination mit einer Ulmendrainage vorzusehen (Abbildung 55). Die Konzepte müssen mit einer statisch wirksamen Spritzbetonschale gebaut werden, wobei die Schalendicke bei einer Spritzabdichtung um ca. 30% reduziert werden kann [22]. Die Regenschirmabdichtung mit einer KDB wird als widerstandsfähigere Systemlösung angesehen, aber auch als teurer und aufwendiger [21] und wird deshalb in der nachhaltigen Variante eingesetzt (Abbildung 56).

Die nachhaltige Variante 6A sieht eine 25cm Spritzbetonschale mit einer KDB und Ulmendrainage vor (Abbildung 55, Abbildung 56). Die moderate Variante 6B beinhaltet eine 16cm Spritzbetonschale und eine Spritzabdichtung, ausgeführt mit einer Ulmendrainage (Abbildung 55, Abbildung 56). Beide Konzepte sind als Regenschirmabdichtung vorgesehen (Abbildung 56).

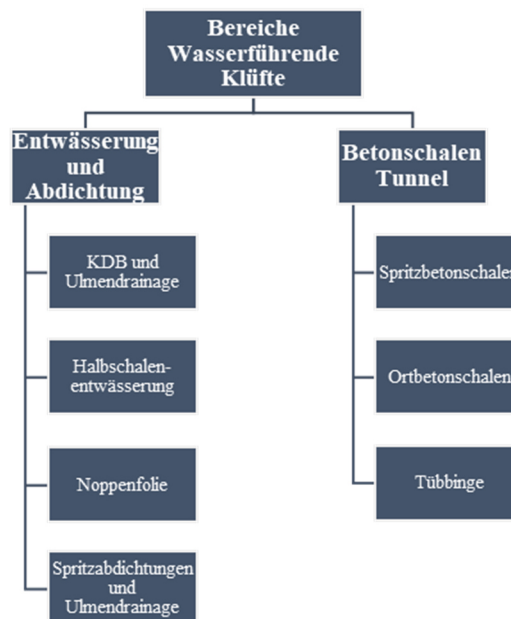
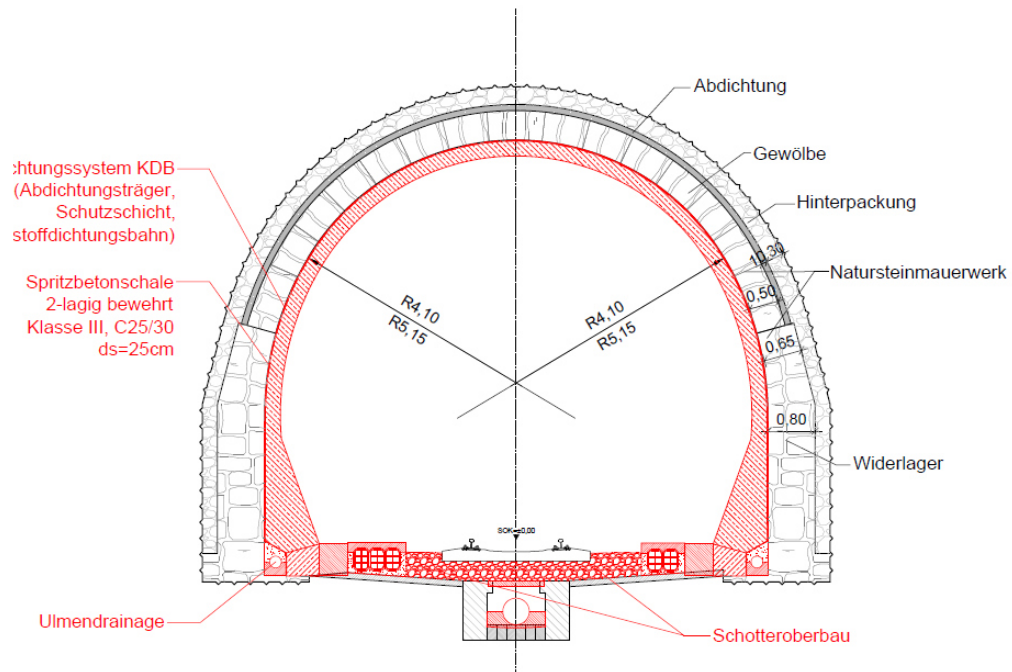


Abbildung 55: Optionsbaum für den Bereich der wasserführenden Klüfte.

Variante 6A RM5



Variante 6B RM6

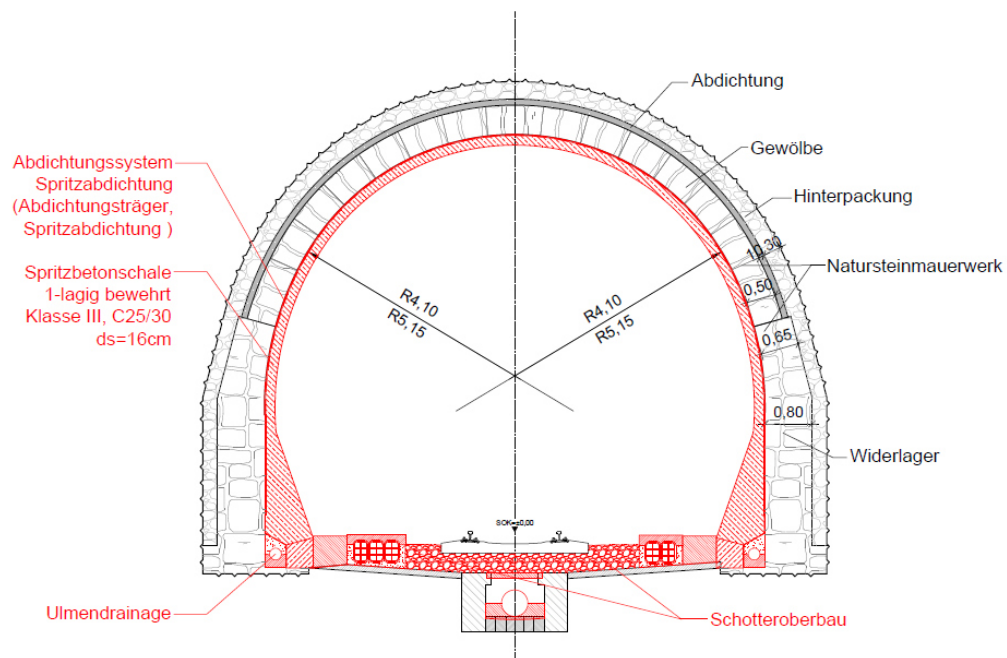


Abbildung 56: **Variante 6A. RM5** in den Bereichen von wasserführenden Klüften: TM (1220-1260; 2060-2100; 2770-2890; 5730-5770) mit dem Ausbautyp 3: Leichtes Druckprofil. **Variante 6B. RM6** in den Bereichen von wasserführenden Klüften: TM (1220-1260; 2060-2100; 2770-2890; 5730-5770) mit dem Ausbautyp 3.

6.6.6 Regelmaßnahme 7 (RM7)

Erneuerungskonzept in Bereichen mit vereinzelt Wasserzutritten

In diesen Bereichen gibt es keine Schäden am Mauerwerk oder statische Überbeanspruchungen. Um den Projektzielen (Abbildung 36) gerecht zu werden, müssen lediglich die Wasserzutritte zuverlässig abgeleitet werden. Die vereinzelt Wasserzutritte treten nur in der Formation der Paragneise auf (Abbildung 30) und sind meist lokal auf wenige Meter begrenzt (Anhang 9.8). Die Intensität dieser Wasserzutritte ist nach der vorgenommenen Kategorisierung (Abbildung 32A) vereinzelt feucht, feucht und nass.

Für lokal begrenzte Bereiche sind Abdichtungssysteme mit einer KDB und Ulmendrainage zu aufwendig und unwirtschaftlich. Spritzabdichtungen unterliegen derselben Problematik (Abbildung 57). Vorgesehen ist daher im Modelltunnel, die Wasserzutritte gezielt mit Drainagebohrungen zu fassen und in Halbschalentwässerungen abzuleiten (Abbildung 57). Zusätzlich sind systematisch, je nach Ausmaß der Feuchtstellen, Noppenfolienbahnen vorzusehen, um die anfallenden Wasserzutritte in die Halbschalentwässerungen abzuleiten (Abbildung 58). Über die Halbschalentwässerungen erfolgt die Zuleitung in die Mittelentwässerung. Vorhandene, versinterte Halbschalentwässerungen werden, wenn möglich, mit Linern und Spülungen instandgesetzt.

Systematische Noppenfolienstreifen und -bahnen funktionieren nur in Verbindung mit einer Spritzbetonfläche unmittelbar auf der Folie und darüber hinaus [44]. Um eine Ablösung durch viele Spritzbetonteilflächen zu vermeiden, sowie eine hohe Lebensdauer zu gewährleisten wird eine vollflächige Spritzbetonschale vorgesehen (Abbildung 58). Diese wird als statisch nicht wirksame Schale, mit einer Dicke von 16cm, ausgeführt (Abbildung 58). Um eine Abschälung in Zukunft zu verhindern, wird eine Verdübelung der Schale mit dem Mauerwerk vorgesehen [44].

Da eine Lebensdauer von über 50 Jahren und eine Unterbindung der Wasserzutritte in den Projektzielen vorgegeben ist (Abbildung 36), wird die RM7 in der nachhaltigen und moderaten Variante (6A und 6B; Abbildung 58) umgesetzt. In der nachhaltigen Variante 6A wird die RM7 jedoch flächendeckender, eingesetzt als bei der moderaten Variante 6B (Abbildung 62).

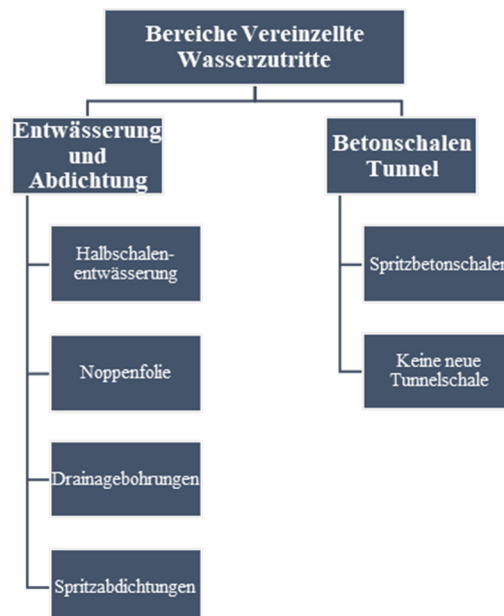


Abbildung 57: Optionsbaum für die Bereiche mit vereinzelt Feuchtstellen im Tunnel.

Variante 6A und 6B RM7

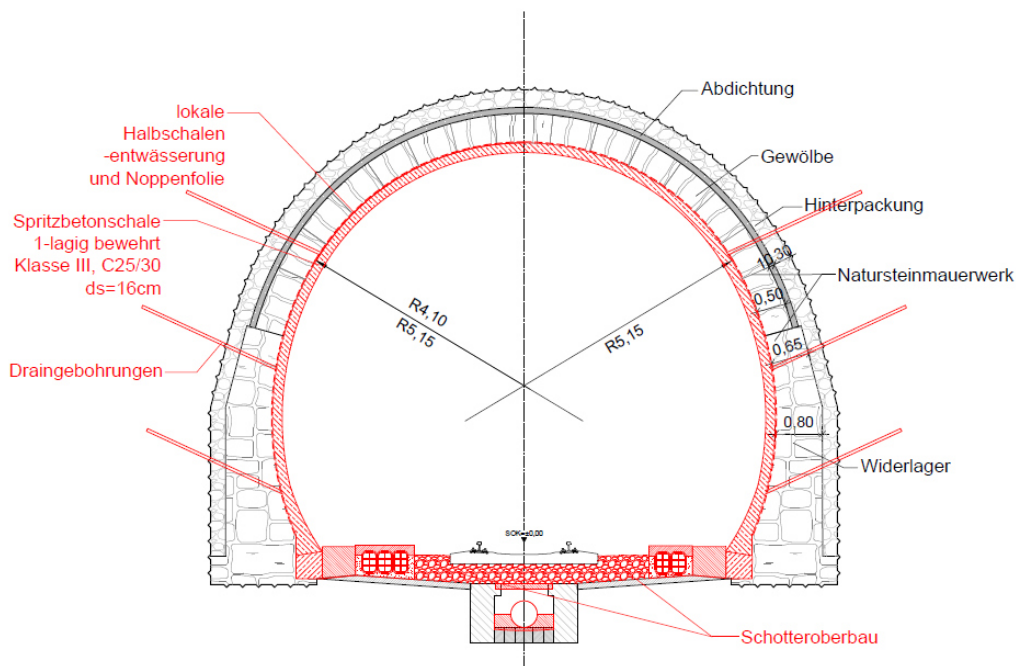


Abbildung 58: Variante 6A und 6B: RM7 in den Bereichen mit vereinzelt Feuchtstellen mit dem Ausbautyp 3: Leichtes Druckprofil.

6.6.7 Planung Oberbau (Gleisbett, Mittelentwässerung, Verkabelungslösung)

Die Planung des Oberbaus und der Mittelentwässerung wird in einem Konzept umrissen und vereinfacht ohne Detailplanung dargestellt. Sie erhebt somit keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Der Umbau des Modelltunnels von zweigleisigen (Anhang 9.1) auf eingleisigen Betrieb (Abbildung 60) erfolgt auf der kompletten Länge des Modelltunnels.

Die Feste Fahrbahn (Abbildung 59) hat zwar zahlreiche Vorteile im Tunnelbau, wie kürzere Instandhaltungsintervalle, eine längere Lebensdauer, sowie Sicherheitsvorteile [10], jedoch müssten im Modelltunnel mehrere Betonarbeiten durchgeführt werden (z.B. Ausgleichsbeton, Betontragschicht, Vergussbeton, etc. [23; 35]). Diese Arbeiten sind auf der kompletten Länge von 6250m (Tabelle 2) des Modelltunnels durchzuführen und würden die Bauzeit stark verlängern. Deshalb wird keine Feste Fahrbahn für die Vollerneuerung eingesetzt. Für die Projektanforderungen (Abbildung 36) ist ein Schotteroberbau (Abbildung 59) ausreichend (Abbildung 60).

Die Ort beton- und Spritzbetonschalen in den geplanten Regelaßnahmen (Abbildung 50, Abbildung 52, Abbildung 54, Abbildung 56, Abbildung 58), nehmen jenen Platz ein, in dem die Kabeltröge des Bestands tunnels platziert sind (Anhang 9.1). Eine vorübergehende Verlegung der Kabeltröge ist zwar möglich, jedoch ist dies aufgrund der vielen Baumaßnahmen, Verkabelungen für neue Tunnelausrüstung und Schäden an Bestandskabelsträngen mit einem sehr hohen Aufwand verbunden. Eine technisch passendere Lösung ist eine Neugestaltung der Kabeltröge mittels Mehrfachkabelkanälen (Abbildung 60).

Die Mittelentwässerung wird aufgrund der vorhandenen Versinterungen und Schäden (Anhang 9.8) im gesamten Modelltunnel erneuert. Hierfür wird von einem DN350 (Anhang 9.1) auf ein DN450 Rohr (Abbildung 60), infolge des hohen Wasserandrangs, umgerüstet. Eine ausmittige Anordnung der Mittelentwässerung (Abbildung 59), links oder rechts der Gleise, würde eine bessere Wartung dieser erlauben. Nachteilig dabei ist der Mehraufwand in der Bauphase. Ein Sohlbeton mit Gefälle müsste über die komplette Tunnelstrecke errichtet werden, dafür ist ein bereichsweiser Abtrag des Sohlgewölbes und Bestandsaufbaues erforderlich. Die Hauptentwässerung mittig zu platzieren ist für den Modelltunnel zielführender (Abbildung 60).

Die Schienenoberkante ist im Vergleich zum Bestand (Anhang 9.1) um 15 cm gesenkt (Abbildung 59, Abbildung 60), um Platz für die Regelmaßnahmen (Abbildung 50, Abbildung 52, Abbildung 54, Abbildung 56, Abbildung 58), das Lichtraumprofil LPR1 (Abbildung 37) und die Stromschiene (Abbildung 61) zu schaffen.

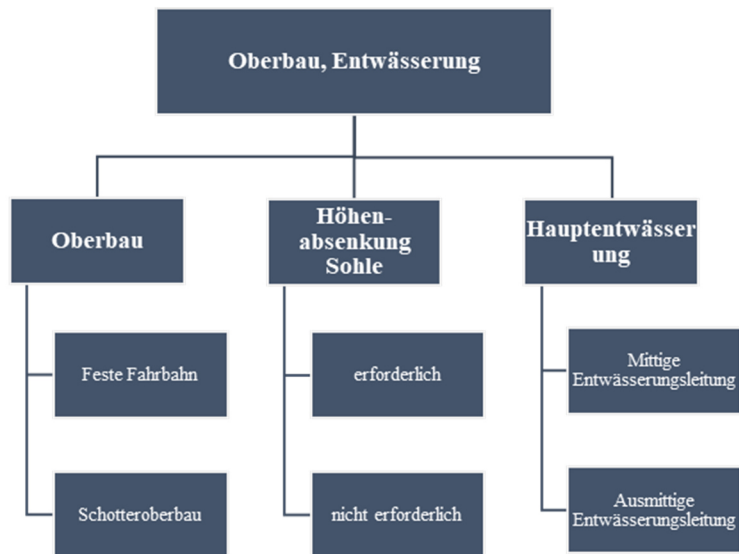


Abbildung 59: Optionsbaum für den Oberbau

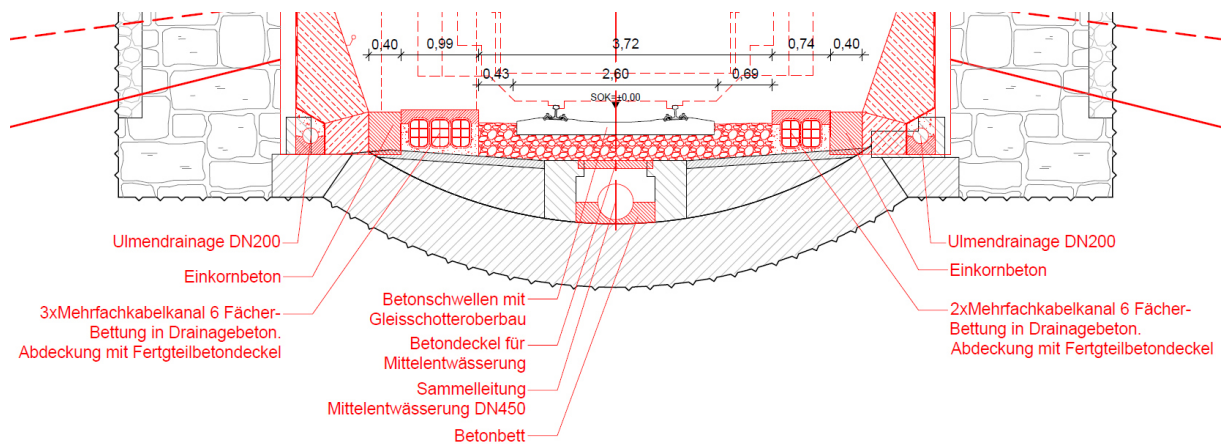


Abbildung 60: Detail Sohle: Schotteroberbau, Details. Übersicht Gesamtmaßnahmen

6.6.8 Tunnelausrüstung

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den bautechnischen Betrachtungen zur Tunnelinstandhaltung, daher werden die Bereiche Tunnelausrüstung, sowie technische Tunnelnachsrüstung nicht im Detail beleuchtet.

In Bestandstunnelbauwerken, insbesondere bei alten Eisenbahntunneln, kann keine Aussage über den einheitlichen Ausrüstungsstandard getroffen werden. Im Laufe des Betriebes sind mehrere Nach- und Aufrüstungen in Bestandstunneln der ÖBB erfolgt, dies führt zu einem heterogenen Bestand [43]. Gängige Ausrüstungen in Bestandstunnelbauwerken sind [46] [11]:

- **Stromversorgung:** Traktion 15kV 16,67Hz und/oder 25kV 50Hz, 10kV, 20kV Stromversorgung, Energieversorgung 50Hz
- **Oberleitungsanlagen:** Fahrleitung, Stromschiene
- **Leit- und Sicherheitstechnik:** ETCS (European Train Control System), Signaltechnik, Achszähltechnik, Fahrzeugortung
- **Maschinentechnische Anlagen**
- **Überwachungsanlagen**
- **Telekom:** GSM-R, TETRA, GSM-P Standards
- **Sicherheitsbezogene Ausrüstung:** Löschwasserleitung, Löschzug, Rettungszug, Sicherheitsnischen- und Querschlagsausrüstungen, LED-Handlauf, Ventilation.

