




Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit



Entwicklung der Entwässerungssysteme in
Eisenbahntunneln in Österreich

David Maria Gusenbauer, BSc

Januar 2020

Thema

**Entwicklung der Entwässerungssysteme in
Eisenbahntunneln in Österreich**

EIDESSTATTLICHE 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 02.01.2020



Unterschrift Verfasser/in
David Maria, Gusenbauer

Danksagung

Für die Übernahme der Betreuung und die Mitwirkung bei der Aufgabenstellung der Masterarbeit bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Robert Wenighofer und Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler vom Lehrstuhl für Subsurface Engineering an der Montanuniversität Leoben.

Mein herzlicher Dank gilt Frau ADir. Reg. Rat Maria Stagl vom Österreichischen Staatsarchiv in Wien, sowie den Mitarbeitern im Lesesaal des Österreichischen Staatsarchivs für die freundliche Unterstützung bei der Recherche.

Schließlich bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Stefan Eberl für Hinweise zur Masterarbeit aus der Praxis des Tunnelbaus.

Ich widme die Masterarbeit meinen Eltern, die mir das Studium an der Montanuniversität Leoben ermöglichen.

Kurzfassung

Im Vordergrund der vorliegenden Arbeit stehen die kritische Auseinandersetzung mit Primärquellen aus dem Österreichischen Staatsarchiv und die übersichtliche Darstellung der Entwicklung der Entwässerungssysteme anhand verschiedener Eisenbahntunnels in Österreich.

Die Analyse des Untersuchungsmaterials aus dem Österreichischen Staatsarchiv und vom Lehrstuhl für Subsurface Engineering beginnt mit einer Datenanalyse von Eisenbahntunneln auf den Bahnstrecken „Semmeringbahn“, „Brennerbahn“, „Arlbergbahn“ und „Tauernbahn“.

Die Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich wird in einem chronologischen Vergleich ab dem Jahr 1853 von acht ausgewählten Tunnelbauwerken dargestellt.

Für ausgewählte Tunnels werden Längsschnitte mit versinterungsrelevanten Parametern entsprechend der von der Task Force Drainage (TFD) skizzierten Weise angefertigt und diese können im Anhang eingesehen werden.

Die damalige „Österreichische Tunnelbauweise“ hat den Kontakt mit kalkhaltigen Baustoffen verringert und eine gezielte Versinterung durch folgende Systemelemente der Entwässerung bei verschiedenen Eisenbahntunneln ermöglicht:

- Entwässerungsstollen
- Steinschichtung hinter der Gewölbemauerung
- Entwässerungsschlitze
- Sohlenkanal

In diesem Zusammenhang wird der natürlichen Kohlensäure verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet, die schon im Jahr 1896 bei den Untersuchungen über die Rauchverhältnisse im Arlbergtunnel thematisiert worden ist.

Zum Schluss steht die Feststellung, dass es in der derzeitigen Situation in Abhängigkeit der hydrogeologischen Verhältnisse besser ist, einen druckwasserhaltenden Tunnel herzustellen.

Hingegen bietet die Nutzung des Tunnelwassers die Möglichkeit, auf einzelne, bewährte Baumaßnahmen der damaligen „Österreichischen Tunnelbauweise“ zurückzugreifen.

Abstract

In the present thesis, the critical examination of primary sources from the Public record office of Austria and the clear presentation of the history of drainage systems in various railway tunnels in Austria are emphasized.

The research into the investigation material from the Public record office of Austria and the Chair of Subsurface Engineering begins with an analysis of data of different railway tunnels on the railway lines "Semmering railway", "Brenner railway", "Arlberg railway" and "Tauern railway".

The history of drainage systems in railway tunnels in Austria is shown in a chronological comparison of eight selected tunnels starting from 1853.

For selected tunnels, there were drawn longitudinal sections considering precipitation-relevant parameters outlined by the Task Force Drainage (TFD) and these can be viewed in the appendix.

The former "Austrian tunnelling method" reduced the contact with calcareous building materials and enabled a targeted precipitation through the following drainage system elements concerning various railway tunnels:

- drainage tunnels
- stone filling behind the vault wall
- drainage slits
- sole drainage channel

In this context, increasing attention is paid to the natural carbonic acid, which has already been the subject of the research into the smoking conditions of the Arlberg tunnel in 1896.

In the end, there is the statement that, in the current situation, it is better, depending on the hydrogeological conditions, to build a tunnel which is holding back the water pressure.

On the other side, there is the opportunity to use the tunnel water utilizing individual, reliable construction measures of the former "Austrian tunnelling method".

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	III
Danksagung	IV
Kurzfassung	V
Abstract.....	VI
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Problemstellung.....	3
2.1 Planung des Entwässerungssystems	3
2.2 Hydrogeologisches Modell	6
2.3 Bauausführung des Entwässerungssystems.....	9
2.3.1 Das Entwässerungssystem im zyklischen Vortrieb	9
2.3.2 Das Entwässerungssystem im kontinuierlichen Vortrieb	10
2.4 Versinterungen der Drainagen	12
2.5 Abgrenzung des Themas.....	13
3 Frühere Untersuchungen	14
3.1 Optimierte Entwässerungssysteme.....	14
3.2 Nutzung von Tunnelwasser.....	16
3.3 Bildung von Versinterungen in Tunneldrainagen.....	17
3.4 Task-Force Drainage.....	19
3.5 Versinterungsmonitoring	20
4 Arbeitshypothesen	22
4.1 Arbeitshypothese 1	22
4.2 Arbeitshypothese 2.....	23
4.3 Arbeitshypothese 3.....	24
5 Untersuchungsmaterial	26
5.1 Das Österreichische Staatsarchiv.....	26
5.1.1 Auswahl der Archive.....	26
5.1.2 Auswahl der Bahnstrecken	27
5.1.3 Auswahl des Materials	28
5.2 Auswahl von Regelquerschnitten neuerer Tunnelbauwerke.....	30

6	Analyse	31
6.1	Datenanalyse	31
6.1.1	Die Semmeringbahn	31
6.1.2	Die Brennerbahn.....	37
6.1.3	Die Arlbergbahn.....	41
6.1.4	Die Tauernbahn.....	43
6.2	Darstellung der Entwicklung der Entwässerungssysteme.....	45
6.3	Skizzierung der Fortentwicklung von Entwässerungssystemen.....	55
7	Beweis der Arbeitshypothesen	61
7.1	Arbeitshypothese 1	61
7.2	Arbeitshypothese 2.....	61
7.3	Arbeitshypothese 3.....	62
8	Schluss.....	63
9	Zusammenfassung	64
10	Abbildungsverzeichnis.....	66
11	Tabellenverzeichnis.....	67
12	Literaturverzeichnis	68
	Anhang	73
A	Pumpenvorrichtung zum Wasserheben - Semmering Haupttunnel	73
B	Wasserhubmaschine Tunnel - Semmering Haupttunnel.....	74
C	Entwässerungen durch „Canalanlagen“ - Sonnenburg Tunnel.....	75
D	Ausmauerung der Seitenstollen – Mühlthalerlehne Tunnel	76
E	Anlage der Schächte und Seitenstollen - St. Jodock-Tunnel.....	77
F	Einsteigöffnungen in den Sohlenkanal – Arlberg-Tunnel	79
G	Regelquerschnitt Bergwasserableitung – Arlbergtunnel Sanierung	80
H	Entwässerungsstollen - Tauerntunnel	81
I	Längenschnitte	82
J	Analysen zum Gutachten der Luftuntersuchungen - Arlbergtunnel	86

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ad	(lateinisch) zu
AdR	Archiv der Republik
AG	Auftraggeber; Aktiengesellschaft
AN	Auftragnehmer
AVA	Allgemeines Verwaltungsarchiv
ca. = circa	(lateinisch) ungefähr
etc. = et cetera	(lateinisch) und so weiter
GD	Generaldirektion der Österreichischen Staats- und Bundesbahnen
GIuVM	Generalinspektion der österreichischen Eisenbahnen und der Verkehrsministerien
k. k.	kaiserlich-königlich
N	Norden
NÖT	Neue Österreichische Tunnelbauweise
O	Osten
ÖBA	Örtliche Bauaufsicht
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
S	Süden
s.	siehe
sic	(lateinisch) so
St.	Sankt
TFD	Task-Force Drainage
TVM	Tunnelvortriebsmaschine
u.a.	unter anderem
UNESCO = United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization	(englisch) Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur
Urkbldg	Urkundenbeilagen
vice versa	(lateinisch) umgekehrt
Vk	Verkehr
W	Westen
W. Fß	Wiener Fuß
W. Klfr	Wiener Klafter
z.B.	zum Beispiel
zit. nach	zitiert nach

1 Einleitung

Die vorliegende Abschlussarbeit behandelt die Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich. Als Grundlage dafür dient die Recherche im Österreichischen Staatsarchiv.