Durch den Umbau des Modelltunnels von einem zweigleisigen auf einen eingleisigen Betrieb, sowie der Vollerneuerung des Oberbaus inklusive der Kabeltröge (Abbildung 60), findet ein umfangreicher Eingriff in die Bestandsausrüstung statt. Daraus resultiert die Notwendigkeit einer neuen Signaltechnik, Oberleitungsanlage, Verkabelung, Telekomausrüstung, sowie einer Leit- und Sicherheitstechnik auf der kompletten Länge des Modelltunnels (Abbildung 61). Des Weiteren ist für das Erreichen der Projektziele (Abbildung 36) eine Erneuerung der Ausrüstung, inkl. einer Stromschiene und eines beleuchteten Handlaufs (Abbildung 61) notwendig.

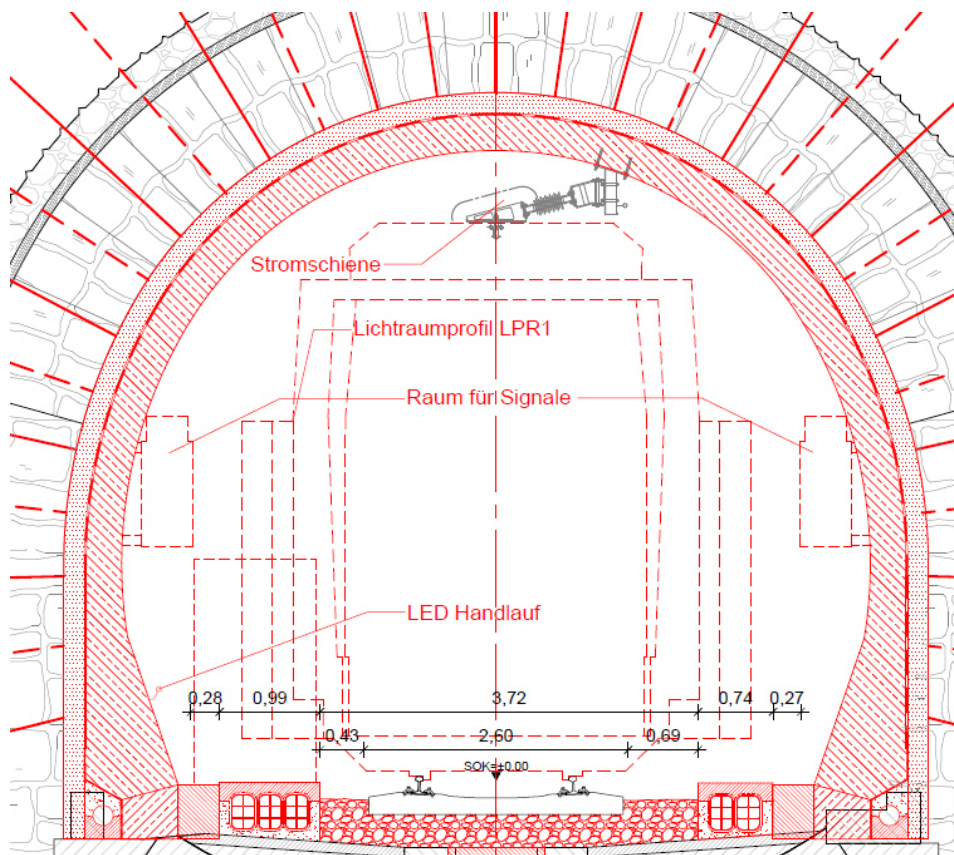
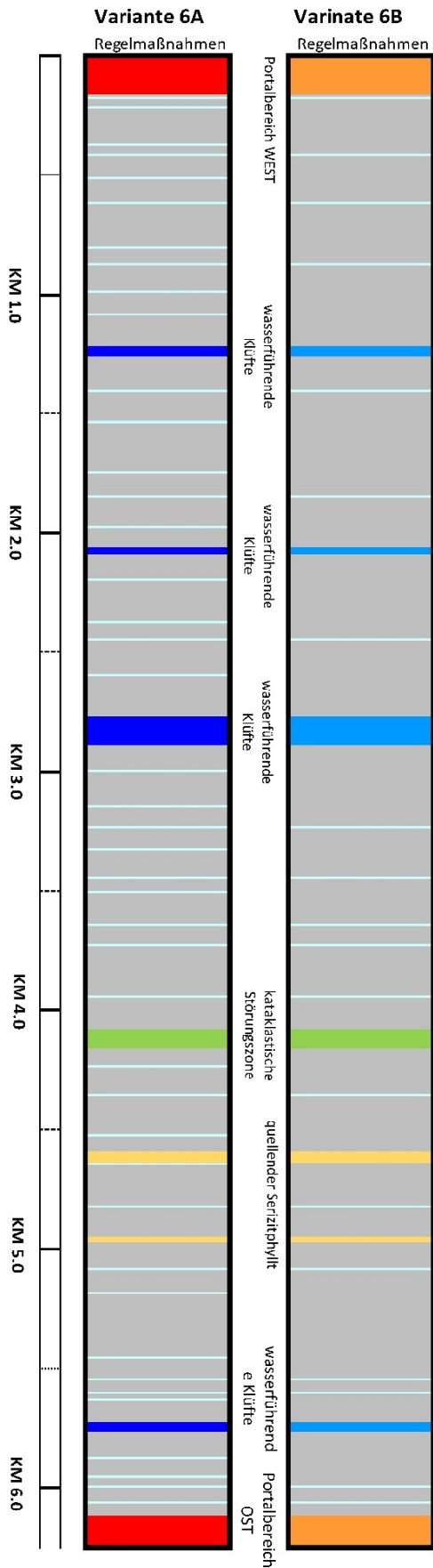


Abbildung 61: Prinzipskizze der Ausrüstung im Modelltunnel.

6.6.9 Überblick Maßnahmen

Die bautechnischen Eingriffe in Form der Regelmaßnahmen, sind bei der nachhaltigen Variante 6A auf einer Länge von 1100m und bei der moderaten Variante 6B auf einer Länge von 860m durchzuführen (Abbildung 62). Dies entspricht 17.60% bei der Variante 6A und 13.76% Variante 6B, bezogen auf die Gesamttunnellänge (Abbildung 62). Die Vollerneuerung des Oberbaus (Abbildung 59) und der Ausrüstung erfolgt auf der vollen Länge des Modelltunnels.



Variante 6A

RM1 [m]	RM2 [m]	RM3 [m]	RM4 [m]	RM5 [m]	RM6 [m]	RM7 [m]
290	0	80	70	230	0	430
Summe [m]				1100		
Anteil Gesamtlänge-Tunnel [%]				17,60		

Variante 6B

RM1 [m]	RM2 [m]	RM3 [m]	RM4 [m]	RM5 [m]	RM6 [m]	RM7 [m]
0	290	80	70	0	230	190
Summe [m]				860		
Anteil Gesamtlänge [%]				13,76		

Abbildung 62: Überblick der Bautechnischen Maßnahmen.

6.7 Bauzeit

6.7.1 Betriebliches und bauliches Konzept

Das betriebliche und bauliche Konzept ist für ein besseres Verständnis vereinfacht dargestellt und erläutert. Es erhebt nicht den Anspruch, der einzige Lösungsweg für die Problemstellung zu sein, jedoch soll es eine Möglichkeit, unter Einhaltung der projektrelevanten Aspekte, aufzeigen.

Bei der Erneuerung des Modelltunnels wird der Ansatz verfolgt, keine inputorientierte (Vorgabe Sperrdauer und Budget), sondern eine ergebnisorientierte Herangehensweise zu wählen [43] mit dem Ziel das technische Optimum aus der Tunnelinstandhaltung unter Einhaltung der Projektziele, herauszuholen (Abbildung 36). Erst im Nachgang werden die betrieblichen Details (z.B. Dauer der Sperre, Art der betrieblichen Einschränkung, Bauablauf, etc.) festgelegt.

In den Projektzielen und Anforderungen sind für das betriebliche und bauliche Konzept zwei wesentliche Ziele vorgegeben (Abbildung 36). Die Bauarbeiten sind so weit wie möglich unter Betrieb durchzuführen und eine Vollsperrung über neun Monate ist nur schwer durchsetzbar (Abbildung 36). Wesentlich ist daher eine Betrachtung, welche Leistungen der geplanten Maßnahmen (Kapitel 6.6) während des Betriebes und welche während einer Vollsperrung durchgeführt werden können:

- Die Spritzbeton- und Innenschalen aller Regelmaßnahmen (Abbildung 50, Abbildung 52, Abbildung 54, Abbildung 56, Abbildung 58) können nur unter Vollsperrung erfolgen (Kapitel 4.4).
- Die Entfernung und Erneuerung der Kabeltröge, des Oberbaus samt Gleisen und der Mittelentwässerung muss unter einer Vollsperrung erfolgen (Abbildung 60; Kapitel 4.4).
- Der Einbau von sicherheitsrelevanter Ausrüstung und Stromversorgung kann nur unter einer Vollsperrung umgesetzt werden, da sonst ein Betrieb technisch nicht möglich ist (z.B. Sicherheitsstandards können nicht eingehalten werden, keine Stromversorgung, etc.).
- Während einer Teilsperre (wechselseitige Gleissperre) können die Systemankerungen der Regelmaßnahmen RM1, RM2 und RM3 (Abbildung 50, Abbildung 52), sowie die Injektionen der RM3 (Abbildung 52) und Teilleistungen der RM7 (Bohren und Einsetzen der Drainagerohre, Fräsen von Drainageschlitz; Abbildung 58) umgesetzt werden. Ankerungen im Bereich der Firse (Abbildung 50, Abbildung 52) müssen in einer Nachtsperre bzw. Zugpause durchgeführt werden (Kapitel 4.4).

Daraus folgt eine bauzeitliche Aufteilung der Tunnelinstandhaltung des Modelltunnels in vorgezogene Maßnahmen (während des Betriebes in Form von wechselseitigen Gleissperren; Anhang 9.2, Anhang 9.4) und den restlichen Maßnahmen und Leistungen während einer Vollsperrung (Anhang 9.3, Anhang 9.5). Diese Aufteilung wird für beide Varianten, nachhaltig und moderat (6A und 6B), umgesetzt. Die Hauptbaumaßnahmen während der Vollsperrung werden in fünf Bauphasen (Anhang 9.3, Anhang 9.5, Abbildung 66) und die vorgezogenen Maßnahmen in einer Bauphase durchgeführt (Anhang 9.2, Anhang 9.4, Abbildung 67).

Die Hauptbaumaßnahmen starten im Jahr 2026, die vorgezogenen Maßnahmen werden vor den Hauptbaumaßnahmen zu einem noch nicht festgelegten Zeitpunkt durchgeführt. Die ausgewählten Stabilisierungsmaßnahmen des Kriechhangs (Kapitel 6.6.2) sind in den Bauzeit-/Bauablaufplänen nicht enthalten (Anhang 9.2, Anhang 9.3, Anhang 9.4, Anhang 9.5).

6.7.2 Systematik Bauzeit

Für die Berechnung der Bauzeit und zur Darstellung des Bauzeit-/Bauablaufplans wurde das Programm Microsoft Excel, aufgrund der leichten Verfügbarkeit, der geringen Einarbeitungszeit und den flexiblen Einsatzmöglichkeiten verwendet.

Der Bauablauf ist im Schichtbetrieb mit 24 Stunden geplant. Um zeitliche Reserven, wie Schichtwechsel, miteinzukalkulieren wird ein Tag mit einer Tagesleistung von 22 Stunden berechnet. Längere Abgänge (z.B. Weihnachten, Ostern, etc.) werden der Einfachheit halber nicht mitbetrachtet.

Anhand eines Auszugs aus den Berechnungen wird die Herangehensweise zur Ermittlung der Tagesleistungen (Abbildung 63) näher erläutert (Anhang Anhang 9.2, Anhang 9.3, Anhang 9.4, Anhang 9.5). Für die Berechnung der Bauzeit werden die technischen Maßnahmen (Kapitel 6.6) in Einzelleistungen gegliedert. Diesen Einzelleistungen werden zeitliche Leistungsansätze (Abbildung 63), gemäß Erfahrungen und Referenzprojekten [15], zugeordnet. Dazu zählen beispielsweise Verlegegeschwindigkeiten in m^2/h von Abdichtungsbahnen oder Fräsleistungen in m^3/h , etc. (Abbildung 63). Jeder Leistungsansatz wird für die weitere Berechnung (Abbildung 64) in eine Tagesleistung [lfm/d] umgerechnet (Abbildung 63).

Leistungen	Zwischeneinheit	Zwischeneinheit	Tagesleistung [lfm/d]	Quelle
LG Fräsarbeiten				
	[m^3/h]	[m^3/Stk]		
RM7: Fräsen Drainageschlitze (30x30cm)	3	0,45	146,7	Datenbank Laabmayr
RM4: Fräsen Schlitze Gitterbögen (50x30cm, alle 2m)	5	5,65	38,9	Datenbank Laabmayr
LG Abdichtungen				
	[m^2/h]			
Verlegen KDB + Vlies + Noppenfolie	20		24,4	Datenbank Laabmayr
Verlegen lokale Noppenfolie	40		48,7	Datenbank Laabmayr
Aufbringen Spritzabdichtung	75		91,4	Datenbank Laabmayr
Aufbringen Spritzträger (ca. 3cm Dicke)	75		91,4	Datenbank Laabmayr

Abbildung 63: Auszug aus den verwendeten Leistungsansätzen und Zusammenfassung in Leistungsgruppen (LG) für die Bauzeitermittlung.

Die Systematik zur Berechnung der Bauzeit wird anhand der RM1 (Abbildung 50) in Abschnitt 1 (Anhang 9.3) erklärt (Abbildung 64, Abbildung 65). Für die restlichen Baumaßnahmen (Kapitel 6.6) ist die zugrundeliegende Systematik ident.

Die grundsätzliche Überlegung für die Ermittlung der Bauzeit ist, jene Leistungen zusammenzufassen, die gleichzeitig erfolgen können. Dies erfolgt bei der RM1 in drei Teilen (Abbildung 64A, Abbildung 65), in welchen die einzelnen zeitlichen Leistungsansätze zusammengefasst sind (Abbildung 64B):

- Spritzbetonschale (SpC-Schale)
- Abdichtung und Entwässerung
- Innenschale Betonage Widerlager, etc.

Die Tagesleistung wird mit der Abschnittslänge multipliziert (Abbildung 64C) und ergibt die benötigte Bauzeit (Abbildung 64D). Maßgebend ist der zeitkritische bzw. maximale Wert (Abbildung 64E) aus der Teilung (Abbildung 64A). Dieser Maximalwert repräsentiert die Bauzeit in Tagen (Abbildung 64E) und wird im Bauzeit-/Bauablaufplan mit Pfeilen in Baufortschrittsrichtung dargestellt (Abbildung 65, Anhang 9.3).

RM1: Abschnitt 1

Teilung	Leistung	Abschnitt	[m]	[lfm/d]	[d]	Zeitkritische
						Tage [d]
SpC-Schale	SpC ds = 20cm	A1	160	18,3	8,8	8,8
	Bewehrung verlegen 1. Lage	A1	160	18,3	8,8	
Abdichtung und Entwässerung	Aufbringen Abdichtungsträger (ca. 3cm Dicke)	A1	160	91,4	1,8	6,6
	Verlegen KDB + Vlies + Noppenfolie	A1	160	24,4	6,6	
Innenschale, Betonage Widerlager etc.	Betonage Schalwagen	A1	160	10,0	16,0	16,0
	Betonage Widerlager	A1	160	37,5	4,3	
	Ulmendrainage, Filterbeton Entwässerung	A1	160	50,0	3,2	
					Summe	31,32

Abbildung 64: Berechnung der Bauzeit von RM1

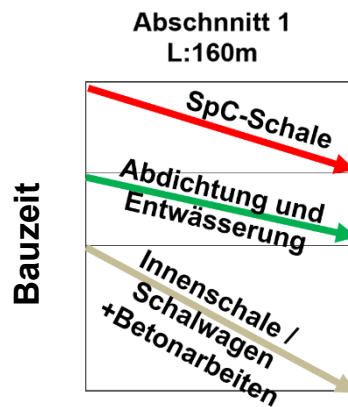


Abbildung 65: Ausschnitt aus Bauzeit-/Bauablaufplan (Anhang 9.2) zur systematischen Erklärung.

6.7.3 Ergebnisse Bauzeit

Die Gesamtbauzeit der Hauptmaßnahmen für die nachhaltige Variante 6A beträgt 6,3 Monate, für die moderate Variante 6B, 5,7 Monate (Anhang 9.3, Anhang 9.5, Abbildung 66). Der Unterschied von 0,6 Monaten in der Gesamtbauzeit ist hauptsächlich durch die kürzere Bauphase 2 der Variante 6B bedingt (Anhang 9.3, Anhang 9.5, Abbildung 66). Diese Reduktion in der Bauzeit ist auf die moderatere Maßnahmensetzung bei der Variante 6B verglichen zu Variante 6A zurückzuführen (Abbildung 48, Abbildung 62). Die restlichen Bauzeiten (Bauphase 1-2 und 4-5) sind in beiden Varianten (6A und 6B) ident. Die Gesamtbauzeit der vorgezogenen Maßnahmen beträgt 2,8 Monate in der Variante 6A und 2,2 Monate in der Variante 6B (Anhang 9.2, Anhang 9.4, Abbildung 67).

Die Projektziele mit Anforderungen (Abbildung 36) können mit Gesamtbauzeiten von weniger als neun Monaten und einem Konzept, welches Maßnahmen während einer Teilsperre vorsieht, bestens erfüllt werden (Anhang 9.2, Anhang 9.3, Anhang 9.4 Anhang 9.5, Abbildung 66, Abbildung 67).

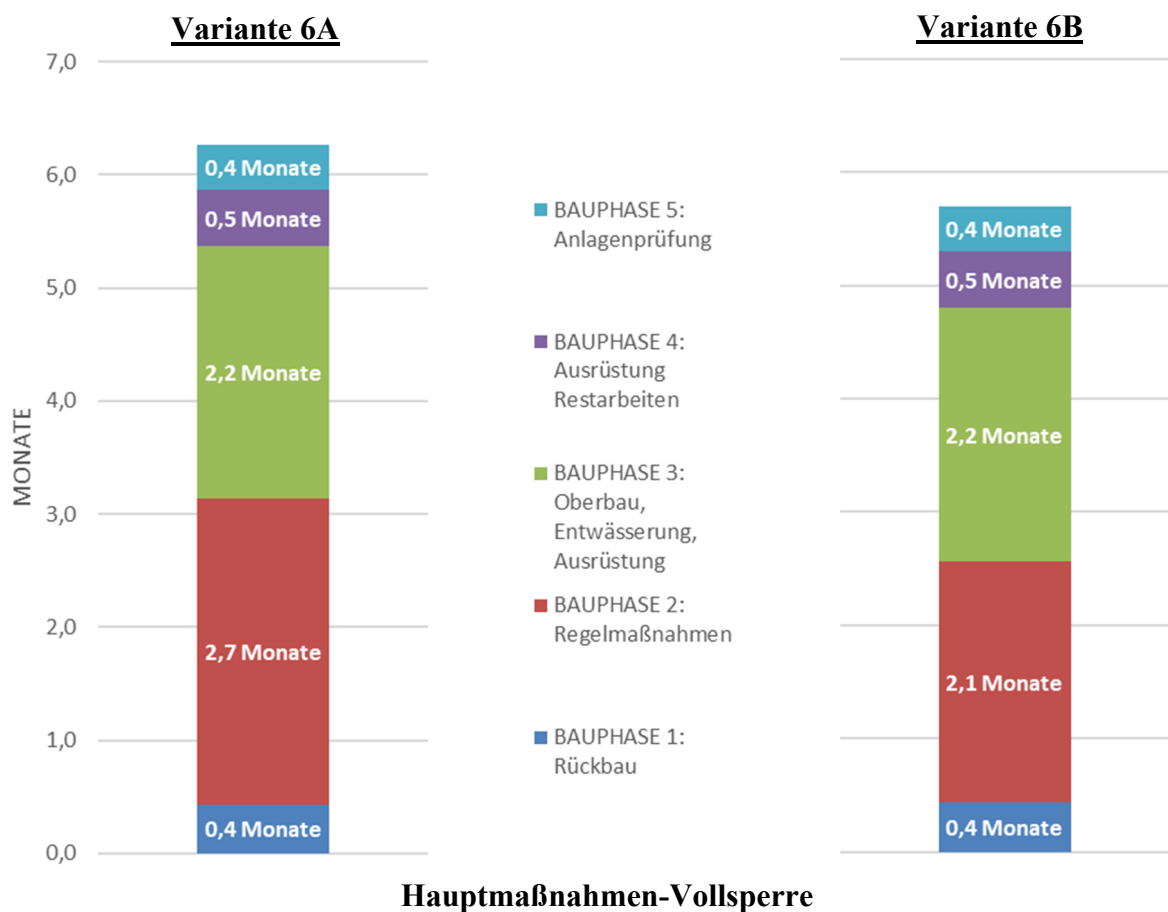


Abbildung 66: Zusammenfassende Darstellung des Bauzeit-/Bauablaufplans der Hauptmaßnahmen während der Vollsperr (Anhang 9.3, Anhang 9.5).