Die Zielsetzung der Arbeit liegt darin, dass durch die Darstellung der Entwicklung der Entwässerungssysteme in verschiedenen Eisenbahntunneln ein Beitrag zur Beseitigung der Versinterungsproblematik in Tunnel drainagen in Österreich geliefert wird.

Im Vordergrund stehen die kritische Auseinandersetzung mit vorhandener Literatur und eine übersichtliche Darstellung dieser. Die Voraussetzung dafür sind Quellen, die auffindbar sind und mit denen ein Umgang möglich ist. [1]

Der Vorteil einer geschichtlichen Arbeit liegt darin, dass nicht eine Untersuchung durchgeführt wird, die bereits durchgeführt worden ist. [1]

Die Naturwissenschaften dienen als Vorbild für Wissenschaftlichkeit. Eine wissenschaftliche Untersuchung muss einen klar erkennbaren Gegenstand behandeln, Aussagen treffen, die noch nicht gesagt worden sind, für andere von Nutzen sein und jene Angaben enthalten, die eine Nachprüfung ermöglichen, ob die aufgestellten Hypothesen falsch oder richtig sind. [1]

„Theoretisch dürfte man in einer ernsthaften wissenschaftlichen Arbeit nie nach einem anderen Zitat zitieren [...]. Es gibt jedoch vernünftige Ausnahmen, speziell für eine Abschlußarbeit [sic!].“ [1]

Generell sind ein kritisches Hinterfragen und eine Prüfung der Unterlagen bei der Verwendung von Primär- und Sekundärquellen erforderlich.

Da die Ressourcen begrenzt sind, soll im Zentrum der Überlegungen zum Thema der Arbeit nicht das Mögliche, sondern das Machbare stehen. [2]

Die Untersuchungen zur Versinterungsproblematik in Tunnel drainagen erfolgen am Lehrstuhl für Subsurface Engineering auf akkordierte Art und Weise, sodass eine einheitliche Aufbereitung der Daten stattfindet. Sie sind auf die Task Force Drainage (TFD) abgestimmt.

In Kapitel 2 wird auf die Problemstellung der Arbeit näher eingegangen. Dabei wird die Planung und Bauausführung des Entwässerungssystems erläutert, um die Versinterungsproblematik der Tunnel drainagen besser zu verstehen. Schließlich wird das Thema von weiteren Bereichen des Tunnelbaus abgegrenzt.

Den früheren Untersuchungen in Kapitel 3 kommt eine große Bedeutung zu. Hier werden publizierte Forschungsvorhaben zu dem vorliegenden Thema näher erläutert.

In Kapitel 4 werden die Arbeitshypothesen zur vorliegenden Untersuchung aufgestellt und näher betrachtet.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit dem Material der Untersuchung vom Österreichischen Staatsarchiv. Hier wird auf die Archive im Österreichischen Staatsarchiv eingegangen. Weiters wird das Material von Regelquerschnitten neuerer Tunnelbauwerke beschrieben.

Die Analyse in Kapitel 6 widmet sich als Erstes der Datenanalyse des Materials der Untersuchung aus dem Österreichischen Staatsarchiv. Hier erfolgt die Beschreibung der Systemelemente der Entwässerung auf ausgewählten Bahnstrecken in Österreich. Anschließend werden die Entwicklung der Entwässerungssysteme in Österreich und ausgewählte Tunnelbauwerke entsprechend der von der TFD vorgeschlagenen Weise dargestellt sowie die Fortentwicklung von Entwässerungssystemen skizziert.

Kapitel 7 dient dem Beweis der gebildeten Arbeitshypothesen. Die Analyse des Untersuchungsmaterials wird zeigen, ob die gebildeten Hypothesen bestätigt oder widerlegt werden.

Der Schluss bildet das Kapitel 8 mit den Schlussfolgerungen. Zuletzt stehen die Zusammenfassung der Ergebnisse und ein kurzer Ausblick.

2 Problemstellung

2.1 Planung des Entwässerungssystems

Die Planung des Entwässerungssystems ist Teil der Gesamtplanung des Untertagebauwerks. Neben der handelspolitischen und wirtschaftlichen Bedeutung eines Eisenbahntunnels liegt das besondere Augenmerk bei der geotechnischen Planung. Diese umfasst alle Phasen: [3]

- Machbarkeitsstudie
- Vorentwurf
- Ausschreibungsplanung
- Detailplanung

Die geotechnische Planung ist gekennzeichnet durch eine laufende Verfeinerung der Prognosen und Entscheidungsgrundlagen, sowie durch die Sicherstellung einer systematischen Vorgehensweise und nachvollziehbarer Schlussfolgerungen und Entscheidungen. [3]

„Ziel aller Tätigkeiten im Rahmen der geotechnischen Planung ist die wirtschaftliche Optimierung der bautechnischen Maßnahmen unter Nutzung der vor Ort anstehenden Gebirgsverhältnisse bei Gewährleistung der jeweiligen Sicherheitserfordernisse, der Langzeitstabilität und der Umwelterfordernisse.“ [3]

Der grundsätzliche Ablauf der geotechnischen Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb gliedert sich in folgende Schritte: [3]

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

Der grundsätzliche Ablauf der geotechnischen Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb unterteilt sich in folgende Schritte: [4]

1. Schritt: Bestimmung der Gebirgsarten

2. Schritt: Bestimmung des Gebirgsverhaltens und Zuordnung zu Gebirgsverhaltenstypen
3. Schritt: Evaluierung / Wahl der Vortriebsart
4. Schritt: Wahl eines tunnelbautechnischen Konzeptes
5. Schritt: Festlegung der bau- und maschinentechnischen Maßnahmen und Abschätzung bzw. Ermittlung des Systemverhaltens
6. Schritt: Dokumentation der geotechnischen Planung
7. Schritt: Ermittlung der Vortriebsklassen und Erstellung der Ausschreibungsunterlagen

Für die Bestimmung und Abgrenzung der Gebirgsarten sind die mechanischen und die hydraulischen Eigenschaften des Gebirges zu ermitteln. Die maßgebenden Parameter für die Definition der Gebirgsarten sind projektbezogen und abhängig von der einzelnen Projektphase. [3]

In Bezug zum Entwässerungssystem sind folgende, mögliche hydraulische Parameter von Bedeutung: [4]

- Festgestein: Wasserempfindlichkeit, Quelleigenschaften
- Lockergestein: Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, Quelleigenschaften
- Gebirge: Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, Quelleigenschaften,
 - Wasser: Menge pro Zeiteinheit, Druck, Niveau, Chemismus
 - Gas Konzentration

Bei der Bestimmung des Gebirgsverhaltens wird die Reaktion des Gebirges auf den Ausbruch des Gesamtquerschnittes unter Berücksichtigung der anstehenden Gebirgsart und der Einflussfaktoren beschrieben, aber ohne Berücksichtigung von Baumaßnahmen. [3]

Betreffend das Entwässerungssystem sind dabei folgende Einflussfaktoren von Bedeutung: [3]

- Bergwasser
- Strömungsdruck
- hydrostatischer Druck

Bei jedem Gebirgsverhaltenstyp ist die Abgrenzung von Mengen und Drücken des Bergwassers, unter welchen der Gebirgsverhaltenstyp gültig ist, anzugeben. [3]

Nach der Bestimmung der Gebirgsarten und des Gebirgsverhaltens wird beim zyklischen Vortrieb das tunnelbautechnische Konzept gewählt. In Hinblick auf das Entwässerungssystem beinhaltet das tunnelbautechnische Konzept: [3]

- Baugrundverbessernde Maßnahmen

- Grundwasserabsenkung
- Drainagemaßnahmen

Bei der anschließenden Abschätzung des Systemverhaltens im Ausbruchsbereich wird das Bergwasser berücksichtigt. [3]

Nach der Detailfestlegung der bautechnischen Maßnahmen und der Ermittlung des Systemverhaltens im gesicherten Bereich wird das Systemverhalten den Anforderungen gegenübergestellt. Nachzuweisen ist u.a. das Einhalten der zulässigen Auswirkungen auf die Umwelt betreffend Setzungen oder den Bergwasserhaushalt. [3]

Die Ergebnisse der geotechnischen Planung werden im Geotechnischen Bericht zusammengefasst. Dieser beinhaltet auch die Verteilung der Vortriebsklassen über die Länge des aufzufahrenden Hohlraums und den Tunnelbautechnischen Rahmenplan. [3]

Im Tunnelbautechnischen Rahmenplan werden außerdem jene Entwässerungsmaßnahmen angegeben, die vor Ort festzulegen sind. [3]

Beim kontinuierlichen Vortrieb wird nach der Bestimmung der Gebirgsarten und der Gebirgsverhaltenstypen die Vortriebsart evaluiert und das Ortsbrustverhalten ermittelt. [4]

Bei der Wahl des tunnelbautechnischen Konzeptes sind ein Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) – Typ und ein Ausbausystem zu wählen. Die umfangreichen Anforderungen an die TVM beinhalten auch die Berücksichtigung von: [4]

- Grundwasserabsenkung,
- Drainagemaßnahmen und/oder
- Maßnahmen zur Druckwasserhaltung

Basierend auf dem gewählten tunnelbautechnischen Konzept wird das Systemverhalten für die einzelnen Bereiche vom Bohrkopf bis zum fertigen Ausbau abgeschätzt. Anschließend werden die bau- und maschinentechnischen Maßnahmen für alle Bereiche im Detail festgelegt. Danach wird das ermittelte Systemverhalten den Anforderungen gegenübergestellt. [4]

In Hinblick auf das Entwässerungssystem sind die Einflussfaktoren für das Systemverhalten: [4]

- Grundwasserabsenkung
- Baugrundverbesserungen wie Injektionen oder Düsenstrahlverfahren

- Langfristige Änderungen des Schicht-, Grund- bzw. Bergwassers und dessen Druckniveaus

Die Ergebnisse der geotechnischen Planung beim kontinuierlichen Vortrieb werden in einer Dokumentation zusammengefasst: [4]

- Geotechnischer Bericht mit dem Tunnelbautechnischen Rahmenplan
- Geotechnische Risikoanalysen
- Geotechnischer Sicherheitsmanagementplan
- Störfallanalyse und Maßnahmen
- Maschinentechnische Anforderungen

Der Tunnelbautechnische Rahmenplan beinhaltet auch eine Grund- und Bergwasserprognose für die Bau- und Betriebsphase einschließlich Gebirgsdurchlässigkeiten, Druckhöhen, Angaben zur Druckentspannung und Abklingen der Bergwasserzutritte im Ortsbrustbereich. [4]

Schließlich folgt die Ermittlung der Vortriebsklassen für die Erstellung der Ausschreibungsunterlagen. [4]

2.2 Hydrogeologisches Modell

Das hydrogeologische Modell ist Teil des Gebirgsmodells, welches als Grundlage für die geotechnische Planung dient. Bei tiefliegenden Tunneln beinhaltet das Gebirgsmodell in Abhängigkeit der jeweiligen Erkundungsphase: [5]

- Geologisches Modell
- Regionalgeologisches Modell
- Baugeologisches Modell
- Hydrogeologisches Modell
- Geothermisches Modell

Neben der geologischen Kartierung wird für das geologische Modell die geologisch-hydrologische Erkundung durchgeführt. Es stehen direkte Erkundungsmaßnahmen, wie Kernbohrungen oder Erkundungsstollen, und indirekte Erkundungsmaßnahmen, wie geophysikalische Verfahren, zur Verfügung. Zur Bestimmung der Eigenschaften des Gesteins sowie der Trennflächen des Gebirges werden je nach Projektphase schließlich Laborversuche und in situ Versuche durchgeführt. [5]

Beim regionalgeologischen Modell spielen der Verlauf regional bedeutender Störungen und sensible lithologische Grenzen, wie Anhydrit führende Gesteine, eine wichtige Rolle. Im baugeologischen Modell sind die Lithologien,

Störungszonen und hydrologischen Parameter bezogen auf die Trasse und das Tunnelbauwerk zu beschreiben. [5]

Das hydrogeologische Modell dient der Beurteilung möglicher Einflüsse des Tunnelbauwerks auf die Wasserwirtschaft und vice versa. Dazu zählen: [5]

- Wasserversorgungsanlagen, wie Brunnen oder Quellen,
- Abwasserentsorgung, wie Kanalisation, Kläranlagen oder Sickeranlagen,
- Oberflächengewässer, die mit dem Grundwasser verbunden sind,
- Bauwerke in Zusammenhang mit Oberflächengewässern, wie Kraftwerke,
- Landwirtschaft, wie Bewässerung oder Drainagesysteme,
- Andere Wassernutzungen, wie Entnahmen für industrielle Zwecke,
- Altlastensanierungsprogramme,
- Grundwassermessstellen,
- Rechtliche Einschränkungen, wie Rahmenverfügungen.

Im Zuge der Planung von Tunnelbauten ist eine Prognose der Wasserzutritte in ihrer Qualität und Quantität, also der Schüttungsmengen, erforderlich. Qualitative Parameter sind: [5]

- Temperatur,
- pH-Wert,
- Mineralisierung.

Bei den Zutrittsprognosen des hydrogeologischen Modells wird zwischen stationären (während des Betriebes) und instationären Zutritten (während des Baues) unterschieden. Stationäre Zutritte sind aus folgenden Gründen von Bedeutung: [5]

- Umweltauswirkungen während des Betriebes
 - Langfristige Änderungen auf die Oberfläche, wie Setzungen oder Quellschüttungen,
 - Änderungen von Einzugsgebieten unterliegender Gewässer,
 - Einleitung in Vorflut
- Technische Einflüsse auf das Tunnelbauwerk
 - Auslegung des Wasserhaltungssystems während des Vortriebes und später des Betriebes,
 - Tunnelabdichtung
 - Drainagen
 - Gewässerschutzeinrichtungen
- Verwendung der Tunnelwässer

- Quellfassung im Tunnel, wie Trinkwasser
- Thermische Nutzung der Wassermengen
- Versorgung von Löschwasserbecken

Instationäre Zutritte während des Baues sind unter folgenden Aspekten von Bedeutung: [5]

- Umweltauswirkungen während des Baues
 - Einleitung von Wässern in die Vorflut
 - Veränderung von Quellschüttungen
 - Notwasserversorgung bei Beeinflussung von Wasserversorgungen
- Technische Einflüsse auf den Bau
 - Veränderung des Gebirgsverhaltens
 - Wassereinbrüche
 - Dimensionierung der Gewässerschutzanlage am Portal
 - Verwendung von Tunnelwasser als Wasserversorgung auf der Baustelle

Die Aufstellung von Wasserbilanzen ist erforderlich, da sich eine wasserrechtliche Genehmigungspflicht für die zugelassene Wasserabflussmenge des Tunnels ergeben kann. Dies kann zu vorauseilenden oder begleitenden Maßnahmen, wie Injektionen, während des Vortriebs führen. Wasserbilanzen stellen eine theoretische Obergrenze des stationären Zuflusses dar: [5]

„Wie viel Grundwasser wird in dem Gebirge, das theoretisch maximal entwässert werden kann, neu gebildet?“[5]

Für die Planung des Tunnels und die Beurteilung der Umweltverträglichkeit sind folgende Angaben erforderlich: [5]

- Unbeeinflusste Druckhöhe des Grundwassers vor Vortriebsbeginn sowie, wenn möglich, voraussichtliche Druckhöhe des beeinflussten Grundwassers,
- Schüttung in l/s/10m, l/s/100m oder l/s/1000m bezogen auf definierte Homogenbereiche,
- Schüttung in l/s/10m bezogen auf definierte Störungszonen,
- Wasserzutritte an der Ortsbrust und im Vortriebsbereich,
- Minimale und maximale Wassermenge am Portal während des Vortriebs,
- Langfristig (stationäre) minimale und maximale Wassermenge am Portal,
- Temperatur, pH-Wert, Gasgehalt, Gesamtmineralisierung und Chemismus der beim Vortrieb zutretenden Wässer sowie des Wassers am Portal,

- Beeinträchtigung von Oberflächengewässern, Quellen, Porengrundwasservorkommen, Wasserversorgungen etc. sowie mögliche Oberflächen-setzungen durch Entwässerung.