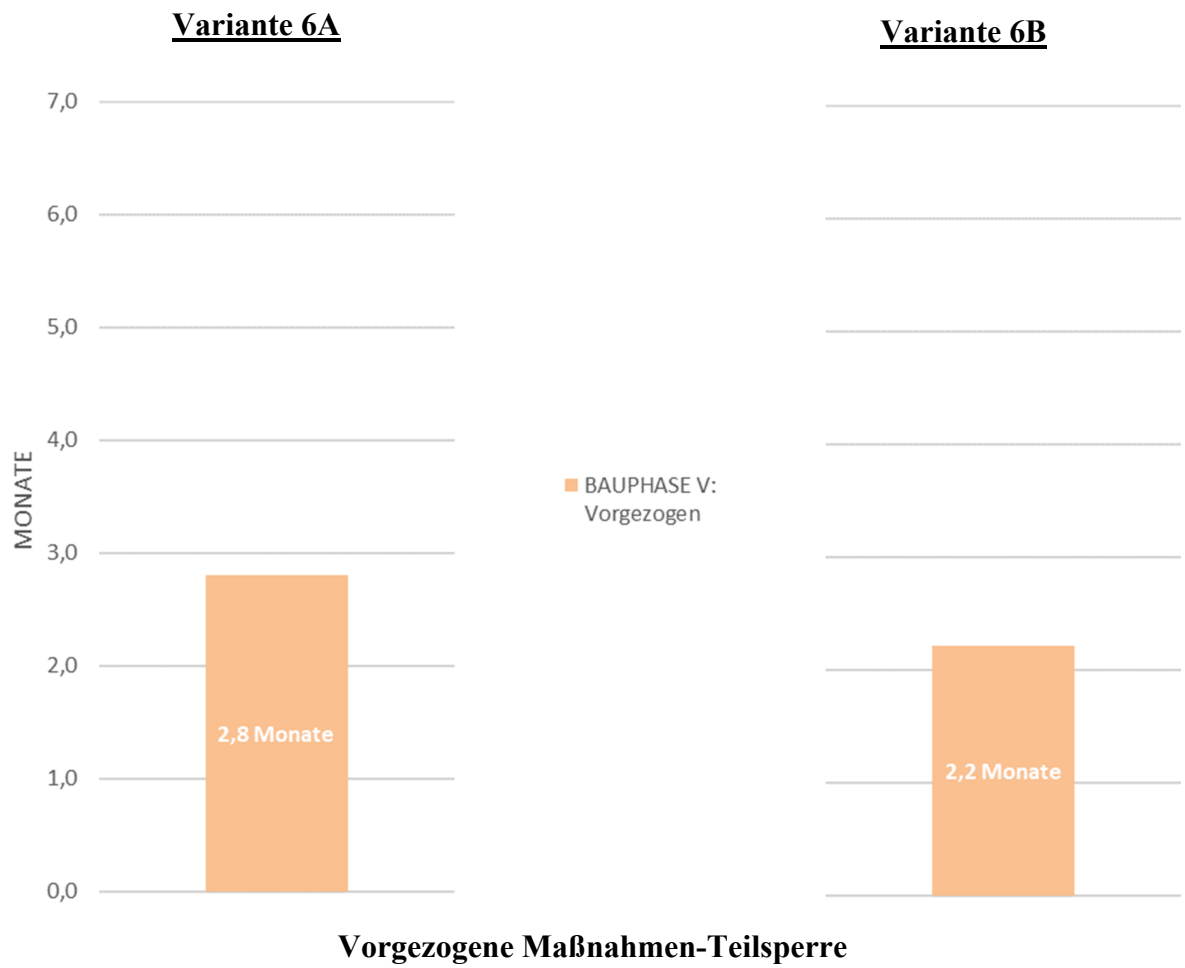


Abbildung 67: Zusammenfassende Darstellung des Bauzeit-/Bauablaufplans der vorgezogenen Maßnahmen während der Teilsperre (Anhang 9.2, Anhang 9.4).

6.8 Kostenermittlung

6.8.1 Systematik Kostenermittlung

Die verwendeten Preise für die Kostenermittlung sind mit Vertretern des Ingenieurbüros Laabmayr & Partner ZT GmbH abgestimmt. Als Grundlage für die Berechnungen wird das ÖBB „Handbuch zur Kostenermittlung“ [27] herangezogen und durch Aspekte der ÖGG „Richtlinie für die Kostenermittlung für Projekte der Verkehrsinfrastruktur“ [32] ergänzt. Zur Bestimmung der Kosten wird die Elementenmethode verwendet.

Bei der Kostenermittlung werden einige Abweichungen zum ÖBB „Handbuch zur Kostenermittlung“ [27] durchgeführt. Ein Mittelabflussplan wird nicht erstellt, da die Bauzeit von rund sieben Monaten und der Vorprojektstatus dies nicht erfordert. Des Weiteren wird auf eine Zuweisung der Kosten in Besteller- und Errichtersphäre der ÖBB verzichtet. Die empfohlene Excel Layoutstruktur zur Ermittlung der Plankosten ist stark abgewandelt, um eine für den Modelltunnel optimierte Kostenermittlung durchzuführen.

Das Gesamtprojekt für die Kostenermittlung ist in 14 verschiedene Positionen gegliedert (Tabelle 3, Anhang 9.6, Anhang 9.7).

Position	Bezeichnung
1	Vorgezogene Maßnahmen
2	Rückbau Oberbau und Ausrüstung
3	Neubau Oberbau, Entwässerung
4	Ausrüstung
5	RM1
6	RM2
7	RM3
8	RM4
9	RM5
10	RM6
11	RM7
12	Projektmanagementkosten
13	Baustellengemeinkosten
14	Planungskosten

Tabelle 3: Positionen für die Kostenermittlung

Die Systematik zur Berechnung der Elementkosten wird anhand der Position 8 (Tabelle 3, Anhang 9.6, Anhang 9.7; RM4) erklärt (Abbildung 68). Für die restlichen Positionen (Tabelle 3, Anhang 9.6, Anhang 9.7) erfolgt die Berechnung analog. Das Ziel ist es für jede Position die Elementkosten in Euro pro Laufmeter Tunnel [€/lfm] zu berechnen (Abbildung 68G).

Alle Leistungen (z.B. Spritzbetonschale, Verlegung Abdichtung, Bewehrungen, etc.), die für den Bau dieser Position erforderlich sind, werden für die Berechnung zusammengefasst (Abbildung 68A). Massen, Längen und Volumina sind in einer vereinfachten Massenermittlung pro Laufmeter berechnet (Abbildung 68B) und resultieren in einem Teilergebnis der Elementmenge (Abbildung 68C). Anschließend werden die Elementeinheitskosten (EEK; Abbildung 68D) mittels eines Zinssatzes von 2.5% (Tabelle 6), auf eine Preisbasis von 2022 (EEK-PB; Abbildung 68E), nach den Prinzipien der Zinseszinsrechnung, valorisiert. Das Erstellungsjahr dieser Arbeit im Jahr 2022 dient als Referenz für die Preisbasis. Die Elementkosten in Euro pro Laufmeter Tunnel (Abbildung 68F) sind das Produkt aus dem Teilergebnis bzw. der Elementmenge (Abbildung 68C) und der Elementkosten mit Preisbasis 2022 (Abbildung 68E). Abschließend wird die Summe aus allen Leistungen gebildet, um die Elementkosten der Position je Laufmeter Tunnel zu erhalten (Abbildung 68G).

Pos.	Leistung	Anzahl [Stk]	Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]	Fläche [m ²]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]
08	Abtrag altes Sohlgewölbe + Gebirge		1					
	Deponiekosten + Verfuhr Abtrag altes Sohlgewölbe & Gebirge					6,5		2,3
	Bewehrung Sohlgewölbe		1			4,45		110
	Sohlbeton						4,45	
	Rippen - Fräsen Schlitze 50x30cm						2,825	
	Rippen - Gitterbögen			9,03				
	SN Anker 3m (inkl. Bohren, setzen etc.)	3,5						
	SpC-Schale ds=35cm					18,06		
	Füllbeton		1					
	BSTG Bergseitig			1,15		18,06		3,08
	BSTG Luftseitig			1,15		18,06		3,08
	Verlegen lokale Noppenfolie					3,61		
	Betonage Widerlager			1		1,17		

Teilergebnis	Einheit	EEK [€/Einheit]	Jahr []	EEK-PB [€/Einheit]	EK [€/lfm]	EK _{Ges} [€/lfm]	Quelle EK
1	[m]	990	2018	1092,77	1092,77	6822,59	Mit dem Betreuer abgesprochen
14,95	[to]	33,60	2022	33,60	502,32		Mit dem Betreuer abgesprochen
489,5	[kg]	1,85	2021	1,90	928,21		Mit dem Betreuer abgesprochen
4,45	[m ³]	420	2021	430,50	1915,73		Mit dem Betreuer abgesprochen
2,825	[m ³]	50	2019	53,84	152,11		Mit dem Betreuer abgesprochen
9,03	[m]	45	2022	45,00	406,35		Mit dem Betreuer abgesprochen
3,5	[Stk]	10,06	2019	10,83	37,92		Mit dem Betreuer abgesprochen
18,06	[m ²]	49,00	2021	50,23	907,06		Mit dem Betreuer abgesprochen
1,00	[m]	280	2018	309,07	309,07		Mit dem Betreuer abgesprochen
63,97	[kg]	1,50	2022	1,50	95,95		Mit dem Betreuer abgesprochen
63,97	[kg]	1,50	2022	1,50	95,95		Mit dem Betreuer abgesprochen
3,61	[m ²]	24,00	2022	24,00	86,64		Mit dem Betreuer abgesprochen
1,17	[m ³]	250,00	2022	250,00	292,50		Mit dem Betreuer abgesprochen

Abbildung 68: Systematik zur Berechnung der Elementkosten am Beispiel von Position 8: RM4.

Zur Ermittlung der Gesamtkosten ist die Summe der Basiskosten, Gleitung, Risikokosten und Vorausvalorisierung (BGRV) erforderlich (Kapitel 5).

Basiskosten: Die Elementkosten sind mit dem Anteil des Unberücksichtigten zu erhöhen, um die Basiskosten zu erhalten (Anhang 9.6, Anhang 9.7). Sowohl die ÖGG Richtlinie „Kostenermittlung für Projekte der Verkehrsinfrastruktur“ [32] als auch das ÖBB „Handbuch zur Kostenermittlung“ [27], bieten hier keine Referenzwerte. Aus Erfahrung liegen übliche Zuschläge für Unberücksichtigtes zwischen 5% und 20% [15]. Für die Berechnung der Basiskosten beim Modelltunnel wird daher eine Einteilung in vier Kategorien für das Unberücksichtigte geschaffen: sehr hoch, hoch, mittel und niedrig (Tabelle 4). Diese werden pauschal, je nach Detaillierungsgrad der Planung, auf die Elementkosten aufgeschlagen (Anhang 9.6, Anhang 9.7).

sehr hoch	20%
hoch	15%
mittel	10%
niedrig	5%

Tabelle 4: Pauschale Zuschläge für Unberücksichtigtes

Des Weiteren werden die Planungs- und Baustellengemeinkosten pauschaliert anhand der Gesamtkosten berechnet. Aus Erfahrung [15] sind für die Baustellengemeinkosten 25% und für die Planungskosten 1.5% der Gesamtkosten anzusetzen (Anhang 9.6, Anhang 9.7). Das Sicherheitspaket für die vorgezogenen Maßnahmen wird gemäß Praxiskenntnis [15] mit 100% der Gesamtbaukosten dieser angesetzt (Anhang 9.6, Anhang 9.7).

Gleitung und Wertanpassung: Eine Gleitung und Wertanpassung ist per Definition am Projektstart nicht vorhanden (Abbildung 26) und wird daher mit 0% festgesetzt (Anhang 9.6, Anhang 9.7).

Risikokosten: Die Risikokosten werden pauschal auf die Basiskosten der Positionen, je nach qualitativer Beurteilung des Risikos, aufgeschlagen (Anhang 9.6, Anhang 9.7). Das ÖBB „Handbuch zur Kostenermittlung“ [27] enthält für die Vorprojektphase keine pauschalierten Risikozuschläge, daher wird die ÖGG Richtlinie „Kostenermittlung für Projekte der Verkehrsinfrastruktur“ [32] herangezogen. Gemäß dieser haben die pauschalen Risikozuschläge von Tunnelinstandhaltungen ein allgemeines Risiko r_{Allg} mit einer Bandbreite von 15-35% (Abbildung 27). Für das Baugrundrisiko r_{BG} liegt der Bereich bei 0-20% (Abbildung 27).

Aus dieser Bandbreite heraus wird das allgemeine Risiko r_{Allg} in vier Kategorien (hoch, mittel, niedrig, ohne; Tabelle 5) und das Baugrundrisiko r_{BG} in drei Kategorien (hoch, niedrig, ohne) unterteilt (Tabelle 5). Die qualitative Beurteilung des Risikos bezieht sich auf diese Unterteilung (Tabelle 5) und bildet den Risikozuschlag zu den Basiskosten (Anhang 9.6, Anhang 9.7). Eine Ausnahme bildet die Position 1.2 „Ankerung und Injektionen RM3“ (Anhang 9.6, Anhang 9.7), hier wird aufgrund der hohen geologischen Unsicherheiten bei Injektionen [4] ein Baugrundrisiko von 50% angenommen (Anhang 9.6, Anhang 9.7).

r_{Allg}		r_{BG}	
hoch	35%	hoch	20%
mittel	25%	niedrig	10%
niedrig	15%	ohne	0%
ohne	0%		

Tabelle 5: Pauschale Zuschläge für allgemeines Risiko r_{Allg} und Baugrundrisiko r_{BG} .

Vorausvalorisierung: Für die Vorausvalorisierung eines Infrastrukturprojektes wird in der Regel ein mittlerer Zinssatz ÖBB intern ermittelt und vorgegeben [27]. Dieser hat in den Jahren 2016-2021 ca. 2,5% betragen und wird im Jahr 2022 mit ca. 5% vorgegeben [3]. Für die Kostenermittlung des Modelltunnels wird angenommen, dass im Jahr 2023 der mittlere Zinssatz 5% und in den Jahren 2024-2026 rund 3% beträgt (Tabelle 6). Der Beginn der Hauptbaumaßnahmen ist für das Jahr 2026 angesetzt (Anhang 9.3, Anhang 9.5), somit ergibt sich eine bei einer Zinseszinsrechnung von fünf Jahren mit den mittleren Zinssätzen (Tabelle 6), eine Vorausvalorisierung von 17% als Zuschlag auf die Basiskosten (Anhang 9.6, Anhang 9.7).

Mittlerer Zinssatz ÖBB	
2016-2021	2,5 %
2022	5,0 %
2023	5,0 %
2024-2026	3,0

Tabelle 6: Mittlere Zinssätze der ÖBB [3] mit eigenen Abschätzungen für 2023-2026.

6.8.2 Ergebnisse Kostenermittlung

Durch die Aufsummierung der Basiskosten, Gleitung, Risikokosten und der Vorausvalorisierung ergeben sich die Gesamtprojektkosten (Kapitel 5, Abbildung 69). Variante 6A ist, verglichen mit Variante 6B, um Mio. € 3.7 geringfügig kostenintensiver (Abbildung 69). Die Gesamtkosten der nachhaltigen Variante 6A von Mio. € 84.5, setzen sich zu 73.4% aus Basiskosten, zu 14.1% aus Risikokosten und zu 12.5% aus Vorausvalorisierung zusammen (Abbildung 69). Verglichen dazu umfassen die Gesamtkosten von Mio. € 80.8 der moderaten Variante 6B 73.7% Basiskosten, 13.8% Risikokosten und 12.5% Vorausvalorisierung (Abbildung 69). Die Gleitung und Wertanpassung beträgt bei beiden Varianten 0%, da am Projektstart diese noch nicht eintritt (Anhang 9.6, Anhang 9.7, Abbildung 69).

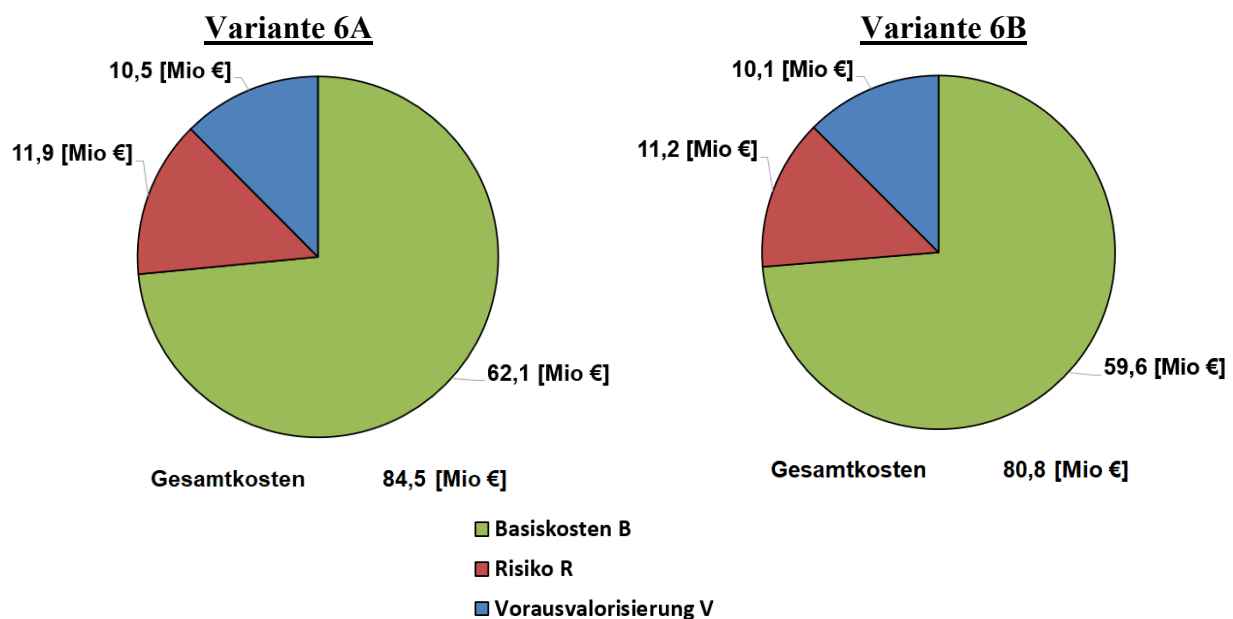


Abbildung 69: Gegenüberstellung der Gesamtkosten von Variante 6A und Variante 6B

Eine Aufschlüsselung der Gesamtkosten in die einzelnen Positionen (Anhang 9.6, Anhang 9.7, Tabelle 3) zeigt, dass die größten Kostentreiber Position 4 (Ausrüstung), Position 3 (Neubau Oberbau, Entwässerung) und Position 2 (Rückbau Oberbau und Ausrüstung) mit insgesamt Mio. € 58.4 für Variante 6A und 6B sind (Abbildung 70, Anhang 9.6, Anhang 9.7). Die Regelmaßnahmen (Position 5-11) und die dafür notwendigen vorgezogenen Maßnahmen (Position 1) umfassen zusammen lediglich Mio. € 7.8 für Variante 6A und Mio. € 4.8 für Variante 6B (Abbildung 70, Anhang 9.6, Anhang 9.7).

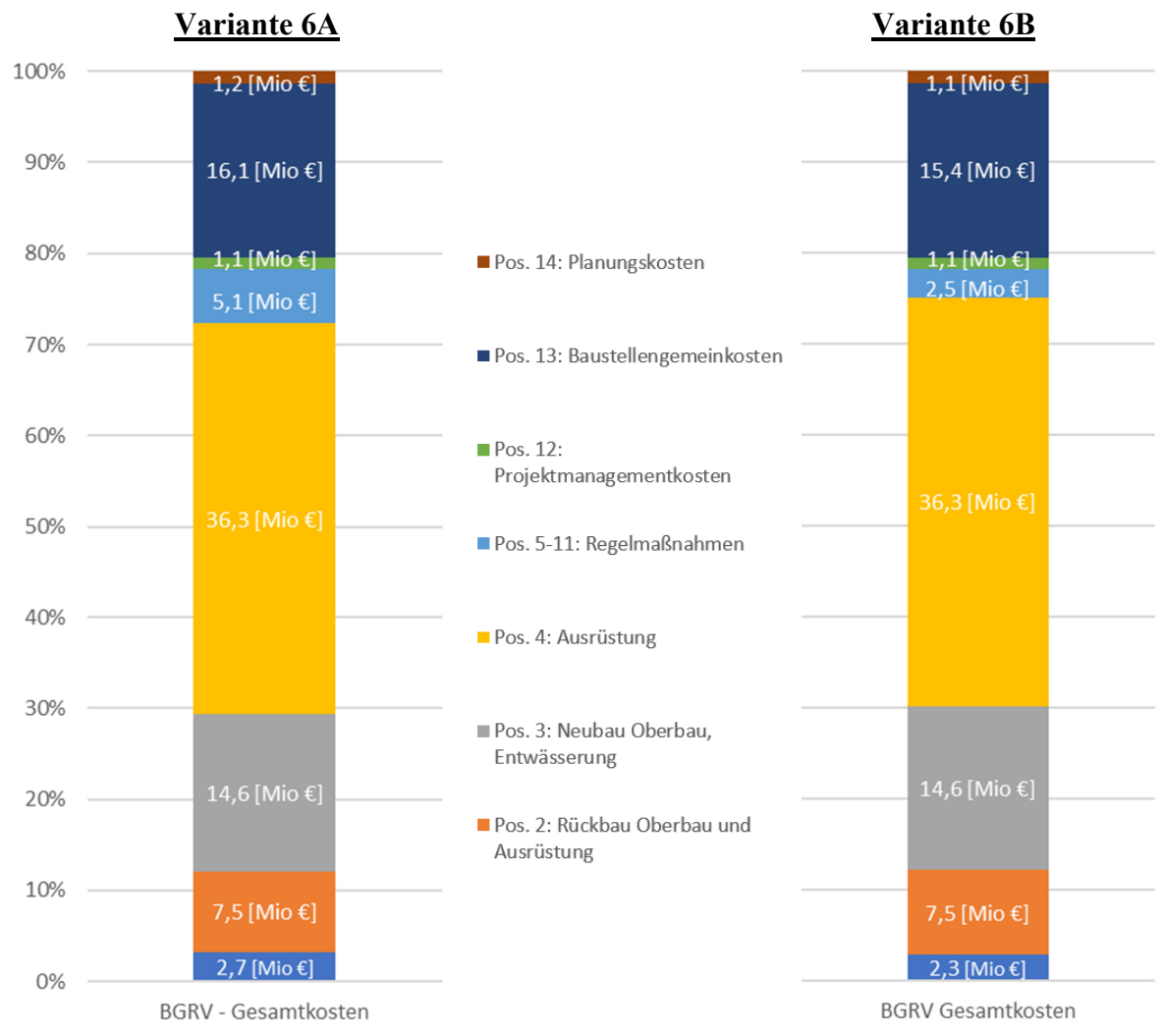


Abbildung 70: Aufschlüsselung der Gesamtkosten von Variante 6A und Variante 6B nach Positionen.

6.9 Life Cycle Costs (LCC)

Gemäß der RVS 13.05.11 [39] sind die Life Cycle Costs die gesamten verzinsten Kosten eines Bauwerkes über den Lebenszyklus. Der Lebenszyklus umfasst die Zeitspanne zwischen Anfang der Errichtung und Ende des Abbruchs.

Im Laufe des Lebenszyklus eines Tunnelbauwerkes treten verschiedenste Einwirkungen und Phänomene wie Gebirgsdruck, Materialalterung, Versinterungen, aerodynamische Belastung, Schadstoffbelastungen etc. auf (Abbildung 71). Die damit verbundene Degradation erfordert Instandsetzungen und teilweise auch Erneuerungen über die Lebensdauer des Bauwerkes [13]. Hierbei fallen erhebliche Kosten an, die in einer LCC Analyse berücksichtigt werden (Abbildung 72). Des Weiteren sind in einer LCC Analyse die betrieblichen Erhaltungs- und Prüfkosten miteinzubeziehen (Abbildung 72) [39].

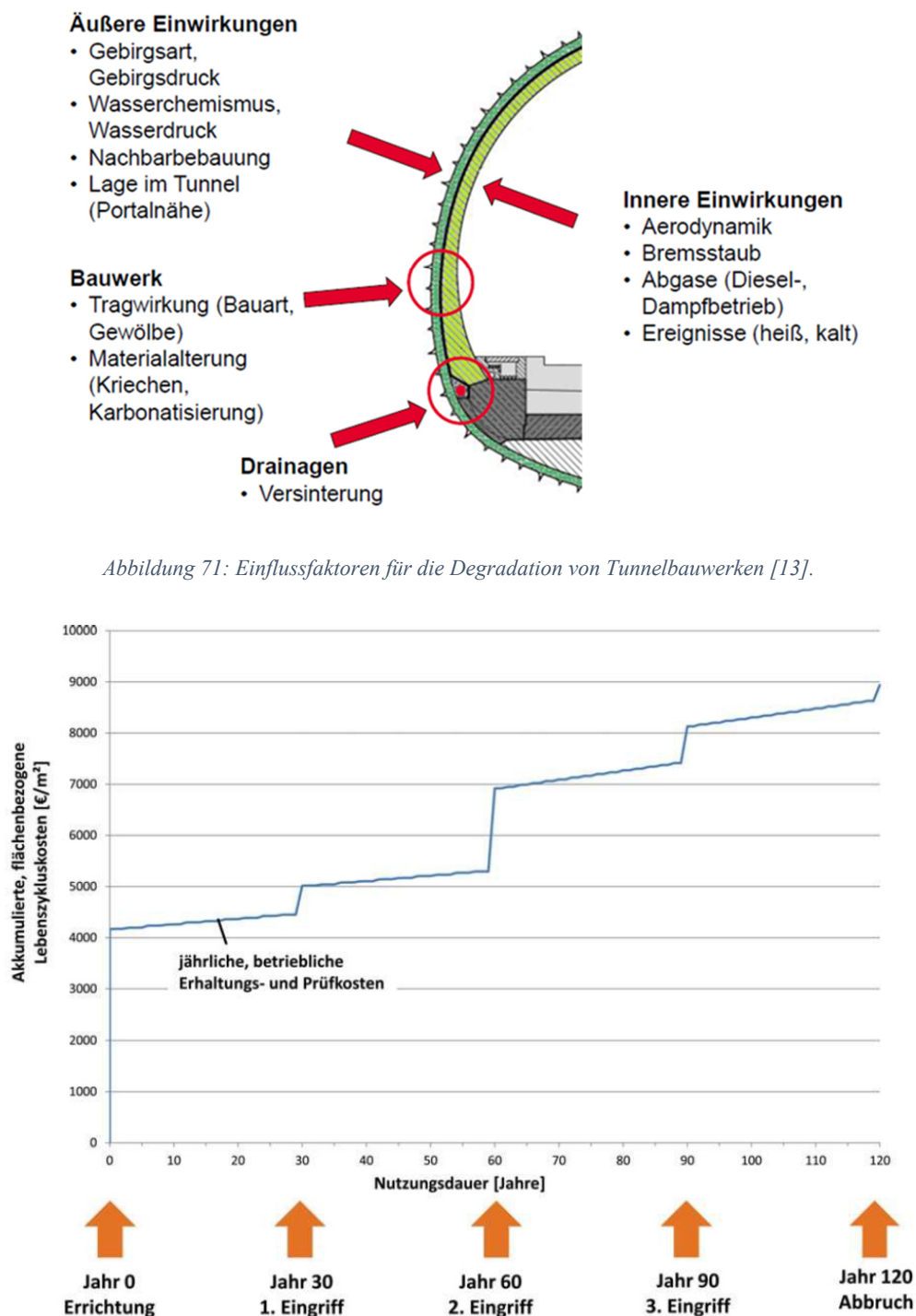


Abbildung 71: Einflussfaktoren für die Degradation von Tunnelbauwerken [13].

Abbildung 72: Schema eines vertieften LCC Modells für Brücken [39].

Eine Zielsetzung dieser Arbeit ist eine Life Cycle Cost Analyse für die Instandhaltungsmaßnahmen des Modelltunnels durchzuführen. Im Zuge der Recherche haben sich jedoch grundlegende Hindernisse aufgetan, weshalb diese nicht weiterverfolgt wurde.

Die gängigsten Modelle zu Lebenszykluskosten kommen aus dem Bereich der Hochbau-Immobilien. Eine Übertragung auf Tunnelbauwerke ist aufgrund einer anderen Zielstellung nur bedingt möglich. Die Vielzahl an anderen existierenden Modellen sind nur stark eingeschränkt auf Tunnelbauwerke anwendbar [8].

Eine Normung oder Richtlinie für die Betrachtung von Tunnelbauwerken gibt es derzeit nicht, eine ÖGG Richtlinie dazu ist erst in Entwicklung. Die RVS 13.05.11 „Lebenszykluskostenermittlung für Brücken“ [39] ist derzeit jene Richtlinie, aus welcher sich am besten einzelne Aspekte auf Tunnelbauwerke anwenden lassen, jedoch ist auch mit dieser keine vollständige LCC Analyse möglich.

Die Dissertation nach Engelhardt „Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken“ [8] verweist auch auf mehrere Problematiken. In der Dissertation wird zwar ein klares und transparentes Modell für die Ermittlung der Lebenszykluskosten für Tunnelbauwerke vorgestellt, jedoch wird darauf verwiesen, dass eine fundierte Datenbasis dafür fehlt. Es gibt nur unzureichende und unstrukturierte Datensätze realer Bauwerke, um eine LCC Analyse aussagekräftig durchführen zu können [8].

7 Schlussfolgerungen

Die entwickelten Regelmaßnahmen (Kapitel 6.6) sind auf die Spezifika des Modelltunnels angepasst, können aber auch auf vergleichbare Problemstellungen angewandt werden. Vor allem die aufgeschlüsselten Entscheidungen und Alternativen können als Entscheidungshilfe bei ähnlichen Projekten dienen. Sie decken jedoch nur einen Bruchteil der vorhandenen Aufgabenstellungen in der Tunnelinstandhaltung ab. Erstrebenswert wäre zukünftig ein vereinheitlichter Regelmaßnahmenkatalog, indem je nach vorhandenen Schadensbildern, eine Regelmaßnahme für den Tunnel gewählt werden kann. Zahlreiche Vorteile wie eine einheitlichere Planung, genauere Kostenschätzungen, permanente Weiterentwicklung mit den Erkenntnissen aus der Praxis, etc., könnten damit gewonnen werden. Die STUVA-Sachstandsberichte 2011-2022 [43–46] haben noch keinen Regelmaßnahmenkatalog entwickelt, sie bilden jedoch die umfangreichsten technischen Standardwerke im Bereich der Tunnelinstandhaltung.

Der Fokus dieser Arbeit liegt maßgeblich auf den bautechnischen Aspekten der Tunnelinstandhaltung. Als Ergebnis der Kostenermittlung hat sich jedoch gezeigt, dass diese für den Modelltunnel nur einen geringen Kostenbestandteil ausmachen. Der Hauptkostentreiber ist die Ausrüstung. Dies ist unter anderem mit dem Erneuerungskonzept des Modelltunnels zu erklären, da die entwickelten Regelmaßnahmen nur bereichsweise angewandt werden. Die Ausrüstung wird hingegen auf der kompletten Länge des Modelltunnels erneuert.

Eine LCC-Analyse für den Modelltunnel ist nach dem derzeitigen Forschungsstand zwar möglich, jedoch fehlt eine zugrundeliegende, öffentlich zugängliche Datenbasis. Daher kann derzeit keine seriöse Betrachtung mit den momentan zugänglichen Daten gemacht werden. Zukünftig könnte die derzeit in Entwicklung befindliche ÖGG Richtlinie zu Lebenszykluskosten Abhilfe verschaffen.

8 Verzeichnisse

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung der Instandhaltung gemäß DIN 31051 [7].....	2
Abbildung 2: Auszug aus der Tunneldatenbank der ÖBB Stand 2020: Tunnelausbau [43].....	3
Abbildung 3: Bauwerkslängen von Tunnelbauwerken der ÖBB mit einem Bauwerksalter von mehr als 100 Jahren (vor 1922 errichtet). Stand 2022 [29].....	5
Abbildung 4: Auszug aus der Tunneldatenbank der ÖBB Stand 2020: Bauwerksalter gewichtet nach Tunnellänge [43].....	5
Abbildung 5: Auszug aus der Tunneldatenbank der ÖBB Stand 2020: Verteilung Zustandsklassen aller Tunnel [43].....	6
Abbildung 6: Maßgebende Einflussfaktoren zur Beurteilung der Tragfähigkeit eines gemauerten Tunnelausbaues [43].....	8
Abbildung 7:a) Profilsäge während des Arbeitsvorgangs. b) Detaildarstellung Profilsäge [41].....	8
Abbildung 8: Anbaubaufräsen bei Profilierungsarbeiten [47].	9
Abbildung 9: TiT-Anlage (Herrenknecht AG) [46].....	9
Abbildung 10: Entscheidungsbaum für die Anwendung der TiT-Methode [46].	10
Abbildung 11: a) Rippe mit Bewehrung und Rückverankerung [46] b) Anwendungsbeispiel einer Rippenbauweise in bestehender Ziegelinnenschale [44].....	11
Abbildung 12: a) Einbau des Firststeines mit Ringdichtung [43]. b) Aufbau der Betonfertigteile. Plangrundlagen Normalbauweise-Amberg Engineering [12].	12
Abbildung 13: TAS von Herrenknecht [43].....	12
Abbildung 14: Beispiel für einen Ersatzneubau einer Innenschale in einem Bestandstunnel [43].	13
Abbildung 15: Maschineller Abtrag einer Tunnelbeschichtung in einem Straßentunnel [43].....	14
Abbildung 16: Beispiel einer Mittelentwässerung in einem 2-gleisigen Tunnel [43].....	15
Abbildung 17: Beispiel einer Entwässerungslösung mit Rigole [44].....	16
Abbildung 18: a) Aufbringung einer Spritzabdichtung im Gevingas Tunnel b) Applikation einer Spritzabdichtung mit einem Spritzroboter. [24].....	17
Abbildung 19: a) Kleinhilfsbrücke für die Sohlrippe. b) Bewehrung Sohlrippe [44].	17
Abbildung 20: Gängiges System im österreichischen und deutschen Raum einer Festen Fahrbahn der Firma Porr. System Slab Track Austria [35].	18
Abbildung 21: Randbedingungen und Wechselwirkungen einer Einzelmaßnahme [43].....	19
Abbildung 22: Schematische Darstellung der maßgeblichen Sperrvarianten [43].....	20
Abbildung 23: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Sperrarten und den betrieblichen Auswirkungen für den Bahnbetrieb [43].....	21
Abbildung 24: a) Kategorisierung in Abhängigkeit von der Dauer der Einschränkung und Ausfall/Umleitung der Zugtrasse. b) Darstellung der Fristen für die Koordinierung und Veröffentlichung der Einschränkungen. Die Kategorie „X“ stellt den Zeitpunkt des Fahrplanwechsels dar, welcher bei der ÖBB-Infrastruktur AG einmal jährlich im Dezember stattfindet. Die Zahl nach dem „X“ ist die Fristdauer in Monaten vor dem Fahrplanwechsel in der die Koordinierung und Veröffentlichung erfolgen muss [2; 43].....	22
Abbildung 25: a) Mobile Instandsetzungseinheit (MIE) [13]. b) Auf der rechten Seite des Bildes ist eine feste Absperrung zu erkennen, um ein Eindringen in den Gefahrenraum zu verhindern [44].	23
Abbildung 26: Schematische Grafik der zeitlichen Entwicklung der Kostenbestandteile [32].	26
Abbildung 27: Bestimmung des pauschalen Risikozuschlages [32].	28
Abbildung 28: Tunnelprofil (mittleres Druckprofil) des Modelltunnels.....	30
Abbildung 29: Profildifferenzen in alten Eisenbahntunneln [17].	30
Abbildung 30: Geologischer Längsschnitt des Modelltunnels.....	31
Abbildung 31: Beispielhaftes Laserscanfoto des Modelltunnels [16]. a) Erkennbare Feuchtstellen im Kämpferbereich. b) Nass-Tropfstele im Ulmbereich. Das Bergwasser sammelt sich im Bereich des Oberbaus ohne Ableitung. c) Alte Spritzbetonversiegelung aus vorheriger Instandsetzung.	32
Abbildung 32: (A) Kategorisierung der Wasserzutritte im Modelltunnel. (B) Kategorisierung der Schadenstypen im Modelltunnel	33
Abbildung 33: Schadensbilder im Modelltunnel. a) Abschalung, Abplatzung, Ausbruch von Spritzbeton. b) Abschalung, Abplatzung, Ausbruch von Natursteinmauerwerk. c) Eisbildung in den Portalbereichen. d) Risse in Mauerwerk. [44].....	34