Diese Angaben sind in einem geologischen Längenschnitt oder in einem eigenen hydrogeologischen Längenschnitt darzustellen. [5]

Schließlich werden im geothermischen Modell die geothermischen Verhältnisse dargestellt, welche folgende Auswirkungen auf Bau und Betrieb tiefliegender Tunnel haben: [5]

- Auslegung der Baulüftung
- Abbindezeiten und Endfestigkeiten von Beton
- Dauerhaftigkeit der Kunststoffabdichtung
- Temperatur des einzuleitenden Bergwassers in die Vorflut
- Nutzung des Hohlraumbauwerkes

2.3 Bauausführung des Entwässerungssystems

2.3.1 Das Entwässerungssystem im zyklischen Vortrieb

Beim zyklischen Vortrieb gliedert sich die Bauausführung in der Phase 2 der geotechnischen Planung in folgenden grundsätzlichen Ablauf: [3]

1. Schritt: Bestimmung der aktuellen Gebirgsart und Prognose der Gebirgsverhältnisse
2. Schritt: Abschätzung des Systemverhaltens im Ausbruchsbereich
3. Schritt: Festlegung von Ausbruch und Stützung und Prognose des Systemverhaltens im gesicherten Bereich
4. Schritt: Überprüfung des Systemverhaltens

Bei der Bestimmung der aktuellen Gebirgsart werden die erforderlichen Parameter vor Ort aufgenommen und der zutreffenden Gebirgsart nach den in der Planung definierten Kriterien zugeordnet. [3]

Im Zuge der Abschätzung des Systemverhaltens im Ausbruchsbereich sind auch die Bergwasserverhältnisse im Ausbruchsbereich zu erheben und aufzuzeichnen. In Kombination mit der prognostizierten Gebirgsstruktur werden die Ergebnisse der geotechnischen Messungen und der Beobachtungen vor Ort zur Prognose des Systemverhaltens des unmittelbar vor der Ortsbrust gelegenen Bereiches verwendet. [3]

Zur Festlegung von Ausbruch und Stützung erfolgt ein Vergleich mit dem tunnelbautechnischen Rahmenplan. [3]

„Die endgültige Entscheidung der auszuführenden Baumaßnahmen basiert auf der Planung und aller vor Ort gewonnenen Information und hat zum Ziel eine sichere und wirtschaftliche Bauausführung zu gewährleisten. Die Entscheidung muss nachvollziehbar begründet und dokumentiert werden, z.B. durch ein Beiblatt zur Ausbaufestlegung.“[3]

Schließlich wird das angetroffene Systemverhalten im gesicherten Bereich und im Endzustand beurteilt und mit dem prognostizierten Systemverhalten verglichen. [3]

Zur Verbesserung des geologisch-geotechnischen Prognosemodells ist der tunnelbautechnische Rahmenplan fortzuschreiben. [3]

2.3.2 Das Entwässerungssystem im kontinuierlichen Vortrieb

Beim kontinuierlichen Vortrieb erfolgt in der Phase 2 die Planung der TVM für die Bauausführung durch den AN nach Erteilung des Bauauftrages. Die Basis ist die geotechnische Planung des AG.

Die Bauausführung wird in der Phase 3 der geotechnischen Planung durchgeführt und gliedert sich in folgenden grundsätzlichen Ablauf: [4]

1. Schritt: Bestimmung der Gebirgsart und Kurzzeitprognose der Gebirgsverhältnisse
2. Schritt: Abschätzung des aktuellen Systemverhaltens der Bereiche I bis V
3. Schritt: Detailfestlegung Vortrieb und Vortriebsvorschau (SOLL)
4. Schritt: Vortriebsnachscha (IST) – Überprüfung des Systemverhaltens und Fortschreibung des Tunnelbautechnischen Rahmenplanes und der Entscheidungsmatrix
5. Schritt: Freigabe für nachfolgende Gewerke

Zur Tunnelentwässerung allgemein sind folgende Baumaßnahmen in Abhängigkeit der Bergwasserverhältnisse, des Tunnelbauverfahrens und der Bau- bzw. Betriebsphase erforderlich: [6]

- Wasserhaltung während der Bauzeit
 - Wasserfassungen im Gewölbebereich
 - Wasserfassungen im Sohlbereich
 - Wasserfassungen – Sohlgewölbe
 - Wasserfassungen – Sohlplatte / offene Sohle
 - Drainageleitungen

- Temporäre Drainagen (Baudrainagen)
- Permanente Drainagen (Bauwerksdrainagen)
- Wasserbehandlungsanlagen
 - Gewässerschutzanlage – Bau
 - Härte-Stabilisierungssysteme während der Bauzeit
- Primäres Entwässerungssystem
 - Lokale Entwässerungsmaßnahmen
 - Flächendrainageelemente
 - Flächendrainageelemente mit geringer Drainagefunktion
 - Flächendrainageelemente mit erhöhter Drainagefunktion
 - Flächendrainageelemente in der Sohle
- Sekundäres Entwässerungssystem
 - Rohrleitungen
 - Teilsickerrohre, Vollsickerrohre und Mehrzweckrohre
 - ◆ Drainagekörper (Sickerpackung)
 - Vollrohre – Bergwassersammelleitungen und Querausleitungen
 - Kontroll- und Putzschächte, Nischen
- Fahrbahntwässerung – Straßentunnel
 - Entwässerung mit Schlitzrinne (kontinuierliche Entwässerung)
 - Entwässerung mit Einlaufschächten (Einzelentwässerung)
 - Vollrohre - Fahrbahnsammelleitungen
- Fahrraumentwässerung – Eisenbahntunnel
- Instandhaltung während Bau und Betrieb
 - Instandhaltung während der Bauausführung
 - Instandhaltung nach der Inbetriebnahme
 - Hochdruckreinigung
 - Mechanische Reinigung
 - Härtestabilisierung des Drainagewassers
 - Instandsetzungsmaßnahmen an Entwässerungsanlagen

Das primäre Entwässerungssystem sind die Systemelemente der nicht zugänglichen Bergwasserfassung und das sekundäre Entwässerungssystem sind die Systemelemente der für die Instandhaltung zugänglichen Rohre und Schächte der Bergwasserableitung. [6]

Das primäre und sekundäre Entwässerungssystem bilden zusammen das permanente Entwässerungssystem. Baudrainagen zur temporären Entwässerung auf Baudauer werden nicht näher behandelt.

2.4 Versinterungen der Drainagen

Die Versinterungsproblematik der Drainagen betrifft die oben genannten Baumaßnahmen in Abhängigkeit von: [6]

- Bergwasserverhältnisse
- Gebirge, Boden
- Kontakt mit zementösen Baustoffen am Bauwerk
- Eintritt in den Drainagekörper
- Abfluss in der Drainage
- Gestörter Abfluss Querableitungen, Einmündungen, Niveausprünge, Rohrstöße etc.
- Zusammenwachsen der Calcit-Kristalle

Die Versinterung der Drainagen ist ein Beispiel für die Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtsreaktion. Die Versinterung beschreibt die Bildung eines schwerlöslichen Niederschlages durch Überschreiten des Löslichkeitsproduktes von Calciumcarbonat (CaCO_3). In speziellen Fällen wird der Niederschlag auch als „Kesselstein“ bezeichnet. [7]

Die Versinterungsmechanismen in Tunnelbauten werden wie folgt durch chemische Gleichungen beschrieben: [6]

- Versinterung durch kalkübersättigtes Wasser
 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (Gleichung 1)
- Versinterung durch eine Erhöhung des pH-Wertes des Bergwassers
 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{Na}(\text{OH}) \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{NaHCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (Gleichung 2)
 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2 \text{CaCO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$ (Gleichung 3)
- Versinterung durch kohlenstoffsaures (kalkaggressives) Wasser
 - $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$ (Gleichung 4)
- Versinterung durch Kalkhydrat-Lösung
 - $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (Gleichung 5)
- Versinterung durch Mischwasserbildung

Das zum Tunnel zutretende Bergwasser weist einen bestimmten Chemismus, einen bestimmten Druck und eine bestimmte Temperatur auf. Der Eintritt in das Entwässerungssystem erfolgt durch: [6]

- Gezielte Ableitungen im Vortrieb (Flächendrainagen, Halbschalen, Abschlachungen),
- Risse im Spritzbeton,
- Nachträgliche Bohrungen,

- Ankerlöcher,
- Fugen der Tübbingauskleidung

Dort kommt es in Kontakt mit zementgebundenen Baustoffen, wie Spritzbeton, Verpress- und Injektionsmaterial, Drainagekörper sowie Hinterfüllungen. Das Bergwasser erfährt eine Druckentspannung, eine Temperaturänderung und kommt in Kontakt mit Luft. [6]

Die oben beschriebenen Versinterungsmechanismen können die Funktionsfähigkeit des Entwässerungssystems einschränken.

Das Ziel ist generell, die erforderliche Instandhaltung während des Bau- und Betriebes gering zu halten und Instandsetzungsmaßnahmen an Entwässerungsanlagen zu vermeiden.

2.5 Abgrenzung des Themas

Folgende Aspekte werden in der vorliegenden Abschlussarbeit nicht näher betrachtet:

- Statisch-konstruktive Planung des Tunnelbauwerkes
- Straßentunnel und andere spezielle Tunnelbauten
- Eisenbahntunnel außerhalb Österreichs
- Baudrainagen zur temporären Entwässerung auf Baudauer

3 Frühere Untersuchungen

3.1 Optimierte Entwässerungssysteme

Neben kalkgesättigtem Bergwasser und alkalischen Baustoffen trägt auch die Gestaltung des Entwässerungssystems zu dessen Versinterung bei. [8]

Ein Gestaltungsgrundsatz zur Verringerung der Ablagerungsbildung ist die Minimierung des Bergwasserkontaktes mit dem Beton. Entlastungsbohrungen durch den Spritzbeton und der Einsatz von Geotextilien vor dem Auftrag von Spritzbeton sind zu vermeiden. Abschlachungen direkt am Gebirge und Noppenbahnen bei flächenhaften Austritten verringern den Kontakt zum Baustoff. [8]

Durch früher angewendete Außenabdichtungen bei gemauerten Tunneln wird der Kontakt mit dem Baustoff ebenfalls unterbunden (siehe Abbildung 1). [8]

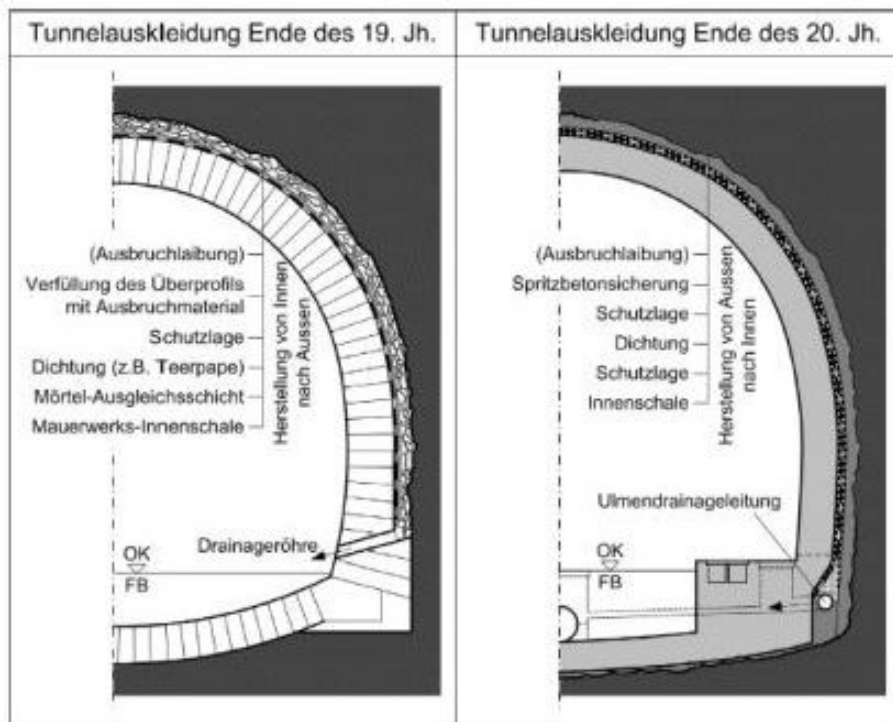


Abb. 1: Abdichtung Eisenbahntunnel früher und heute [8]

Die heute übliche Abdichtung zwischen Spritzbeton-Außenschale und Ortbeton-Innenschale beim zyklischen Vortrieb führt zum Kontakt des Bergwassers mit kalk- und zementhaltigen Baustoffen. Eine verringerte Spritzbetondicke verringert die Versinterungen. Dies darf allerdings nicht die statischen Erfordernisse beeinträchtigen. [8]

Eine ungebundene, zement- und kalkfreie Sickerpackung über der Ulmendrainage erschwert ebenfalls die Versinterungsneigung. [8]

Härtstabilisations-Depotsteine in der Sickerpackung verschieben nur das Problem und bewirken Hohlräume in der Sickerpackung. [8]

Bei der Rohrwahl des Entwässerungssystems sind innen glatte, kreisrunde Rohre mit breiten Schlitz bei Sickerrohren zu bevorzugen. Die Rohre sollten nicht überdimensioniert werden, um den Wasser-Atmosphärenkontakt zu verringern und nicht unterdimensioniert werden, um die Reinigung mit entsprechenden Geräten zu ermöglichen [8].

Ableitungen der anfallenden Bergwässer sollten auf kürzestem Weg erfolgen. Um die Ulmendrainagen nicht zu groß dimensionieren zu müssen und Wässer unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung trennen zu können, sollte die Wasserführung durch Querableitungen zur Sammelleitung gesteuert werden. Diese planmäßig verschlossenen Querableitungen können manuell geöffnet oder verschlossen werden, oder mit Überlaufschwelen versehen werden. [8]

Durch einen größeren Abstand der Kontroll- und Reinigungsschächte wird der Entwicklung der Rohrreinigungstechnik Rechnung getragen und der Luftaustausch zwischen Drainageluft und Tunnelluft verringert. Deshalb sollten außerdem die Schachtabdeckungen luftdicht ausgeführt sein. Im Schachtboden sollte ein Gerinne vorhanden sein, das aus nicht kalk- und zementgebundenem Material besteht. [8]

Bauliche Lösungsvorschläge für Tunnelentwässerungen mit geringerer Versinterungsneigung sind: [8]

- Aufstau mittels Staurohr
- Siphonierung mittels Siphonrohr
- Druckhaltung mittels Steigleitung über einen Lüftungsschacht
- Druckhaltung mittels Druckklappen am Tunnelportal

Ist die Reinigung der Tunnelrainagen erforderlich, müssen die Gleissperren für den Zugang zu den Reinigungsschächten möglichst gering gehalten werden. Neue Drainagespülsysteme sehen vor, die Drainage- und Sammelleitungen von einem zentralen Spülschacht aus über Spülleitungen anzusteuern. Der zentrale Spülschacht ist im Querschlags-, Rettungstollen- und/oder Portalbereich zu errichten. So können die Sperrzeiten verringert werden (siehe Abbildung 2). [9]

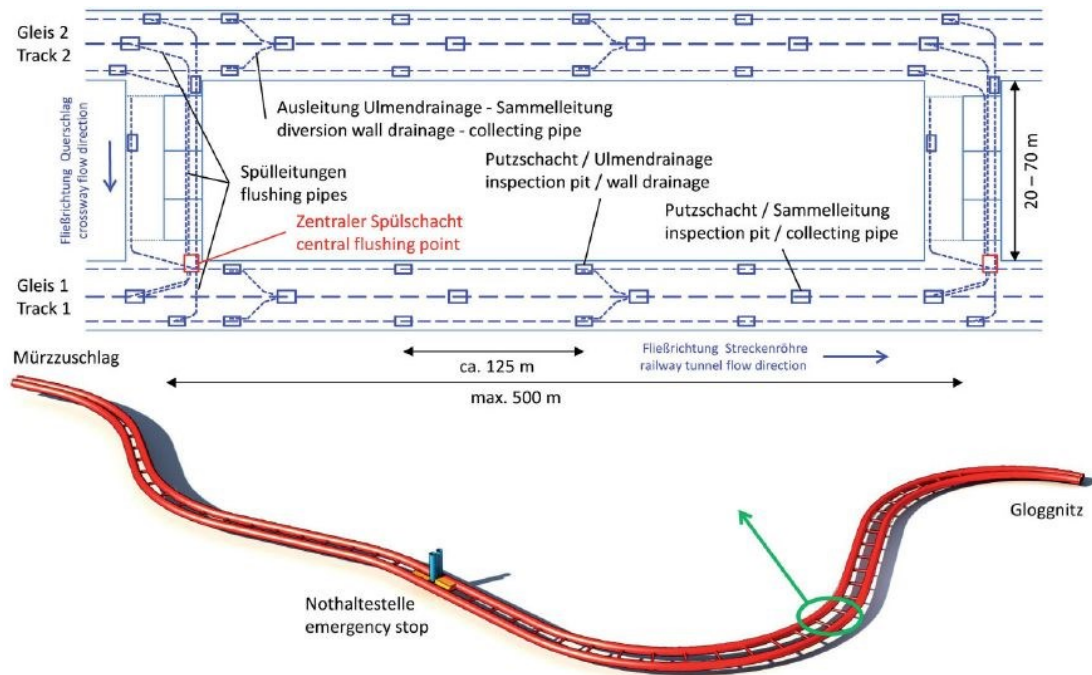


Abb. 2: Leitungsführung Drainagespülsystem am Beispiel des Semmering-Basistunnels [9]