Abbildung 34: Verteilung der Intensität bzw. Häufigkeit von Wasserzutritten. Die Kategorisierung der Wasserzutritte (Abbildung 32A) ist für eine bessere Übersicht in dieser Abbildung in die Intensitäten stark, mittel und gering gegliedert. Die exakte Aufteilung erfolgt gemäß Anhang 9.8.	35
Abbildung 35: Verteilung der Schadensintensität bzw. Häufigkeit entlang des Modelltunnels. Die Kategorisierung der Schadenstypen (Abbildung 32B) ist für eine bessere Übersicht in dieser Abbildung in die Intensitäten stark, mittel und gering gegliedert. Die exakte Aufteilung erfolgt gemäß Anhang 9.8.	35
Abbildung 36: Übersicht Situation/Rahmenbedingungen und Projektziele/Anforderungen des Modelltunnels.	36
Abbildung 37: Maße in [mm]. Lichtraum LPR 1 inkl. Seitenräume für $R \geq 250$ m in Anwendung bei der ÖBB [46].	37
Abbildung 38: Variantenaufstellung für den Modelltunnel und vergleichbare Bauwerke.	38
Abbildung 39: Schematische Skizze der Instandsetzungen bei Variante 0.	39
Abbildung 40: Schematische Skizze Neubau zweiröhriger Tunnel der Variante 1.	39
Abbildung 41: Schematische Skizze der Vollerneuerung am Bestandstunnel und Neubau zweite Röhre.	40
Abbildung 42: Schematische Skizze des Rettungstollens (Bestandstunnel) und Neubau zweite Röhre.	40
Abbildung 43: Schematische Skizze der Vollerneuerung und Aufweitung des Bestandtunnels.	41
Abbildung 44: Schematische Skizze der Vollerneuerung Bestandtunnels zweigleisig.	41
Abbildung 45: Schematische Skizze der Vollerneuerung Bestandtunnels zweigleisig.	42
Abbildung 46: Schematische Skizze der Teilerneuerung Bestandtunnels zweigleisig.	42
Abbildung 47: Bewertungsmatrix der Varianten, beurteilt auf einer Skala von 1 bis 5.	43
Abbildung 48: Überblick der verschiedenen Varianten und den Regelmaßnahmen (RM). Die Symbole „+, ~, -“ repräsentieren den Umfang der RM.	44
Abbildung 49: Optionsbaum für die Portalbereiche.	45
Abbildung 50: Variante 6A . RM1 in den Portalbereichen: TM (0-160; 6120-6250) mit dem Ausbautyp 1: Schweres Druckprofil. Variante 6B . RM2 in den Portalbereichen: TM (0-160; 6120-6250) mit dem Ausbautyp 1: Schweres Druckprofil.	46
Abbildung 51: Optionsbaum für den Bereich der kataklastische Störungszone.	47
Abbildung 52: Variante 6A und 6B : RM3 in den Bereichen der kataklastischen Störungszone: TM (4090-4160) mit dem Ausbautyp 1: Schweres Druckprofil.	48
Abbildung 53: Optionsbaum für den Bereich der quellenden Serizitphyllite.	50
Abbildung 54: Variante 6A und 6B . RM4 in den Bereichen der quellenden Serizitphyllite: TM (4590-4640;4950-4970) mit dem Ausbautyp 2: Mittleres Druckprofil.	50
Abbildung 55: Optionsbaum für den Bereich der wasserführenden Klüfte.	51
Abbildung 56: Variante 6A . RM5 in den Bereichen von wasserführenden Klüften: TM (1220-1260; 2060-2100; 2770-2890; 5730-5770) mit dem Ausbautyp 3: Leichtes Druckprofil. Variante 6B . RM6 in den Bereichen von wasserführenden Klüften: TM (1220-1260; 2060-2100; 2770-2890; 5730-5770) mit dem Ausbautyp 3.	52
Abbildung 57: Optionsbaum für die Bereich der von vereinzelt Feuchtstellen im Tunnel.	53
Abbildung 58: Variante 6A und 6B: RM7 in den Bereichen mit vereinzelt Feuchtstellen mit dem Ausbautyp 3: Leichtes Druckprofil.	54
Abbildung 59: Optionsbaum für den Oberbau	55
Abbildung 60: Detail Sohle: Schotteroberbau, Details. Übersicht Gesamtmaßnahmen	55
Abbildung 61: Prinzipskizze der Ausrüstung im Modelltunnel.	56
Abbildung 62: Überblick der Bautechnischen Maßnahmen.	58
Abbildung 63: Auszug aus den verwendeten Leistungsansätzen und Zusammenfassung in Leistungsgruppen (LG) für die Bauzeitermittlung.	60
Abbildung 64: Berechnung der Bauzeit von RM1	61
Abbildung 65: Ausschnitt aus Bauzeit-/Bauablaufplan (Anhang 9.2) zur systematischen Erklärung. .	61
Abbildung 66: Zusammenfassende Darstellung des Bauzeit-/Bauablaufplans der Hauptmaßnahmen während der Vollsperrung (Anhang 9.3, Anhang 9.5).	62
Abbildung 67: Zusammenfassende Darstellung des Bauzeit-/Bauablaufplans der vorgezogenen Maßnahmen während der Teilsperre (Anhang 9.2, Anhang 9.4).	63
Abbildung 68: Systematik zur Berechnung der Elementkosten am Beispiel von Position 8: RM4.	65

Abbildung 69: Gegenüberstellung der Gesamtkosten von Variante 6A und Variante 6B	67
Abbildung 70: Aufschlüsselung der Gesamtkosten von Variante 6A und Variante 6B nach Positionen.	68
Abbildung 71: Einflussfaktoren für die Degradation von Tunnelbauwerken [13].....	69
Abbildung 72: Schema eines vertieften LCC Modells für Brücken [39].....	69

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung von Tunnelbauwerken der ÖBB, welche nach den Prinzipien der „Alten Österreichischen Tunnelbaumethode“ und vergleichbaren alten Bauweisen errichtet worden sind und eine Länge von mehr als einem Kilometer aufweisen [29].	4
Tabelle 2: Kerndaten des Modelltunnels.	29
Tabelle 3: Positionen für die Kostenermittlung.....	64
Tabelle 4: Pauschale Zuschläge für Unberücksichtigtes	65
Tabelle 5: Pauschale Zuschläge für allgemeines Risiko r_{Allg} und Baugrundrisiko r_{BG}	66
Tabelle 6: Mittlere Zinssätze der ÖBB [3] mit eigenen Abschätzungen für 2023-2026.....	66

8.3 Literaturverzeichnis

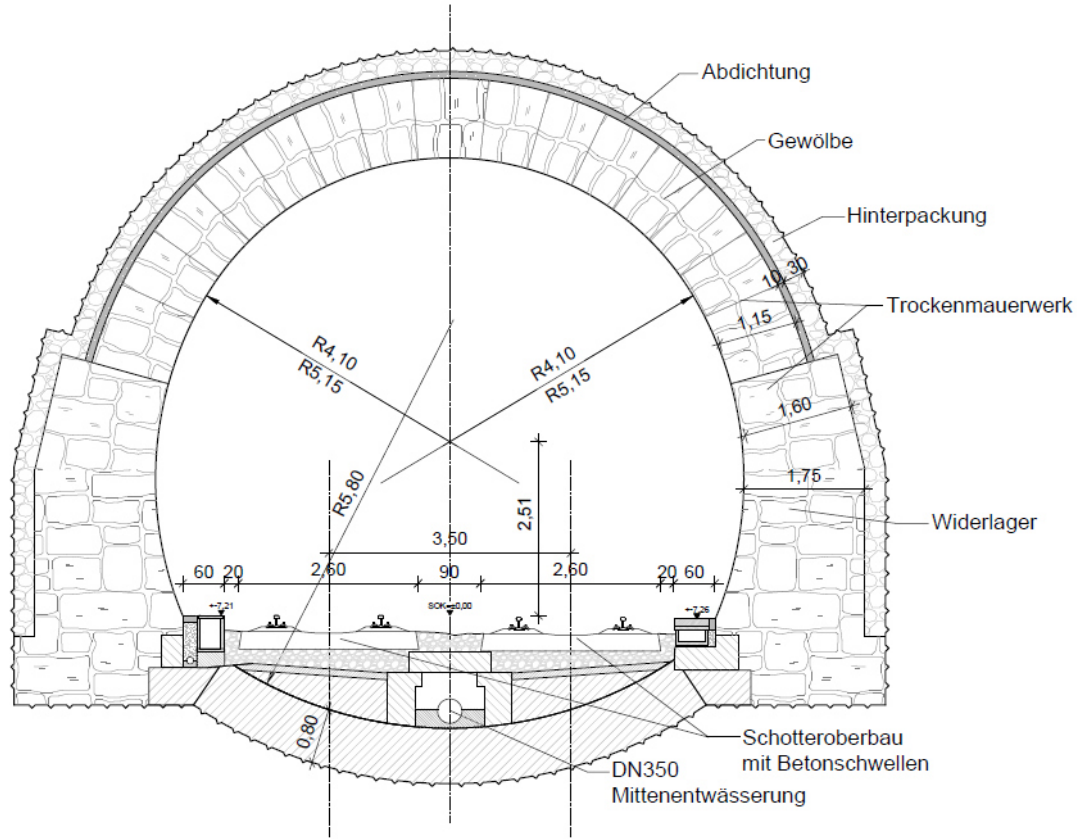
- [1] Amtsblatt der Europäischen Union (2014) *Verordnung (EU) Nr.1303/2014 der Kommission über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im Eisenbahnsystem der Europäischen Union.*
- [2] Amtsblatt der Europäischen Union (2012) *Richtlinie 2012/34/EU des europäischen Parlamentes und des Rates zur Schaffung eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraums (Neufassung).*
- [3] Aussage Gerald Winkler-Baumanagement, ÖBB Infrastruktur AG (19.07.2022).
- [4] BASF Construction Chemicals Europe Ltd. (2011) *Pre-Excavation Grouting in Rock Tunneling.* 4. Aufl.
- [5] Brandl, H. (2015) *Bauwerke in Kriechhängen* in: Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift 160, H. 1-12, S. 193–203.
- [6] Bundesgesetzblatt (1999) *Verordnung des Bundesministers für Wissenschaft und Verkehr über den Schutz von ArbeitnehmerInnen im Bereich von Gleisen (Eisenbahn-ArbeitnehmerInnenschutzverordnung – EisbAV).*
- [7] DIN 31051 (2012) *Grundlagen der Instandhaltung – Deutsches Institut für Normung, Berlin.*
- [8] Engelhardt, S. (2015) *Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken – Modulares Prozessmodell zur ökonomischen Optimierung von Straßentunneln.* Dissertation. Universität der Bundeswehr München. Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften.
- [9] Erkat Spezialmaschinen und Service GmbH (2016) *Erkat-Baggeranbaufräsen für vielseitige Einsätze im Berg- und Tunnelbau* in: Geomechanics and Tunnelling 9, H. 6, S. 728–732.
- [10] Freudenstein, S. et al. (2015) *Feste Fahrbahn in Betonbauweise* in: BetonKalender, S. 531–584.
- [11] Galler, R. (2020) *Montanuniversität Leoben: Skriptum zur Vorlesung Tunnelsicherheit.*
- [12] Grossauer, K.; Modetta, F.; Tanner, U. (2017) *The "Standard Tunnel Construction Method" of Rhaetian Railways* in: Geomechanics and Tunnelling 10, H. 5, S. 542–550.
- [13] Heissenberger, R. (2021) *Montanuniversität Leoben: Skriptum zur Vorlesung Tunnelinstandsetzung – ÖBB-Infrastruktur AG.*
- [14] Holst, R. et al. (2006) *Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke* in: Brücken- und Ingenieurbau, H. B 48, S. 1-68.
- [15] Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GmbH (Stand 2022) *Datenbank: Archivunterlagen und aktuelle Projekte.*
- [16] Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GmbH (2021) *Auszug firmeninterne Datenbank – Laserscanaufnahmen.*
- [17] Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GmbH (2017) *Auszug firmeninterne Datenbank – Laserscanauswertung alter Eisenbahntunneln.*
- [18] K.K Eisenbahnbauverwaltung (1903) *Tunnelbau Blatt 2c. Karawanken-Tunnel – Archiv ÖBB.*
- [19] K.K Eisenbahnbauverwaltung (1902) *Tunnelbau Blatt 2c. Tauern Tunnel – Archiv ÖBB.*
- [20] KEMROC Spezialmaschinen GmbH (2021) *Many Applications in Tunnel Construction, Renovation and Demolition* in: Tunnel, H. 5, S. 14–18.
- [21] Lemke, S. (2015) *Eine Kontrovers geführte Diskussion: Spritzbare Abdichtung im Tunnelbau* in: Spritzbeton-Tagung 2015.
- [22] Master Builders Solutions *Handbook for Composite Shell Lining design with MasterSeal 345* [online]. <https://www.master-builders-solutions.com/en-asiapacific/download-area?k=345> [Zugriff am: 10. Nov. 2021].
- [23] Matthews, V. (2007) *Bahnbau.* 7. Aufl. Stuttgart: Teubner.
- [24] Mayr, R. (2012) *Unterschiedliche Erfahrungen von einschaligen Bauweisen mit Spritzabdichtung und neue Erkenntnisse hinsichtlich Verbundwirkung und Frostbeständigkeit* in: Spritzbeton-Tagung 2012.
- [25] Müller, L. (1978) *Grundgedanken und Grundsätze der "Neuen Österreichischen Tunnelbauweise"* in: Felsmechanik Kolloquium Karlsruhe, 1978.
- [26] ÖBB (2021) *Betriebsanweisung 90.01. Schriftliche Betriebsanweisung Arbeitnehmerschutz – ÖBB-Infrastruktur AG, Wien.*
- [27] ÖBB (2017) *Handbuch zur Kostenermittlung – ÖBB-Infrastruktur AG, Wien.*
- [28] ÖBB (2012) *Regelwerk: Konstruktiver Ingenieurbau 06.01.02. Instandhaltung / Instandhaltungsplan – ÖBB-Infrastruktur AG, Wien.*

- [29] ÖBB-Infrastruktur AG (2022) *Auszug firmeninterne Datenbank – Stand Tunnelbauwerke: Bauwerksart, Name, Jahr der Inbetriebnahme, Länge, Gleisanzahl.*
- [30] ÖBB-Infrastruktur AG *Zielnetz 2025+Ergebnisbericht* [online].
<https://infrastruktur.oebb.at/de/unternehmen/fuer-oesterreich/zukunft-bahn-zielnetz> [Zugriff am: 19. Jun. 2022].
- [31] ÖBV (2012) *Richtlinie Tunnelabdichtung – Österreichische Bautechnik Vereinigung, Wien.*
- [32] ÖGG (2016) *Richtlinie für die Kostenermittlung für Projekte der Verkehrsinfrastruktur unter Berücksichtigung relevanter Projektrisiken – Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Salzburg.*
- [33] ÖNORM EN 12715 (2021) *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau-Injektionen – Austrian Standards International, Wien.*
- [34] ÖNORM EN 13306 (2018) *Instandhaltung-Begriffe der Instandhaltung – Austrian Standards International, Wien.*
- [35] PORR Bau GmbH - Slab Track Austria *Unsere Technologie* [online].
<https://slabtrackaustria.com/unsere-technologie/> [Zugriff am: 18. Feb. 2022].
- [36] Rabcewicz, L. v. (1965) *Österreichische Tunnelbauweise - Entstehung, Ausführungen u. Erfahrungen* in: *Der Bauingenieur* 40, H. 8.
- [37] Rabcewicz, L. v. (1944) *Gebirgsdruck und Tunnelbau.* Wien: Springer.
- [38] Reichard, N. (2021) *Montanuniversität Leoben: Skriptum zur Vorlesung Tunnelinstandsetzung – Östu Stettin Hoch- und Tiefbau GmbH.*
- [39] RVS 13.05.11 (2017) *Lebenszykluskostenermittlung für Brücken – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.*
- [40] Rziha, F. (1872) *Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst.* Berlin: Ernst & Korn.
- [41] Seywald, C.; Helmberger, A.; Matt, R. (2017) *An innovative method of upgrading old rail tunnels under continued operation - Example Rekawinkler- and Kleiner Dürreberg Tunnel* in: *Geomechanics and Tunneling* 10, H. 5, S. 533–541.
- [42] Stur, M. et al. (2015) *Lokale Beseitigung von Versinterungen in Bergwasserdrainagen* in: *Tunnel*, H. 1, S. 1–7.
- [43] STUVA-Arbeitskreis (2021) *Sachstandsbericht "Erneuerung von Verkehrstunneln unter Betrieb" – Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen, Köln.*
- [44] STUVA-Arbeitskreis (2017) *Sachstandsbericht "Instandsetzungsstrategien und -verfahren für Verkehrstunnel" – Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen, Köln.*
- [45] STUVA-Arbeitskreis (2015) *Sachstandsbericht "Instandsetzung von Straßentunneln" – Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen, Köln.*
- [46] STUVA-Arbeitskreis (2011) *Sachstandsbericht "Sanierung von Eisenbahntunneln" – Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen, Köln.*
- [47] Terex Germany GmbH & Co KG (2012) *Terex-Anbaufräsen im Einsatz bei einer Tunnelanierung* in: *Geomechanics and Tunneling* 5, H. 4, S. 397–398.
- [48] UIC 779-10-2 (2011) *Management and maintenance principles for existing tunnels – International Union of Railways, Paris.*
- [49] Vetter, S.; Galli, M.; Steiner, P. (2020) *Erneuerung Kuckuckslay Tunnel – Aktuelle Erfahrungen beim Einsatz der Tunnel-im-Tunnel-Methode* in: *Geomechanics and Tunneling* 13, H. 5, S. 557–565.
- [50] Wulf, S.; Georg-Michael, V. (1996) *Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode* in: *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift* 141, H. 7-8, S. 311–318.
- [51] Zimmermann, S.; Mayer, R.; Rene, B. (2021) *Sanierung Selztaltunnel mittels Spritzabdichtung* in: *Spritzbeton-Tagung 2021.*