3.2 Nutzung von Tunnelwasser

Die möglichen Nutzungsvarianten von Tunnelwasser werden maßgeblich von der zeitlich schwankenden Verfügbarkeit von Tunnelwasser geprägt. Schüttungsganglinien stellen die am Portal verfügbare Wassermenge dar und können auch für jahreszeitliche Analysen dienen. Diese können dem ebenfalls zeitlich schwankenden Bedarf an Tunnelwasser gegenübergestellt werden. [10]

Neben der Wassermenge sind auch die Nutzungsparameter Wasserqualität und Wassertemperatur Schwankungen unterworfen. Die genauen chemischen und physikalischen Eigenschaften der Tunnelwässer sind von großer Bedeutung. Auch der Schutz gegenüber Verunreinigungen aus dem Innenbereich des Tunnels ist zu berücksichtigen. Hinweise auf die Verweilzeiten und Einzugsgebiete der Tunnelwässer geben die isotopenhydrologischen Eigenschaften. [10]

Bei alten Bestandstunneln, wie dem Bosruck-Eisenbahntunnel, sind Entwässerungstollen zur Fassung der Bergwässer errichtet und die Wässer sind in den mittigen Sohlenkanal geleitet worden (siehe Abbildung 3). Im Bereich des Südportals wird zusammen mit einem ausgeleiteten Teil des Ardingbaches ein Kleinkraftwerk betrieben. [10]

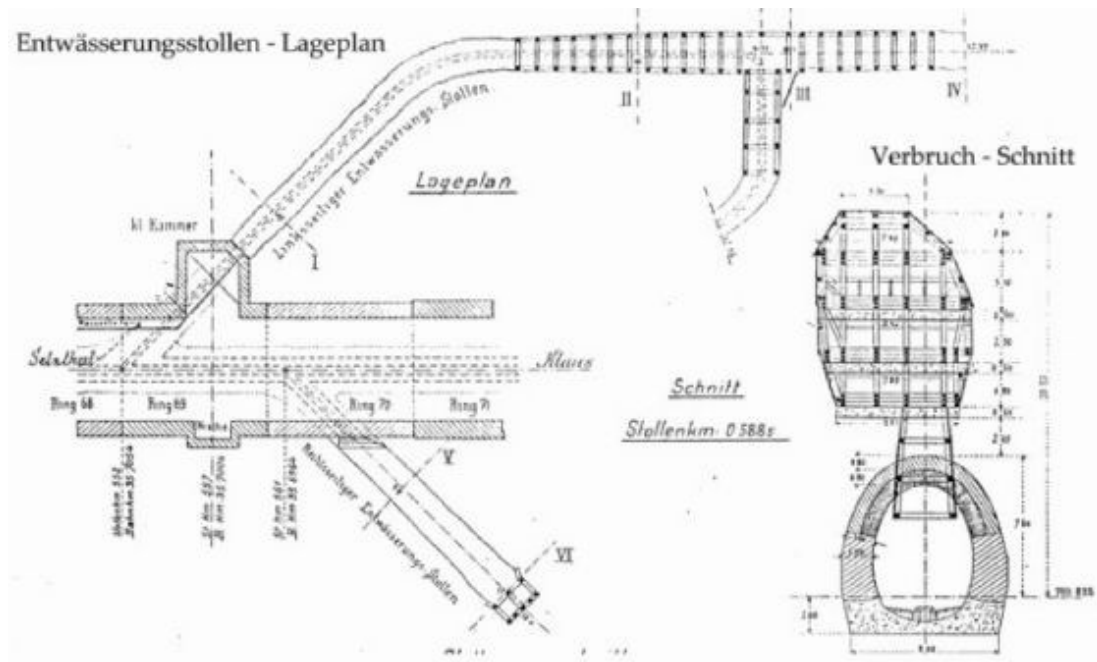


Abb. 3: Lageplan Entwässerungsstollen des Bosruck-Eisenbahntunnels [10]

Aspekte der Tunnelwassernutzung müssen bereits in den ersten Projektphasen eines neuen Tunnels berücksichtigt werden. Hierfür sind wasserrechtliche, technische und ökologische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Auskünfte gibt außerdem das hydrogeologische Modell. Ansonsten muss die Strategie der Minimierung der Wassermenge verfolgt werden. [10]

Die Strategie der Minimierung der Wassermenge bedeutet hier, die zutretenden Tunnelwasser nicht zu nutzen, sondern durch geeignete Baumaßnahmen zu reduzieren.

Die in Planung oder im Bau befindlichen Tunnels in Österreich, wie z.B. auf der Südbahn, bieten ein großes Potenzial zur Tunnelwassernutzung. [10]

3.3 Bildung von Versinterungen in Tunnel drainagen

Bei der Untersuchung der Versinterungsmechanismen wird zwischen deszendente Wässern (Sicker- und Grundwässer) und ascendente Grundwässern (aufsteigende Tiefengrundwässer) unterschieden. [11]

Im deszendente Sicker- bzw. Grundwasser verändert sich bei Eintritt in das Entwässerungssystem das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, da sich das Wasser wieder unter atmosphärischen Bedingungen befindet. Daher tritt überschüssiges gelöstes Kohlendioxid aus dem Drainagewasser aus, wodurch die Löslichkeit des Calciumcarbonates abnimmt und Versinterungen entstehen. (s. Gleichung 1). [11]

Eine Anhebung des pH-Wertes im Bergwasser durch Kontakt mit alkalischen Stoffen, wie z.B. Spritzbeton, kann ebenfalls zur Ausscheidung von Kalk führen. Auch eine Erwärmung des Drainagewassers verringert die Löslichkeit von Kohlendioxid, wodurch das überschüssige gelöste Kohlendioxid entweicht und in Folge Calciumcarbonat ausfällt. Je größer die Phasengrenzfläche zwischen Gasphase und Wasser, desto schneller kann überschüssiges gelöstes Kohlendioxid aus dem Wasser entweichen und desto schneller findet der Temperatenausgleich statt. [11]

Aszendente Wässer aus größeren Tiefen sind stärker mineralisiert und deshalb auch stärker betonangreifend. Die Versinterungsmechanismen sind differenzierter zu betrachten und führen zu verschiedensten mineralischen Ablagerungen. Auf das Vorkommen aszendenter Wässer deuten erhöhte Temperaturen und hohe elektrische Leitfähigkeiten des Drainagewassers hin. [11]

Bei der Anwendung von Spritzbeton kann ein alkalischer Erstarrungsbeschleuniger zu starken Versinterungen in den Entwässerungssystemen führen. Auch der Portlandit (Calciumhydroxid) im Spritzbeton reichert das Bergwasser mit Calcium-Ionen an und erhöht dessen pH-Wert. Zementinjektionen und Ankermörtel stellen ebenfalls ein großes Potenzial an Calcium- und Hydroxidionen dar, welche zu starken Versinterungserscheinungen führen können (s. Gleichungen 2 und 3). [11]

Kohlensaures (kalkaggressives) Bergwasser greift die zementgebundenen Baustoffe an und löst verstärkt Calciumhydroxid aus. Dadurch bildet sich kalkübersättigtes Wasser, das bei Eintritt in das Entwässerungssystem Calciumcarbonat ausfällt. (s. Gleichung 4). Auch der kalkhaltige Zuschlag im Baustoff wird durch kalkaggressives Bergwasser angegriffen und bildet kalkübersättigtes Wasser, das den Versinterungsmechanismen ausgesetzt ist (s. Gleichungen 1 bis 3). [6]

Aus dem Beton ausgewaschenes Calciumhydroxid im Bergwasser kommt im Entwässerungssystem in Kontakt mit Luft. Durch Aufnahme des in der Luft vorhandenen Kohlendioxids wird vor allem bei langsamen Fließgeschwindigkeiten Kalk abgeschieden (s. Gleichung 5). [6]