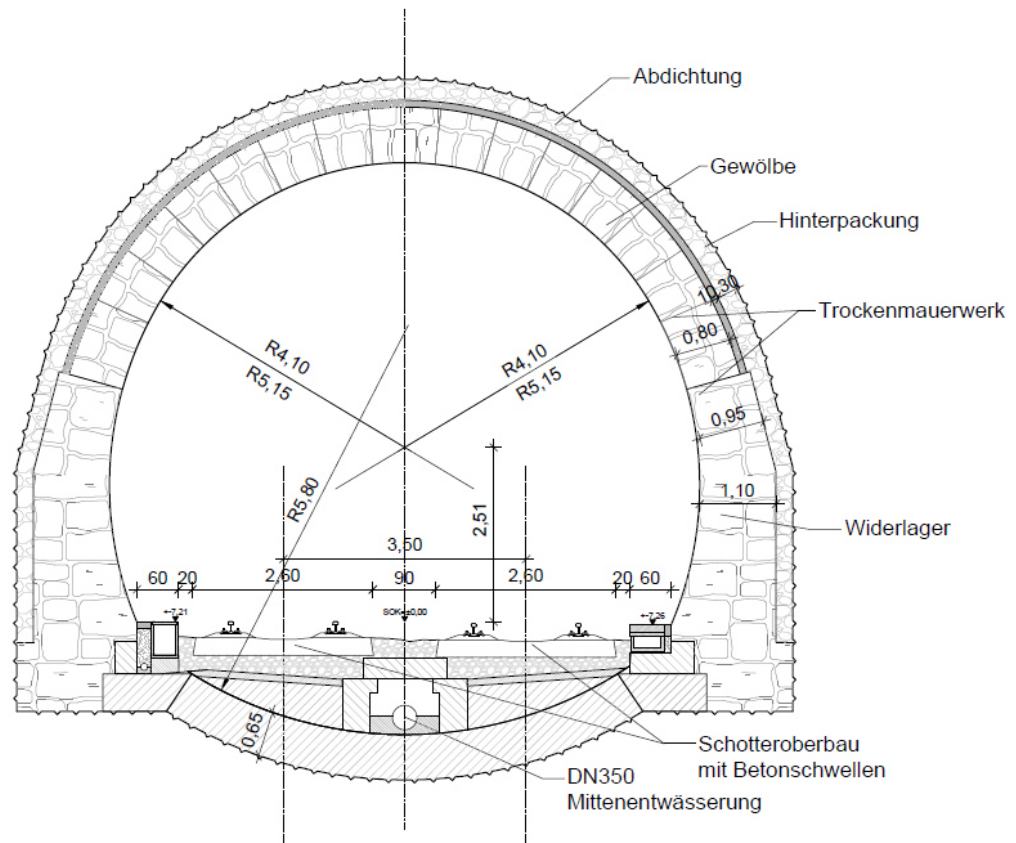
9 Anhang Bestand Modelltunnel

9.1 Anhang Druckprofile Bestand

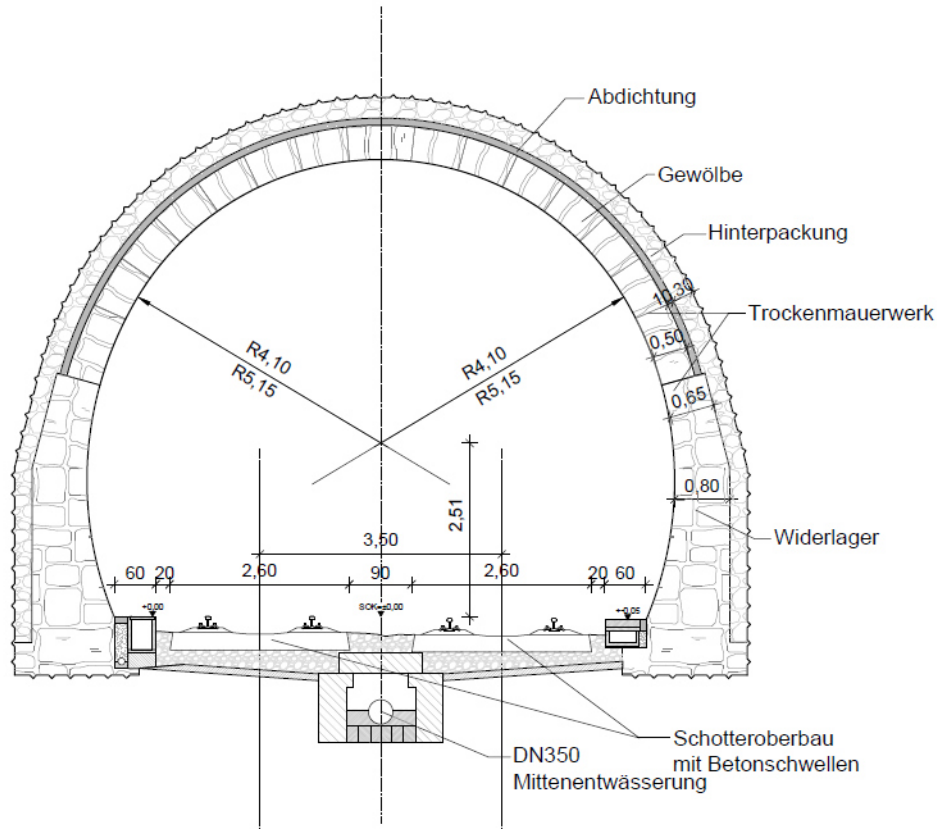
Ausbautyp 1
schweres Druckprofil



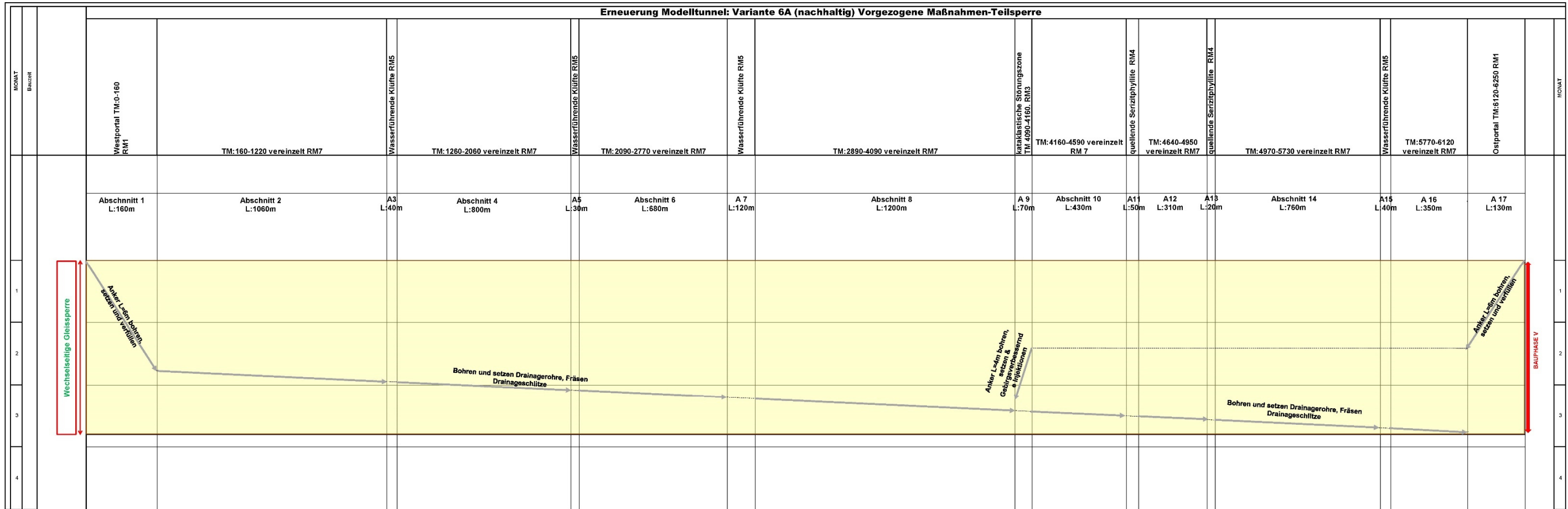
Ausbautyp 2 mittleres Druckprofil



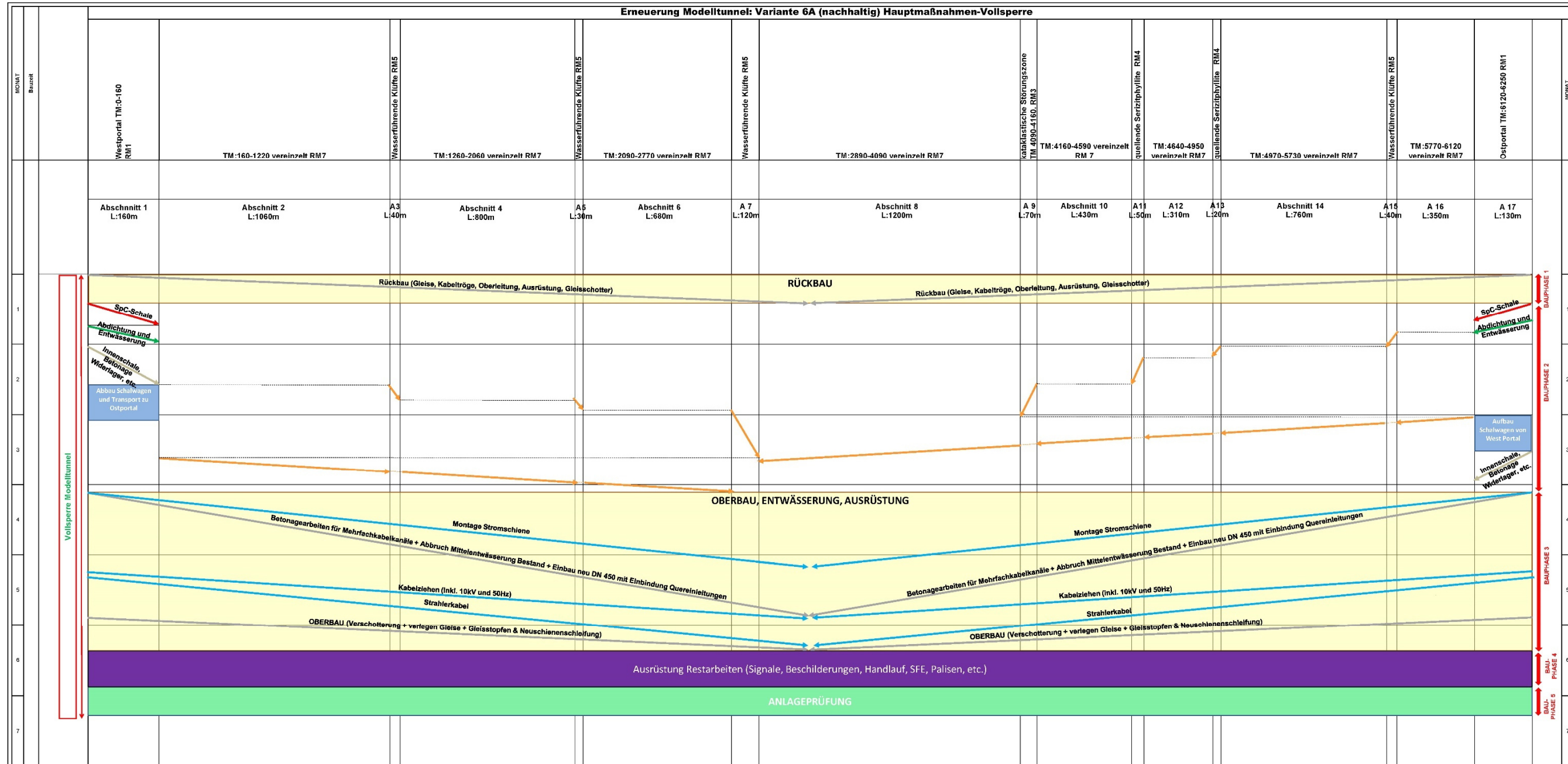
Ausbauttyp 3 leichtes Druckprofil



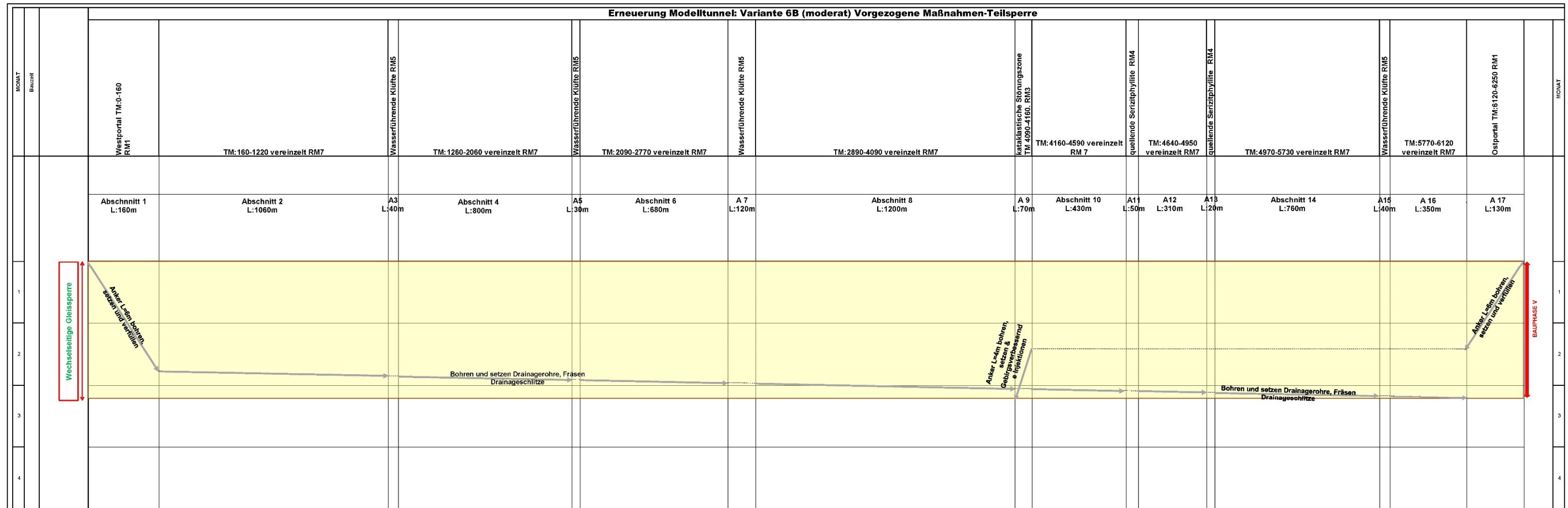
9.2 Anhang Bauzeit-/Bauablaufplan Variante 6A: Vorgezogene Maßnahmen-Teilsperre



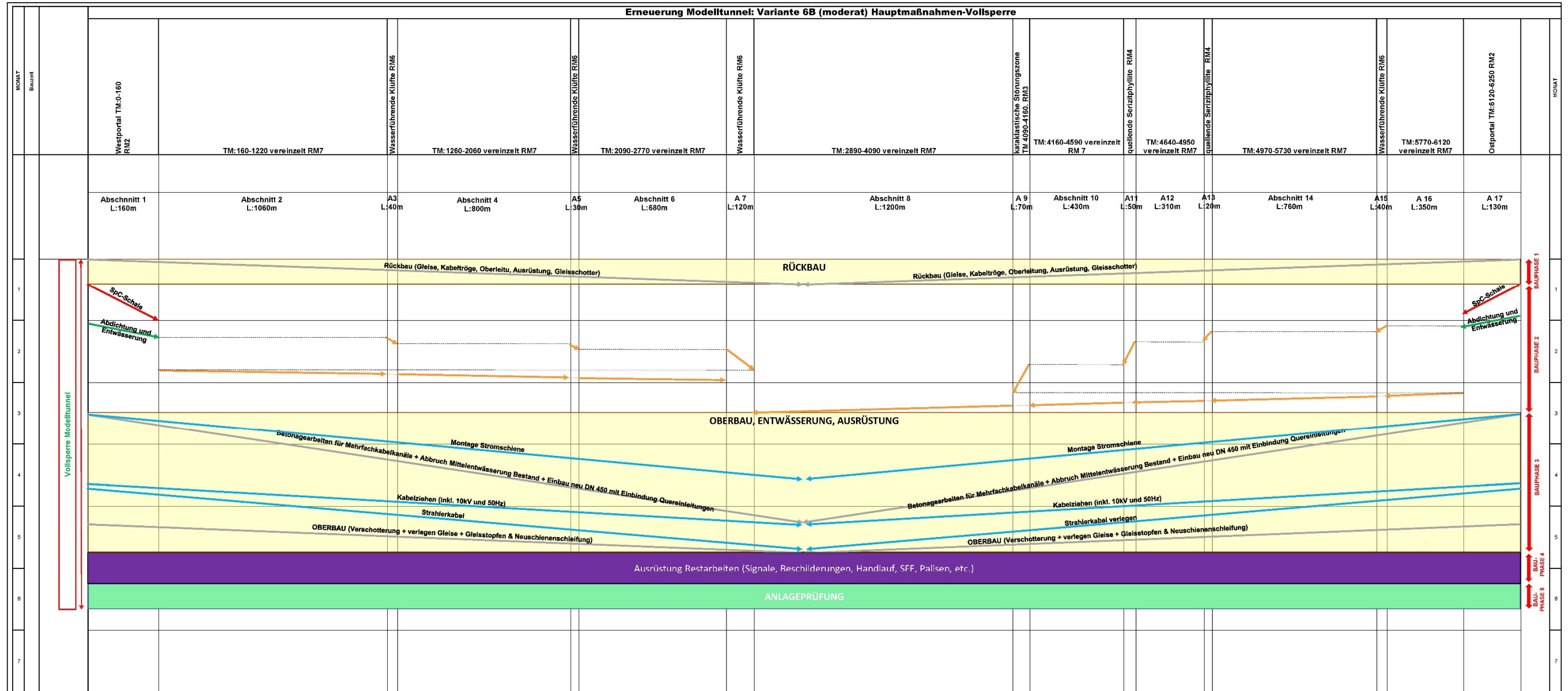
9.3 Anhang Bauzeit-/Bauablaufplan Variante 6A: Hauptbaumaßnahmen-Vollsperr



9.4 Anhang Bauzeit-/Bauablaufplan Variante 6B: Vorgezogene Maßnahmen-Teilsperre



9.5 Anhang Bauzeit-/Bauablaufplan Variante 6B: Hauptbaumaßnahmen-Vollsperr



9.6 Gesamtkosten Variante 6A

Position	Leistungsbezeichnung	Elementkosten pro lfm [€/lfm]	[lfm]	Elementkosten [€]	U ^{Unberücksichtigtes} [%]	Anteil Unberücksichtigtes [€]	Basiskosten B [€]	Wertanpassung & Gleitung G [€]	r _{Allg} [%]	r _{BG} [%]	Risikozuschlag Allgemein R _{Allg} [€]	Risikoanteil Baugrund R _{BG} [€]	Risiko R = R _{Allg} + R _{BG} [€]	V [%]	Vorausvalorisierung V [€]	BGRV [€]
1.1	VorgezogeneMaßnahmen: Ankerung RM1 & RM2	€ 702,67	290	€ 203 774,63	20	€ 40 754,93	€ 244 529,55	€ 0,00	15	20	€ 36 679,43	€ 48 905,91	€ 85 585,34	17,0	€ 41 482,54	€ 371 597,44
1.2	VorgezogeneMaßnahmen: Ankerung & Injektionen RM3	€ 4 065,37	80	€ 325 229,41	20	€ 65 045,88	€ 390 275,29	€ 0,00	15	50	€ 58 541,29	€ 195 137,64	€ 253 678,94	17,0	€ 66 207,18	€ 710 161,40
1.3	VorgezogeneMaßnahmen: Drainage RM7	€ 432,46	430	€ 185 956,83	20	€ 37 191,37	€ 223 148,19	€ 0,00	15	20	€ 33 472,23	€ 44 629,64	€ 78 101,87	17,0	€ 37 855,36	€ 339 105,42
1.4	VorgezogeneMaßnahmen: Sicherheitspaket Betrieb	/	/	€ 714 960,86	20	€ 142 992,17	€ 857 953,03	€ 0,00	0	0	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	17,0	€ 145 545,08	€ 1 003 498,12
1.5	VorgezogeneMaßnahmen: Baustellengemeinkosten	/	/	€ 178 740,22	20	€ 35 748,04	€ 214 488,26	€ 0,00	25	0	€ 53 622,06	€ 0,00	€ 53 622,06	17,0	€ 36 386,27	€ 304 496,59
2	Rückbau Oberbau und Ausrüstung	€ 702,33	6250	€ 4 389 540,24	20	€ 877 908,05	€ 5 267 448,29	€ 0,00	25	0	€ 1 316 862,07	€ 0,00	€ 1 316 862,07	17,0	€ 893 581,78	€ 7 477 892,15
3	Neubau Oberbau, Entwässerung	€ 1 539,47	6250	€ 9 621 682,76	15	€ 1 443 252,41	€ 11 064 935,17	€ 0,00	15	0	€ 1 659 740,28	€ 0,00	€ 1 659 740,28	17,0	€ 1 877 080,50	€ 14 601 755,95
4	Ausrüstung	€ 3 828,36	6250	€ 23 927 250,00	15	€ 3 589 087,50	€ 27 516 337,50	€ 0,00	15	0	€ 4 127 450,63	€ 0,00	€ 4 127 450,63	17,0	€ 4 667 933,41	€ 36 311 721,53
5	Regelmaßnahme 1 (RM1)	€ 6 699,91	290	€ 1 942 974,56	5	€ 97 148,73	€ 2 040 123,29	€ 0,00	15	20	€ 306 018,49	€ 408 024,66	€ 714 043,15	17,0	€ 346 091,11	€ 3 100 257,55
6	Regelmaßnahme 2 (RM2)	€ 1 911,99	0	€ 0,00	5	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	15	20	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	17,0	€ 0,00	€ 0,00
7	Regelmaßnahme 3 (RM3)	€ 1 782,41	80	€ 142 592,72	5	€ 7 129,64	€ 149 722,36	€ 0,00	15	10	€ 22 458,35	€ 14 972,24	€ 37 430,59	17,0	€ 25 399,24	€ 212 552,19
8	Regelmaßnahme 4 (RM4)	€ 6 822,59	70	€ 477 581,22	5	€ 23 879,06	€ 501 460,29	€ 0,00	15	20	€ 75 219,04	€ 100 292,06	€ 175 511,10	17,0	€ 85 068,85	€ 762 040,24
9	Regelmaßnahme 5 (RM5)	€ 1 528,78	230	€ 351 619,99	5	€ 17 581,00	€ 369 200,99	€ 0,00	15	0	€ 55 380,15	€ 0,00	€ 55 380,15	17,0	€ 62 632,09	€ 487 213,22
10	Regelmaßnahme 6 (RM6)	€ 1 154,71	0	€ 0,00	5	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	15	0	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	17,0	€ 0,00	€ 0,00
11	Regelmaßnahme 7 (RM7)	€ 837,94	430	€ 360 313,25	10	€ 36 031,32	€ 396 344,57	€ 0,00	15	0	€ 59 451,69	€ 0,00	€ 59 451,69	17,0	€ 67 236,78	€ 523 033,04
12	Projektmanagementkosten	/	/	€ 784 810,97	5	€ 39 240,55	€ 824 051,51	€ 0,00	15	0	€ 123 607,73	€ 0,00	€ 123 607,73	17,0	€ 139 793,95	€ 1 087 453,19
13	Baustellengemeinkosten	/	/	€ 10 303 388,69	10	€ 1 030 338,87	€ 11 333 727,56	€ 0,00	25	0	€ 2 833 431,89	€ 0,00	€ 2 833 431,89	17,0	€ 1 922 679,04	€ 16 089 838,49
14	Planungskosten	/	/	€ 618 203,32	15	€ 92 730,50	€ 710 933,82	€ 0,00	35	10	€ 248 826,84	€ 71 093,38	€ 319 920,22	17,0	€ 120 604,41	€ 1 151 458,45
Summe [€]				€ 54 528 620			€ 62 104 680	€ 0					€ 11 893 818		€ 10 535 578	€ 84 534 075
Summe gerundet [Mio €]				54,5			62,1	0,0					11,9		10,5	84,5