Die Mischung von portlanditreichem, alkalischem Wasser mit kalkreichem Drainagewasser führt ebenso zu Versinterungen (s. Gleichung 3). Nach Ablagerung des Calciumcarbonates kann das Mischwasser durch Absorption des Kohlendioxids aus der Atmosphäre calcitabscheidend werden (s. Gleichung 5). Die Ausfällung endet, wenn das Drainagewasser wieder im atmosphärischen Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ist. [11] (s. Abbildung 4)

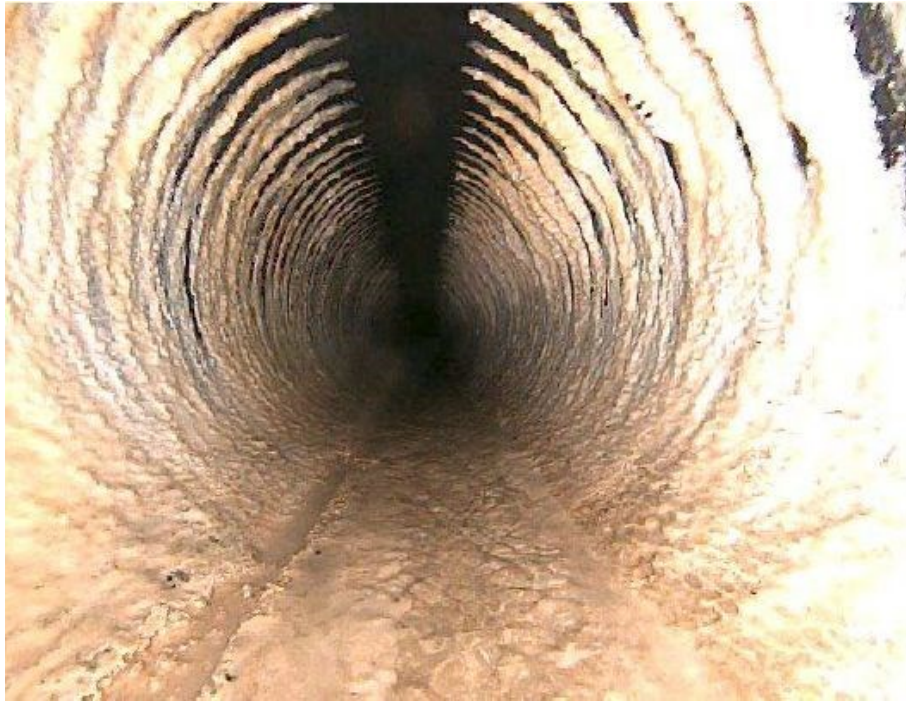


Abb. 4: Beispiel für harte Ablagerungen im Drainagerohr [6]

3.4 Task-Force Drainage

Die Task-Force Drainage (TFD) ist ein Projekt der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) im Bereich der Instandhaltung. Nach Fertigstellung der aktuellen Großprojekte Semmering-Basistunnel, Brenner-Basistunnel, Koralmtunnel und Tunnelkette Granitztal sind insgesamt etwa 1.081 km Bauwerksdrainagen in ÖBB-Tunneln instand zu halten. Die TFD dient der Koordination verschiedenster Projekte und befasst sich mit allen Aspekten der Tunnelentwässerung während des Baues und Betriebes mit dem Ziel, den erforderlichen Instandhaltungsaufwand zu optimieren. [12]

Bei der einheitlichen Erhebung des Zustands der Bauwerkdrainagen in ÖBB-Tunnel hinsichtlich Wasserchemismus und Versinterungen sind Probenahmen erforderlich. Dafür ist eine genaue Planung notwendig, die in einem Längenschnitt des zu untersuchenden Tunnels dargestellt wird (s. Abbildung 5). [12]

Auch die Erhebung verfügbarer Bestandsunterlagen ist durchzuführen. [12]

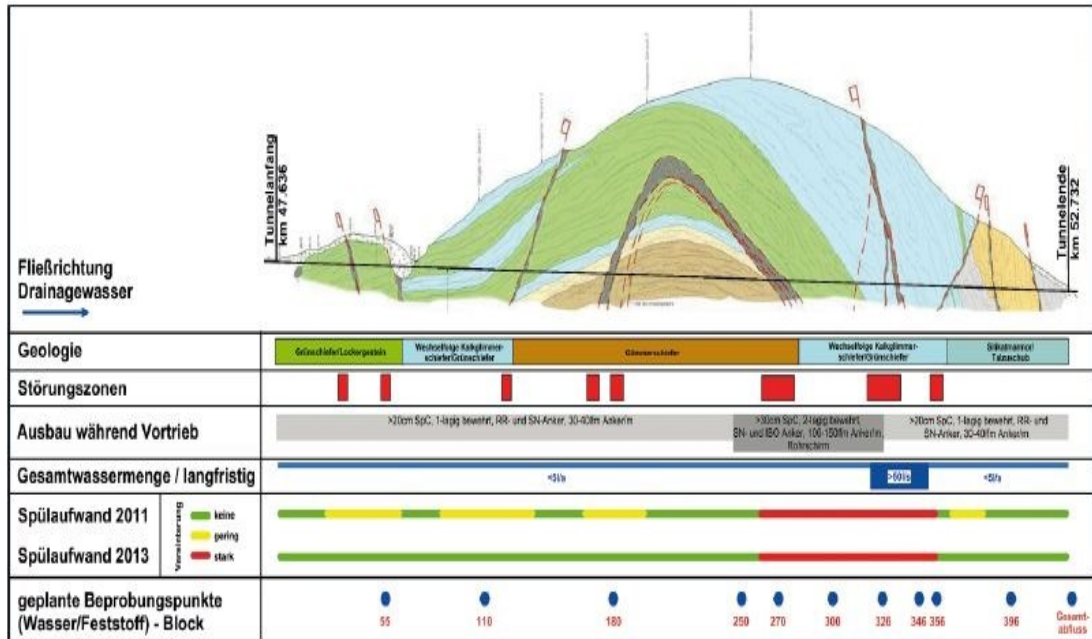


Abb.5: Beispiel Längenschnitt für die Planung der Probenahme aus Bauwerksdrainagen [12]

3.5 Versinterungsmonitoring

Die Beurteilung und Überwachung von Versinterungsprozessen in Tunnelbauwerken umfasst die Prognose kritischer Bauabschnitte auf der Grundlage hydrochemischer Modellierungsansätze, die Entwicklung und Erprobung entsprechender Monitoringwerkzeuge und die Erarbeitung von geeigneten Präventionsstrategien zur Vermeidung von Versinterungen. [13]

Zu den klassischen Monitoringwerkzeugen zählen Probenahmen und Laboranalysen. Weiters werden Versinterungs-Wächter für ein In-situ-Monitoring in Tunneldrainagen entwickelt, welche auf der Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers beruhen. Die Messstationen können außerdem den Wasserstand, die Wassertemperatur und den pH-Wert in einem Drainagerohr in bestimmten Zeitintervallen aufzeichnen. [13]

Um die Grundlagen für eine voraussagende Instandhaltung des sekundären Entwässerungssystems zu schaffen, werden verschiedene Sensorprinzipien getestet. Die akustische Analyse von Bauwerksdrainagen beispielsweise geht von der Annahme aus, dass eine akustische Anregung des Hohlraums in einem Drainagerohr den luftgefüllten Querschnitt über die gesamte Untersuchungs-länge zu Schwingungen anregt. Versinterungen führen zu Einengungen, welche Veränderungen in den Schwingungsmoden hervorrufen. [14]

Eigenschwingungsanalysen messen eine zunehmende Versinterung aufgrund der Änderung des Massenträgheitsmoments der Bauwerksdrainage. [14]

Bei der Kapazitätstomographie wird die Änderung der Permittivität, also der Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder, bei verschiedenen Medien detektiert, sodass sich Aussagen über die Dicke der Versinterungen treffen lassen. Bei Anwendung der elektrischen Widerstandstomographie wird bei verschiedenen Medien zwischen den Elektroden die Änderung des elektrischen Widerstands gemessen. [14]

4 Arbeitshypothesen

Die gebildeten Hypothesen dienen zur Beantwortung spezieller Fragestellungen. Darunter werden keine wissenschaftlichen Hypothesen verstanden, die eine bestimmte Wahrscheinlichkeit messen. Diese werden z.B. im Bereich der Sozialwissenschaften angewendet.

Die aufgestellten Hypothesen sollen auch keine neue Theorie entwickeln. Diese sind lediglich ein Mittel zum Zweck, die vom Lehrstuhl vorgegebene Aufgabenstellung zum vorliegenden Thema zu lösen.