9.7 Gesamtkosten Variante 6B

Position	Leistungsbezeichnung	Elementkosten pro lfm [€/lfm]	[lfm]	Elementkosten [€]	U ^{Unberücksichtigtes} [%]	Anteil Unberücksichtigtes [€]	Basiskosten B [€]	Wertanpassung & Gleitung G [€]	r _{Allg} [%]	r _{BG} [%]	Risikozuschlag Allgemein R _{Allg} [€]	Risikoanteil Baugrund R _{BG} [€]	Risiko R = R _{Allg} + R _{BG} [€]	V [%]	Vorausvalorisierung V [€]	BGRV [€]
1.1	VorgezogeneMaßnahmen: Ankerung RM1 & RM2	€ 702,67	290	€ 203 774,63	20	€ 40 754,93	€ 244 529,55	€ 0,00	15	20	€ 36 679,43	€ 48 905,91	€ 85 585,34	17,0	€ 41 482,54	€ 371 597,44
1.2	VorgezogeneMaßnahmen: Ankerung & Injektionen RM3	€ 4 065,37	80	€ 325 229,41	20	€ 65 045,88	€ 390 275,29	€ 0,00	15	50	€ 58 541,29	€ 195 137,64	€ 253 678,94	17,0	€ 66 207,18	€ 710 161,40
1.3	VorgezogeneMaßnahmen: Drainage RM7	€ 432,46	190	€ 82 166,97	20	€ 16 433,39	€ 98 600,36	€ 0,00	15	20	€ 14 790,05	€ 19 720,07	€ 34 510,13	17,0	€ 16 726,79	€ 149 837,28
1.4	VorgezogeneMaßnahmen: Sicherheitspaket Betrieb	/	/	€ 611 171,00	20	€ 122 234,20	€ 733 405,21	€ 0,00	0	0	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	17,0	€ 124 416,51	€ 857 821,72
1.5	VorgezogeneMaßnahmen: Baustellengemeinkosten	/	/	€ 152 792,75	20	€ 30 558,55	€ 183 351,30	€ 0,00	25	0	€ 45 837,83	€ 0,00	€ 45 837,83	17,0	€ 31 104,13	€ 260 293,25
2	Rückbau Oberbau und Ausrüstung	€ 702,33	6250	€ 4 389 540,24	20	€ 877 908,05	€ 5 267 448,29	€ 0,00	25	0	€ 1 316 862,07	€ 0,00	€ 1 316 862,07	17,0	€ 893 581,78	€ 7 477 892,15
3	Neubau Oberbau, Entwässerung	€ 1 539,47	6250	€ 9 621 682,76	15	€ 1 443 252,41	€ 11 064 935,17	€ 0,00	15	0	€ 1 659 740,28	€ 0,00	€ 1 659 740,28	17,0	€ 1 877 080,50	€ 14 601 755,95
4	Ausrüstung	€ 3 828,36	6250	€ 23 927 250,00	15	€ 3 589 087,50	€ 27 516 337,50	€ 0,00	15	0	€ 4 127 450,63	€ 0,00	€ 4 127 450,63	17,0	€ 4 667 933,41	€ 36 311 721,53
5	Regelmaßnahme 1 (RM1)	€ 6 699,91	0	€ 0,00	5	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	15	20	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	17,0	€ 0,00	€ 0,00
6	Regelmaßnahme 2 (RM2)	€ 1 911,99	290	€ 554 476,97	5	€ 27 723,85	€ 582 200,82	€ 0,00	15	20	€ 87 330,12	€ 116 440,16	€ 203 770,29	17,0	€ 98 765,86	€ 884 736,97
7	Regelmaßnahme 3 (RM3)	€ 1 782,41	80	€ 142 592,72	5	€ 7 129,64	€ 149 722,36	€ 0,00	15	10	€ 22 458,35	€ 14 972,24	€ 37 430,59	17,0	€ 25 399,24	€ 212 552,19
8	Regelmaßnahme 4 (RM4)	€ 6 822,59	70	€ 477 581,22	5	€ 23 879,06	€ 501 460,29	€ 0,00	15	20	€ 75 219,04	€ 100 292,06	€ 175 511,10	17,0	€ 85 068,85	€ 762 040,24
9	Regelmaßnahme 5 (RM5)	€ 1 528,78	0	€ 0,00	5	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	15	0	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	17,0	€ 0,00	€ 0,00
10	Regelmaßnahme 6 (RM6)	€ 1 154,71	230	€ 265 582,33	5	€ 13 279,12	€ 278 861,45	€ 0,00	15	0	€ 41 829,22	€ 0,00	€ 41 829,22	17,0	€ 47 306,68	€ 367 997,35
11	Regelmaßnahme 7 (RM7)	€ 837,94	190	€ 159 208,18	10	€ 15 920,82	€ 175 129,00	€ 0,00	15	0	€ 26 269,35	€ 0,00	€ 26 269,35	17,0	€ 29 709,28	€ 231 107,62
12	Projektmanagementkosten	/	/	€ 784 810,97	5	€ 39 240,55	€ 824 051,51	€ 0,00	15	0	€ 123 607,73	€ 0,00	€ 123 607,73	17,0	€ 139 793,95	€ 1 087 453,19
13	Baustellengemeinkosten	/	/	€ 9 884 478,61	10	€ 988 447,86	€ 10 872 926,47	€ 0,00	25	0	€ 2 718 231,62	€ 0,00	€ 2 718 231,62	17,0	€ 1 844 507,71	€ 15 435 665,80
14	Planungskosten	/	/	€ 593 068,72	15	€ 88 960,31	€ 682 029,02	€ 0,00	35	10	€ 238 710,16	€ 68 202,90	€ 306 913,06	17,0	€ 115 700,94	€ 1 104 643,02
Summe [€]				€ 52 175 407			€ 59 565 264	€ 0					€ 11 157 228		€ 10 104 785	€ 80 827 277
Summe gerundet [Mio €]				52,2			59,6	0,0					11,2		10,1	80,8

9.8 Anhang Schadensbilder und Verteilung Modelltunnel

Bereiche	Block Nr.	Länge	TM von	TM bis	Feuchtstellen					Allgemeine Schäden												
					0-2 [m]	2-4 [m]	4-6 [m]	6-8 [m]	8-10 [m]	0-2 [m]	2-4 [m]	4-6 [m]	6-8 [m]	8-10 [m]								
					Intensität	Intensität	Intensität	Intensität	Intensität	Schadensart	Schadensart	Schadensart	Schadensart	Schadensart								
Portal West	1	10	0	10																		
	2	10	10	20	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht		nass												Eis; Hentv	
	3	10	20	30	nass	nass	nass	tropfend	tropfend	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Risse; Hentv	Eis; Risse; Hentv	Eis; AbSpC; L-Riss; Hentv								Eis; Risse; Hentv	
	4	10	30	40	tropfend	tropfend	tropfend	feucht	tropfend	Eis; L-Riss; Hentv	Eis; L-Riss;	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Risse;								Eis; Risse; Hentv	
	5	10	40	50	rinnend	rinnend	rinnend	rinnend	rinnend	Eis; Risse; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Risse; Hentv	Eis; Risse; Hentv								Eis; Risse; Hentv	
	6	10	50	60	rinnend	rinnend	tropfend	tropfend	feucht	Eis; AbSpC;	Eis; L-Riss; Hentv	Eis; Risse; Hentv	Eis; L-Riss; Hentv								Eis; AbSpC; Hentv	
	7	10	60	70	feucht	tropfend	tropfend	nass	nass	Eis; L-Riss; Hentv	Eis; Risse; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Risse; L-Riss;								Eis; Hentv	
	8	10	70	80	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht															
	9	10	80	90	vereinzelt feucht		vereinzelt feucht	feucht	feucht			Eis; Risse; Hentv	Eis; Risse; Hentv								Eis; Risse; AbSpC;	
	10	10	90	100	nass	nass	tropfend	tropfend	tropfend	Eis; AbSpC; Risse; Hentv	Eis; L-Riss; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; AbSpC; Risse;								Eis; AbSpC; Hentv	
	11	10	100	110	tropfend	tropfend	tropfend	rinnend	rinnend	Eis; L-Riss;	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Risse; Hentv	Eis; Risse; Hentv								Eis; AbSpC; Hentv	
	12	10	110	120	tropfend	rinnend	rinnend	tropfend	tropfend	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Risse; Hentv	Eis; L-Riss;	Eis; Risse; Hentv								Eis; Risse; Hentv	
	13	10	120	130	rinnend	tropfend	tropfend	tropfend	tropfend	Eis; L-Riss;	Eis; Risse; Hentv	Eis; L-Riss; AbSpC; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv								Eis; AbSpC; Hentv	
	14	10	130	140	rinnend	tropfend	nass	tropfend	nass	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; L-Riss; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Hentv								Eis; Risse;	
	15	10	140	150	nass	nass	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht	Eis; AbSpC; Hentv												
	16	10	150	160	nass	feucht	feucht	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht	Eis; Hentv	Eis; Hentv											
	17	10	160	170																		
18	10	170	180		vereinzelt feucht		vereinzelt feucht															
19	10	180	190																			
20	10	190	200																			
21	10	200	210																			
22	10	210	220		vereinzelt feucht								AusGes									
23	10	220	230																			
24	10	230	240																			
25	10	240	250																			
26	10	250	260																			
27	10	260	270																			
28	10	270	280																			
29	10	280	290																			
30	10	290	300							AusGes												
31	10	300	310																			
32	10	310	320																			
33	10	320	330																			
34	10	330	340																			
35	10	340	350																			
36	10	350	360																			
37	10	360	370																			
38	10	370	380		vereinzelt feucht																	
39	10	380	390								AbSpC											
40	10	390	400																			
41	10	400	410																		AusGes	
42	10	410	420				feucht															
43	10	420	430																			
44	10	430	440																			
45	10	440	450																			
46	10	450	460																			
47	10	460	470																			
48	10	470	480																			
49	10	480	490																			
50	10	490	500																			
51	10	500	510																			
52	10	510	520				vereinzelt feucht															
53	10	520	530																			
54	10	530	540																			
55	10	540	550							AusGes												
56	10	550	560																			
57	10	560	570																			
58	10	570	580																			
59	10	580	590																			
60	10	590	600																			
61	10	600	610																			
62	10	610	620	feucht	feucht																	
63	10	620	630										AbSpC									
64	10	630	640																			

Legende

Feuchtigkeit	Schäden	
feucht	Eisbildungen	Eis
vereinzelt feucht	Ausbrüche Natursteinmauerwerk	AusGes
nass	Abplatzungen Spritzbetonschale	AbSpC
tropfend	Sohlhebung	Soheb
rinnend	Verformungen	Ver
	Längsrisse	L-Riss
	richtungslose, kurze Risse	Risse
	versinterte Halbschalenentwässerung	Hentv
	schadhafte, versinterte Mittelentwässerung	Mittv

Bereiche	Block Nr.	Länge	TM von	TM bis	Feuchtstellen					Allgemeine Schäden								
					0-2 [m] Intensität	2-4 [m] Intensität	4-6 [m] Intensität	6-8 [m] Intensität	8-10 [m] Intensität	0-2 [m] Schadensart	2-4 [m] Schadensart	4-6 [m] Schadensart	6-8 [m] Schadensart	8-10 [m] Schadensart				
	65	10	640	650														
	66	10	650	660														
	67	10	660	670														
	68	10	670	680														
	69	10	680	690														
	70	10	690	700														
	71	10	700	710														
	72	10	710	720														
	73	10	720	730													AusGes	
	74	10	730	740														
	75	10	740	750														
	76	10	750	760														
	77	10	760	770														
	78	10	770	780														
	79	10	780	790														
	80	10	790	800														
	81	10	800	810		vereinzelt feucht												
	82	10	810	820														
	83	10	820	830														
	84	10	830	840														
	85	10	840	850														
	86	10	850	860														
	87	10	860	870														
	88	10	870	880					nass									
	89	10	880	890														
	90	10	890	900														
	91	10	900	910														AusGes
	92	10	910	920														
	93	10	920	930														
	94	10	930	940														
	95	10	940	950														
	96	10	950	960														
	97	10	960	970														
	98	10	970	980														
	99	10	980	990														
	100	10	990	1000														
	101	10	1000	1010														
	102	10	1010	1020														
	103	10	1020	1030														
	104	10	1030	1040														
	105	10	1040	1050														
	106	10	1050	1060														
	107	10	1060	1070														
	108	10	1070	1080														
	109	10	1080	1090		vereinzelt feucht												
	110	10	1090	1100														
	111	10	1100	1110														AusGes
	112	10	1110	1120														
	113	10	1120	1130														
	114	10	1130	1140														
	115	10	1140	1150														
	116	10	1150	1160														
	117	10	1160	1170														
	118	10	1170	1180														
	119	10	1180	1190														
	120	10	1190	1200														
	121	10	1200	1210														
	122	10	1210	1220														
Wasser- führende Klüfte	123	10	1220	1230		vereinzelt feucht		vereinzelt feucht	feucht	Hentv; AusGes			Hentv; AusGes				Hentv; AusGes	
	124	10	1230	1240	feucht	feucht	nass	nass	nass	Hentv			Hentv				Hentv	
	125	10	1240	1250	nass	tropfend	nass	tropfend	nass	Hentv			Hentv; AusGes				Hentv	
	126	10	1250	1260	tropfend	tropfend	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht		Hentv; AusGes			Hentv				Hentv	
	127	10	1260	1270														
	128	10	1270	1280														
	129	10	1280	1290														

Legende

Feuchtigkeit	Schäden	
feucht	Eisbildungen	Eis
vereinzelt feucht	Ausbrüche Natursteinmauerwerk	AusGes
nass	Abplatzungen Spritzbetonschale	AbSpC
tropfend	Sohlhebung	Soheb
rinnend	Verformungen	Ver
	Längsrisse	L-Riss
	richtungslose, kurze Risse	Risse
	versinterte Halbschalenentwässerung	Hentv
	schadhafte, versinterte Mittelentwässerung	Mittv

Bereiche	Block Nr.	Länge	TM von	TM bis	Feuchtstellen					Allgemeine Schäden									
					0-2 [m] Intensität	2-4 [m] Intensität	4-6 [m] Intensität	6-8 [m] Intensität	8-10 [m] Intensität	0-2 [m] Schadensart	2-4 [m] Schadensart	4-6 [m] Schadensart	6-8 [m] Schadensart	8-10 [m] Schadensart					
	130	10	1290	1300															
	131	10	1300	1310															
	132	10	1310	1320															
	133	10	1320	1330															
	134	10	1330	1340	vereinzelt feucht														
	135	10	1340	1350															
	136	10	1350	1360															
	137	10	1360	1370															
	138	10	1370	1380															
	139	10	1380	1390						AusGes								AusGes	
	140	10	1390	1400															
	141	10	1400	1410		feucht													
	142	10	1410	1420															
	143	10	1420	1430															
	144	10	1430	1440															
	145	10	1440	1450															
	146	10	1450	1460								AbSpC							
	147	10	1460	1470															
	148	10	1470	1480															
	149	10	1480	1490															
	150	10	1490	1500															
	151	10	1500	1510															
	152	10	1510	1520															
	153	10	1520	1530															
	154	10	1530	1540															
	155	10	1540	1550				vereinzelt feucht						AusGes					
	156	10	1550	1560															
	157	10	1560	1570															
	158	10	1570	1580															
	159	10	1580	1590															
	160	10	1590	1600															
	161	10	1600	1610															
	162	10	1610	1620															
	163	10	1620	1630															
	164	10	1630	1640															
	165	10	1640	1650															
	166	10	1650	1660															AbSpC
	167	10	1660	1670															
	168	10	1670	1680															
	169	10	1680	1690															
	170	10	1690	1700															
	171	10	1700	1710															
	172	10	1710	1720															
	173	10	1720	1730															
	174	10	1730	1740															
	175	10	1740	1750	nass	vereinzelt feucht				Hentv									AusGes
	176	10	1750	1760															
	177	10	1760	1770															
	178	10	1770	1780															
	179	10	1780	1790															
	180	10	1790	1800															
	181	10	1800	1810															
	182	10	1810	1820															
	183	10	1820	1830															
	184	10	1830	1840															
	185	10	1840	1850															
	186	10	1850	1860															
	187	10	1860	1870															
	188	10	1870	1880															
	189	10	1880	1890															
	190	10	1890	1900															
	191	10	1900	1910															
	192	10	1910	1920															
	193	10	1920	1930															AusGes
	194	10	1930	1940															

Legende

Feuchtigkeit	Schäden	
feucht	Eisbildungen	Eis
vereinzelt feucht	Ausbrüche Natursteinmauerwerk	AusGes
nass	Abplatzungen Spritzbetonschale	AbSpC
tropfend	Sohlhebung	Soheb
rinnend	Verformungen	Ver
	Längsrisse	L-Riss
	richtungslose, kurze Risse	Risse
	versinterte Halbschalenentwässerung	Hentv
	schadhafte, versinterte Mittelentwässerung	Mittv

Bereiche	Block Nr.	Länge	TM von	TM bis	Feuchtstellen					Allgemeine Schäden								
					0-2 [m] Intensität	2-4 [m] Intensität	4-6 [m] Intensität	6-8 [m] Intensität	8-10 [m] Intensität	0-2 [m] Schadensart	2-4 [m] Schadensart	4-6 [m] Schadensart	6-8 [m] Schadensart	8-10 [m] Schadensart				
	195	10	1940	1950														
	196	10	1950	1960														
	197	10	1960	1970														
	198	10	1970	1980		vereinzelt feucht												
	199	10	1980	1990														
	200	10	1990	2000						AbSpC								
	201	10	2000	2010														
	202	10	2010	2020														
	203	10	2020	2030														
	204	10	2030	2040														
	205	10	2040	2050														
	206	10	2050	2060														
	207	10	2060	2070		vereinzelt feucht		feucht	feucht	Hentv		Hentv					Hentv	
Wasser- führende Klüfte	208	10	2070	2080	feucht	nass	nass	feucht	nass	Hentv		Hentv; AusGes					Hentv	
	209	10	2080	2090	feucht	tropfend	feucht	tropfend	nass	Hentv; AusGes		Hentv					Hentv; AusGes	
	210	10	2090	2100	tropfend													
	211	10	2100	2110														
	212	10	2110	2120														
	213	10	2120	2130														
	214	10	2130	2140														
	215	10	2140	2150														
	216	10	2150	2160														
	217	10	2160	2170								AbSpC						
	218	10	2170	2180														
	219	10	2180	2190														
	220	10	2190	2200				vereinzelt feucht									AusGes	
	221	10	2200	2210														
	222	10	2210	2220														
	223	10	2220	2230						AusGes								
	224	10	2230	2240														
	225	10	2240	2250														
	226	10	2250	2260														
	227	10	2260	2270														
	228	10	2270	2280														
	229	10	2280	2290														
	230	10	2290	2300														
	231	10	2300	2310														
	232	10	2310	2320														
	233	10	2320	2330														
	234	10	2330	2340														
	235	10	2340	2350														
	236	10	2350	2360														
	237	10	2360	2370														
	238	10	2370	2380		vereinzelt feucht												
	239	10	2380	2390														
	240	10	2390	2400								AusGes						
	241	10	2400	2410														
	242	10	2410	2420														
	243	10	2420	2430														
	244	10	2430	2440														
	245	10	2440	2450				nass									AbSpC	
	246	10	2450	2460														
	247	10	2460	2470														
	248	10	2470	2480						AbSpC								
	249	10	2480	2490														
	250	10	2490	2500														
	251	10	2500	2510	feucht													
	252	10	2510	2520														
	253	10	2520	2530														
	254	10	2530	2540														
	255	10	2540	2550														
	256	10	2550	2560														
	257	10	2560	2570														
	258	10	2570	2580								AusGes						
	259	10	2580	2590														

Legende

Feuchtigkeit	Schäden	
feucht	Eisbildungen	Eis
vereinzelt feucht	Ausbrüche Natursteinmauerwerk	AusGes
nass	Abplatzungen Spritzbetonschale	AbSpC
tropfend	Sohlhebung	Soheb
rinnend	Verformungen	Ver
	Längsrisse	L-Riss
	richtungslose, kurze Risse	Risse
	versinterte Halbschalenentwässerung	Hentv
	schadhafte, versinterte Mittelentwässerung	Mittv

Bereiche	Block Nr.	Länge	TM von	TM bis	Feuchtstellen					Allgemeine Schäden					
					0-2 [m] Intensität	2-4 [m] Intensität	4-6 [m] Intensität	6-8 [m] Intensität	8-10 [m] Intensität	0-2 [m] Schadensart	2-4 [m] Schadensart	4-6 [m] Schadensart	6-8 [m] Schadensart	8-10 [m] Schadensart	
	260	10	2590	2600				vereinzelt feucht							
	261	10	2600	2610											
	262	10	2610	2620											
	263	10	2620	2630											
	264	10	2630	2640											AusGes
	265	10	2640	2650											
	266	10	2650	2660											
	267	10	2660	2670											
	268	10	2670	2680						AusGes					
	269	10	2680	2690											
	270	10	2690	2700											
	271	10	2700	2710											
	272	10	2710	2720											
	273	10	2720	2730											
	274	10	2730	2740									Hentv; Risse		
	275	10	2740	2750											
	276	10	2750	2760											
	277	10	2760	2770											
	278	10	2770	2780		vereinzelt feucht		feucht	feucht		Hentv; AusGes	Hentv; Risse	Hentv	Hentv	
	279	10	2780	2790	feucht	feucht	feucht	feucht	vereinzelt feucht		Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	
	280	10	2790	2800	nass	feucht	nass	nass	nass	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	
	281	10	2800	2810						Hentv; Risse; AusGes		Hentv; Risse			
	282	10	2810	2820		vereinzelt feucht									AusGes
	283	10	2820	2830					vereinzelt feucht	Hentv		Hentv; Risse; AusGes			
	284	10	2830	2840		vereinzelt feucht									
	285	10	2840	2850				vereinzelt feucht							
	286	10	2850	2860											
	287	10	2860	2870	feucht	feucht	vereinzelt feucht					AusGes			
	288	10	2870	2880	vereinzelt feucht			feucht	vereinzelt feucht		Risse		Hentv; Risse; AusGes	AusGes	
	289	10	2880	2890		vereinzelt feucht		vereinzelt feucht							
	290	10	2890	2900											
	291	10	2900	2910											
	292	10	2910	2920											
	293	10	2920	2930											
	294	10	2930	2940											
	295	10	2940	2950											
	296	10	2950	2960											
	297	10	2960	2970											
	298	10	2970	2980											
	299	10	2980	2990								AusGes			
	300	10	2990	3000					vereinzelt feucht						
	301	10	3000	3010											
	302	10	3010	3020											
	303	10	3020	3030											
	304	10	3030	3040											
	305	10	3040	3050											
	306	10	3050	3060	feucht										
	307	10	3060	3070											
	308	10	3070	3080											
	309	10	3080	3090											AusGes
	310	10	3090	3100											
	311	10	3100	3110											
	312	10	3110	3120											
	313	10	3120	3130											
	314	10	3130	3140											
	315	10	3140	3150		vereinzelt feucht									
	316	10	3150	3160						AusGes					
	317	10	3160	3170											
	318	10	3170	3180											
	319	10	3180	3190											
	320	10	3190	3200											
	321	10	3200	3210											
	322	10	3210	3220											
	323	10	3220	3230											
	324	10	3230	3240			feucht								

Legende

Feuchtigkeit	Schäden	
feucht	Eisbildungen	Eis
vereinzelt feucht	Ausbrüche Natursteinmauerwerk	AusGes
nass	Abplatzungen Spritzbetonschale	AbSpC
tropfend	Sohlhebung	Soheb
rinnend	Verformungen	Ver
	Längsrisse	L-Riss
	richtungslose, kurze Risse	Risse
	versinterte Halbschalenentwässerung	Hentv
	schadhafte, versinterte Mittelentwässerung	Mittv

Bereiche	Block Nr.	Länge	TM von	TM bis	Feuchtstellen					Allgemeine Schäden									
					0-2 [m]	2-4 [m]	4-6 [m]	6-8 [m]	8-10 [m]	0-2 [m]	2-4 [m]	4-6 [m]	6-8 [m]	8-10 [m]					
					Intensität	Intensität	Intensität	Intensität	Intensität	Schadensart	Schadensart	Schadensart	Schadensart	Schadensart					
	325	10	3240	3250															
	326	10	3250	3260															
	327	10	3260	3270															
	328	10	3270	3280															
	329	10	3280	3290															
	330	10	3290	3300															
	331	10	3300	3310															
	332	10	3310	3320															
	333	10	3320	3330			vereinzelt feucht				AusGes								
	334	10	3330	3340															
	335	10	3340	3350															
	336	10	3350	3360															
	337	10	3360	3370															
	338	10	3370	3380															
	339	10	3380	3390															
	340	10	3390	3400															
	341	10	3400	3410														AbSpC	
	342	10	3410	3420															
	343	10	3420	3430															
	344	10	3430	3440															
	345	10	3440	3450	feucht														
	346	10	3450	3460															
	347	10	3460	3470						AbSpC									
	348	10	3470	3480															
	349	10	3480	3490															
	350	10	3490	3500															
	351	10	3500	3510															
	352	10	3510	3520															
	353	10	3520	3530															
	354	10	3530	3540															AbSpC
	355	10	3540	3550															
	356	10	3550	3560															
	357	10	3560	3570															
	358	10	3570	3580															
	359	10	3580	3590															
	360	10	3590	3600															
	361	10	3600	3610	vereinzelt feucht														
	362	10	3610	3620															
	363	10	3620	3630															
	364	10	3630	3640															
	365	10	3640	3650															
	366	10	3650	3660															
	367	10	3660	3670															
	368	10	3670	3680															
	369	10	3680	3690															
	370	10	3690	3700															
	371	10	3700	3710															
	372	10	3710	3720															
	373	10	3720	3730															
	374	10	3730	3740															
	375	10	3740	3750															
	376	10	3750	3760															
	377	10	3760	3770															
	378	10	3770	3780															
	379	10	3780	3790															
	380	10	3790	3800															
	381	10	3800	3810															
	382	10	3810	3820															
	383	10	3820	3830															
	384	10	3830	3840															
	385	10	3840	3850															
	386	10	3850	3860															
	387	10	3860	3870															
	388	10	3870	3880															
	389	10	3880	3890															

Legende

Feuchtigkeit	Schäden	
feucht	Eisbildungen	Eis
vereinzelt feucht	Ausbrüche Natursteinmauerwerk	AusGes
nass	Abplatzungen Spritzbetonschale	AbSpC
tropfend	Sohlhebung	Soheb
rinnend	Verformungen	Ver
	Längsrisse	L-Riss
	richtungslose, kurze Risse	Risse
	versinterte Halbschalenentwässerung	Hentv
	schadhafte, versinterte Mittelentwässerung	Mittv

Bereiche	Block Nr.	Länge	TM von	TM bis	Feuchtstellen					Allgemeine Schäden						
					0-2 [m]	2-4 [m]	4-6 [m]	6-8 [m]	8-10 [m]	0-2 [m]	2-4 [m]	4-6 [m]	6-8 [m]	8-10 [m]		
					Intensität	Intensität	Intensität	Intensität	Intensität	Schadensart	Schadensart	Schadensart	Schadensart	Schadensart		
	390	10	3890	3900												
	391	10	3900	3910											AbSpC	
	392	10	3910	3920												
	393	10	3920	3930												
	394	10	3930	3940												
	395	10	3940	3950				feucht								
	396	10	3950	3960												
	397	10	3960	3970								AusGes				
	398	10	3970	3980												
	399	10	3980	3990												
	400	10	3990	4000												
	401	10	4000	4010												
	402	10	4010	4020	vereinzelt feucht											
	403	10	4020	4030												
	404	10	4030	4040												
	405	10	4040	4050						AusGes						
	406	10	4050	4060												
	407	10	4060	4070												
	408	10	4070	4080												
	409	10	4080	4090			vereinzelt feucht		vereinzelt feucht							
kataklastische Störungszone (wasser- führend)	410	10	4090	4100	feucht	feucht	nass	rinnend	rinnend	Hentv; Risse; AusGes	Hentv	Hentv; Risse	Hentv	Hentv	Hentv	
	411	10	4100	4110	rinnend	rinnend	tropfend	rinnend	rinnend	Hentv;	Hentv		Hentv,	Hentv;	Risse	
	412	10	4110	4120	nass	rinnend	tropfend	tropfend	nass	Hentv		Hentv				
	413	10	4120	4130	vereinzelt feucht	feucht	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht	Hentv; Risse; AusGes	Hentv	Hentv; Risse; AusGes	Hentv	Hentv	Hentv	
	414	10	4130	4140			vereinzelt feucht	rinnend	nass							
	415	10	4140	4150	nass	nass	rinnend	rinnend	rinnend	Hentv		Hentv; Risse; AusGes			Hentv;	
	416	10	4150	4160	rinnend	rinnend	nass	feucht	feucht							
	417	10	4160	4170	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht										
418	10	4170	4180													
419	10	4180	4190													
420	10	4190	4200													
421	10	4200	4210													
422	10	4210	4220													
423	10	4220	4230												AusGes	
424	10	4230	4240		vereinzelt feucht					AusGes						
425	10	4240	4250												AusGes	
426	10	4250	4260													
427	10	4260	4270													
428	10	4270	4280													
429	10	4280	4290													
430	10	4290	4300													
431	10	4300	4310													
432	10	4310	4320													
433	10	4320	4330													
434	10	4330	4340													
435	10	4340	4350													
436	10	4350	4360					feucht		AbSpC						
437	10	4360	4370									AusGes				
438	10	4370	4380													
439	10	4380	4390													
440	10	4390	4400	vereinzelt feucht										AbSpC		
441	10	4400	4410													
442	10	4410	4420													
443	10	4420	4430													
444	10	4430	4440													
445	10	4440	4450													
446	10	4450	4460													
447	10	4460	4470												AbSpC	
448	10	4470	4480							AusGes						
449	10	4480	4490													
450	10	4490	4500													
451	10	4500	4510													
452	10	4510	4520												AusGes	
453	10	4520	4530						vereinzelt feucht							
454	10	4530	4540													

Legende

Feuchtigkeit	Schäden	
feucht	Eisbildungen	Eis
vereinzelt feucht	Ausbrüche Natursteinmauerwerk	AusGes
nass	Abplatzungen Spritzbetonschale	AbSpC
tropfend	Sohlhebung	Soheb
rinnend	Verformungen	Ver
	Längsrisse	L-Riss
	richtungslose, kurze Risse	Risse
	versinterte Halbschalenentwässerung	Hentv
	schadhafte, versinterte Mittelentwässerung	Mittv

Bereiche	Block Nr.	Länge	TM von	TM bis	Feuchtstellen					Allgemeine Schäden										
					0-2 [m]	2-4 [m]	4-6 [m]	6-8 [m]	8-10 [m]	0-2 [m]	2-4 [m]	4-6 [m]	6-8 [m]	8-10 [m]						
					Intensität	Intensität	Intensität	Intensität	Intensität	Schadensart	Schadensart	Schadensart	Schadensart	Schadensart						
	455	10	4540	4550																
	456	10	4550	4560																
	457	10	4560	4570																
	458	10	4570	4580	nass															
	459	10	4580	4590																
schwellfähige Phyllit- formation	460	10	4590	4600																
	461	10	4600	4610																
	462	10	4610	4620																
	463	10	4620	4630																
	464	10	4630	4640																
	465	10	4640	4650																
	466	10	4650	4660																
	467	10	4660	4670																
	468	10	4670	4680																
	469	10	4680	4690																
	470	10	4690	4700																
	471	10	4700	4710																
	472	10	4710	4720																
	473	10	4720	4730																
	474	10	4730	4740																
	475	10	4740	4750																
	476	10	4750	4760																
	477	10	4760	4770																
	478	10	4770	4780																
	479	10	4780	4790																
	480	10	4790	4800																
	481	10	4800	4810																
	482	10	4810	4820																
	483	10	4820	4830	feucht															
	484	10	4830	4840																
	485	10	4840	4850																
	486	10	4850	4860																
	487	10	4860	4870																
	488	10	4870	4880																
	489	10	4880	4890																
	490	10	4890	4900																
	491	10	4900	4910																
	492	10	4910	4920																
	493	10	4920	4930																
	494	10	4930	4940																
	495	10	4940	4950																
schwellfähige Phyllitformatio	496	10	4950	4960																
	497	10	4960	4970																
	498	10	4970	4980																
	499	10	4980	4990																
	500	10	4990	5000	vereinzelt feucht															
	501	10	5000	5010																
	502	10	5010	5020																
	503	10	5020	5030																
	504	10	5030	5040																
	505	10	5040	5050																
	506	10	5050	5060																
	507	10	5060	5070																
	508	10	5070	5080																
	509	10	5080	5090																
	510	10	5090	5100																
	511	10	5100	5110																
	512	10	5110	5120																
	513	10	5120	5130																
	514	10	5130	5140																
	515	10	5140	5150																
	516	10	5150	5160																
	517	10	5160	5170																
	518	10	5170	5180																
	519	10	5180	5190																

Legende

Feuchtigkeit	Schäden	
feucht	Eisbildungen	Eis
vereinzelt feucht	Ausbrüche Natursteinmauerwerk	AusGes
nass	Abplatzungen Spritzbetonschale	AbSpC
tropfend	Sohlhebung	Soheb
rinnend	Verformungen	Ver
	Längsrisse	L-Riss
	richtungslose, kurze Risse	Risse
	versinterte Halbschalenentwässerung	Hentv
	schadhafte, versinterte Mittelentwässerung	Mittv

Bereiche	Block Nr.	Länge	TM von	TM bis	Feuchtstellen					Allgemeine Schäden									
					0-2 [m]	2-4 [m]	4-6 [m]	6-8 [m]	8-10 [m]	0-2 [m]	2-4 [m]	4-6 [m]	6-8 [m]	8-10 [m]					
					Intensität	Intensität	Intensität	Intensität	Intensität	Schadensart	Schadensart	Schadensart	Schadensart	Schadensart					
	520	10	5190	5200															
	521	10	5200	5210															
	522	10	5210	5220														AbSpC	
	523	10	5220	5230															
	524	10	5230	5240															
	525	10	5240	5250															
	526	10	5250	5260															
	527	10	5260	5270															
	528	10	5270	5280															
	529	10	5280	5290															
	530	10	5290	5300															
	531	10	5300	5310	feucht														
	532	10	5310	5320															
	533	10	5320	5330															
	534	10	5330	5340															
	535	10	5340	5350															
	536	10	5350	5360															AusGes
	537	10	5360	5370															
	538	10	5370	5380															
	539	10	5380	5390															
	540	10	5390	5400															
	541	10	5400	5410															
	542	10	5410	5420															
	543	10	5420	5430															
	544	10	5430	5440															
	545	10	5440	5450															
	546	10	5450	5460			vereinzelt feucht												AusGes
	547	10	5460	5470															
	548	10	5470	5480															
	549	10	5480	5490															
	550	10	5490	5500															AusGes
	551	10	5500	5510															
	552	10	5510	5520															
	553	10	5520	5530															
	554	10	5530	5540															
	555	10	5540	5550															
	556	10	5550	5560				nass											Hentv
	557	10	5560	5570															
	558	10	5570	5580															
	559	10	5580	5590															
	560	10	5590	5600															
	561	10	5600	5610	feucht														
	562	10	5610	5620															AbSpC
	563	10	5620	5630															
	564	10	5630	5640															
	565	10	5640	5650															
	566	10	5650	5660															
	567	10	5660	5670															AusGes
	568	10	5670	5680															
	569	10	5680	5690															
	570	10	5690	5700															
	571	10	5700	5710															
	572	10	5710	5720															
	573	10	5720	5730															
	574	10	5730	5740		vereinzelt feucht		vereinzelt feucht	feucht										
Wasser- führende Klüfte	575	10	5740	5750	feucht	feucht	nass	nass	nass	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv
	576	10	5750	5760	nass	nass	nass	nass	nass	Hentv	Hentv; Risse			Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv	Hentv
	577	10	5760	5770	nass	nass	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht		Hentv	Hentv								
	578	10	5770	5780															
	579	10	5780	5790															
	580	10	5790	5800															
	581	10	5800	5810															
	582	10	5810	5820															
	583	10	5820	5830															AbSpC
	584	10	5830	5840															

Legende

Feuchtigkeit	Schäden	
feucht	Eisbildungen	Eis
vereinzelt feucht	Ausbrüche Natursteinmauerwerk	AusGes
nass	Abplatzungen Spritzbetonschale	AbSpC
tropfend	Sohlhebung	Soheb
rinnend	Verformungen	Ver
	Längsrisse	L-Riss
	richtungslose, kurze Risse	Risse
	versinterte Halbschalenentwässerung	Hentv
	schadhafte, versinterte Mittelentwässerung	Mittv

Bereiche	Block Nr.	Länge	TM von	TM bis	Feuchtstellen					Allgemeine Schäden								
					0-2 [m] Intensität	2-4 [m] Intensität	4-6 [m] Intensität	6-8 [m] Intensität	8-10 [m] Intensität	0-2 [m] Schadensart	2-4 [m] Schadensart	4-6 [m] Schadensart	6-8 [m] Schadensart	8-10 [m] Schadensart				
	585	10	5840	5850														
	586	10	5850	5860														
	587	10	5860	5870														
	588	10	5870	5880				vereinzelt feucht										
	589	10	5880	5890														
	590	10	5890	5900									AusGes					
	591	10	5900	5910														
	592	10	5910	5920														
	593	10	5920	5930						AusGes								
	594	10	5930	5940														
	595	10	5940	5950														AusGes
	596	10	5950	5960		vereinzelt feucht												
	597	10	5960	5970														
	598	10	5970	5980														
	599	10	5980	5990														
	600	10	5990	6000				nass								Hentv		
	601	10	6000	6010														AusGes
	602	10	6010	6020														
	603	10	6020	6030														
	604	10	6030	6040														
	605	10	6040	6050														
	606	10	6050	6060									AusGes					
	607	10	6060	6070	feucht													
	608	10	6070	6080														
	609	10	6080	6090														
	610	10	6090	6100														AusGes
	611	10	6100	6110														
	612	10	6110	6120														
	613	10	6120	6130	vereinzelt feucht	vereinzelt feucht		vereinzelt feucht										
	614	10	6130	6140	nass	feucht	nass	feucht	feucht	Eis; L-Riss; Hentv	Eis; ; AbSpC; Hentv	Eis; Risse; Hentv	Eis; Hentv				Eis; Risse; Hentv	
	615	10	6140	6150	feucht	rinnend	feucht	feucht	nass	Eis; Risse; AbSpC	Eis; L-Riss; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; AbSpC; Risse; Hentv				Eis; AbSpC; Risse; Hentv	
	616	10	6150	6160	nass	nass	nass	tropfend	nass	Eis; L-Riss; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Hentv	Eis; Hentv				Eis; Hentv	
	617	10	6160	6170	tropfend	nass	rinnend	nass	tropfend	Eis; Hentv	Eis; Risse; Hentv	Eis; L-Riss;	Eis; AbSpC; Hentv				Eis; Risse; Hentv	
	618	10	6170	6180	nass	nass	nass	nass	nass	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Hentv	Eis; L-Riss; Hentv				Eis; Risse; Hentv	
	619	10	6180	6190	nass	tropfend	rinnend	tropfend	rinnend	Eis; L-Riss	Eis; Risse; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Risse; Hentv				Eis; Risse;	
	620	10	6190	6200	nass	nass	nass	nass	tropfend	Eis; ; AbSpC; Hentv	Eis; L-Riss; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; Risse; Hentv				Eis; AbSpC; Hentv	
	621	10	6200	6210	rinnend	nass	nass	nass	nass	Eis; AbSpC	Eis; Risse; Hentv	Eis; Hentv	Eis; AbSpC				Eis; Hentv	
	622	10	6210	6220	nass	nass	nass	nass	tropfend	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; AbSpC; Hentv	Eis; L-Riss; Hentv	Eis; Risse; Hentv				Eis; Risse; Hentv	
	623	10	6220	6230	vereinzelt feucht		vereinzelt feucht	feucht	feucht			Eis	Eis; Hentv				Eis; Hentv	
	624	10	6230	6240														
	625	10	6240	6250														

Legende

Feuchtigkeit	Schäden	
feucht	Eisbildungen	Eis
vereinzelt feucht	Ausbrüche Natursteinmauerwerk	AusGes
nass	Abplatzungen Spritzbetonschale	AbSpC
tropfend	Sohlhebung	Soheb
rinnend	Verformungen	Ver
	Längsrisse	L-Riss
	richtungslose, kurze Risse	Risse
	versinterte Halbschalenentwässerung	Hentv
	schadhafte, versinterte Mittelentwässerung	Mittv