4.1 Arbeitshypothese 1

„Das Österreichische Staatsarchiv in Wien eignet sich als Grundlage zur Recherche über die Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich.“

Kamerabefahrungen zeigen oft Ulmendrainagen in Tunnelbauwerken, die aufgrund von Versinterungen ihre Funktionsfähigkeit verlieren. Prinzipiell sind aber auch alle anderen Systemelemente betroffen – von den Wasserfassungen, über die Baudrainagen bis hin zu den Bauwerksdrainagen. Sowohl das primäre als auch das sekundäre Entwässerungssystem können im Prinzip durch Versinterungen beeinträchtigt werden.

Die zu erfüllenden Baumaßnahmen werden üblicherweise auf Plänen dargestellt. Im Idealfall ist eine eigene Plandarstellung des Entwässerungsschemas vorhanden. Vor allem das primäre, nicht zugängliche Entwässerungssystem kann im Nachhinein auf Bestandsplänen betrachtet werden. Auch im Leistungsverzeichnis sind die Bauleistungen erfasst.

Das Archivieren von Archivgut der Bundesdienststellen (Bundesministerien, Bundesämter) der Republik Österreich obliegt grundsätzlich dem Österreichischen Staatsarchiv.

Die Frage lautet, wie sich das Österreichische Staatsarchiv in Wien als Grundlage zur Recherche über die Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich eignet.

Daraus ergeben sich folgende Unterfragen:

- Welche Archive aus welcher Zeitperiode sind von Bedeutung?
- Wie werden die Unterlagen zu Tunnelbauten auf Bahnstrecken archiviert?

- Welches Material von Tunnelbauwerken ist archiviert?
- Wie ist die Zugänglichkeit zu aktuellen Unterlagen von Tunnelbauten?

4.2 Arbeitshypothese 2

„Die Darstellung der Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich trägt zur Beseitigung der Versinterungsproblematik in Tunnel drainagen in Österreich bei.“

Die Semmeringbahn gilt als die erste Hochgebirgseisenbahn der Welt und ist seit 1998 UNESCO-Weltkulturerbe. Sie ist Mitte des 19. Jahrhunderts errichtet worden und ist Teil der Eisenbahnverbindung zwischen der Hauptstadt Wien und der alt-österreichischen Hafenstadt Triest.

In der Folge ist die Herstellung zahlreicher Gebirgseisenbahnen in Alt-Österreich in Angriff genommen worden. Die Tunnelbauten sind unter widrigsten Bedingungen errichtet worden. Die Weltkriege des 20. Jahrhunderts haben viele Tunnelbauwerke schwer beschädigt.

Bei der Einfahrt in den Semmering-Haupttunnel ist die gemauerte Innenauskleidung zu erkennen. Hat ein Umbau des Alten Semmeringtunnels stattgefunden? Wie funktioniert die Entwässerung des Tunnels? Gibt es Probleme mit Versinterungen?

Diese Fragen können bei jedem Eisenbahntunnel gestellt werden. Die Basis für die Beantwortung der Fragen ist die Untersuchung im Österreichischen Staatsarchiv.

Vermutlich wird bei den längeren Tunneln einer Bahnstrecke umfangreicheres Material vorliegen. Die Recherche bei jedem einzelnen Tunnel wäre viel zu langwierig und wahrscheinlich gar nicht durchführbar.

Bevor die Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT) in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt worden ist, ist die Österreichische Tunnelbauweise in Österreich eingesetzt worden. Der Alte Semmering-Haupttunnel beispielsweise ist mit dieser Baumethode errichtet worden. Der Vortrieb, die Sicherung, der Ausbau, die Baustoffe, die Wasserhaltung und viele weitere Aspekte haben sich stark zur heutigen NÖT unterschieden. Neue Materialien in der Betontechnologie, Ankertechnik, Kunststofftechnik und viele weitere Bereiche haben die NÖT weiterentwickelt. Die Lösung der Versinterungsproblematik liegt möglicherweise in der historischen Entwicklung der Wasserhaltung und der Materialien.

Die Frage lautet, wie die Darstellung der Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich zur Beseitigung der Versinterungsproblematik in Tunnel drainagen in Österreich beiträgt.

Dabei stellen sich folgende Unterfragen:

- Wie hat sich die Wasserhaltung während des Vortriebs entwickelt?
- Wie hat sich die Tunnelabdichtung entwickelt?
- Wie hat sich das Entwässerungssystem entwickelt?
- Wie haben sich die Baustoffe entwickelt?
- Wie sind die Gebirgs- und Bergwasserverhältnisse gewesen?

4.3 Arbeitshypothese 3

„Die Skizzierung der Fortentwicklung von Entwässerungssystemen in Eisenbahntunneln in Österreich unterstützt die Planung eines funktionierenden, wartungsarmen Entwässerungssystems in Tunnelbauwerken in Österreich.“

Aus der vorhandenen Literatur heraus sind zwei Wege erkennbar, wie die Versinterung des Entwässerungssystems verhindert werden kann:

- Strategie der gezielten Versinterung
- Strategie der verminderten Versinterung

Die erste Strategie benötigt einen vorhandenen Versinterungsraum. Durch die Wasserfassung mittels Entwässerungsstollen beispielsweise ist ein solcher Versinterungsraum gegeben. Hier können sich Ablagerungen ohne Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des Entwässerungssystems bilden.

Die zweite Strategie braucht geeignete Baustoffe und eine entsprechende Gestaltung der Wasserfassung während des Vortriebs, der Baudrainagen und der Bauwerksdrainagen.

Der Schlüssel zur Lösung der Versinterungsproblematik ist das Verständnis von der Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtsreaktion.

In diesem Zusammenhang sollte der geochemische CO₂-Kreislauf betrachtet werden. Auch Verunreinigungen der Luft und des Wassers spielen eine Rolle. Der Einfluss bestimmter Gesteine sollte in der Diskussion ebenso miteinbezogen werden.

Die Frage lautet, wie die Skizzierung der Fortentwicklung von Entwässerungssystemen in Eisenbahntunneln in Österreich die Planung eines

funktionierenden, wartungsarmen Entwässerungssystems in Tunnelbauwerken in Österreich unterstützt.

Dabei ergeben sich folgende Unterfragen:

- Wie werden sich die Baumaßnahmen auf Basis der historischen Entwicklung der Entwässerungssysteme fortentwickeln?
- Wie wird das ideale Entwässerungssystem der Zukunft in Eisenbahntunnel in Österreich funktionieren?

5 Untersuchungsmaterial

5.1 Das Österreichische Staatsarchiv

5.1.1 Auswahl der Archive

Das zentrale Archiv der Republik Österreich ist das Österreichische Staatsarchiv. Dieses archiviert grundsätzlich das Archivgut der Bundesdienststellen. In Bezug auf die Administration ist das Österreichische Staatsarchiv eine nachgeordnete Dienststelle des Bundeskanzleramtes. [15]

Das Österreichische Staatsarchiv besteht aus folgenden Abteilungen: [15]

- Allgemeines Verwaltungsarchiv (AVA)
- Archiv der Republik (AdR)
- Finanz- und Hofkammerarchiv
- Haus-, Hof- und Staatsarchiv
- Kriegsarchiv

Die Laufzeit des AVA erstreckt sich ca. vom Jahr 1500 bis ca. ins Jahr 1940. Zur Entstehungsgeschichte, zu den zahlreichen Übernahmen und zu den Umstrukturierungen des AVA sei auf das Archivinformationssystem und weiterführende Literatur verwiesen. Zu erwähnen sind die Aktenabtretungen an die Nachfolgestaaten der Donaumonarchie nach dem Jahr 1918 und der Justizpalastbrand im Jahr 1927, der einen Großteil des dort verwahrten Archivgutes zerstörte. [15]

In der Abteilung AVA befinden sich verschiedene Bestandsgruppen. Die Bestandsgruppe „Verkehr“ (Vk) gliedert sich wiederum in mehrere Bestände. Neben den Akten über staatliche Eisenbahnverwaltungen und Registraturen von Eisenbahngesellschaften findet sich u.a. der Bestand „Urkunden und Pläne“ mit einem Entstehungszeitraum ca. vom Jahr 1840 bis ca. ins Jahr 1920. Dieser Bestand besteht u.a. aus den Teilbeständen „Historische Plansammlung“ (D67) und „Projektesammlung“ (D68), die Pläne und Unterlagen zu damaligen Bahnstrecken enthalten. [15]

Das AdR verwahrt sämtliche Akten und Schriftdokumente sämtlicher zentraler Bundesdienststellen (Bundesministerien, Bundesämter) der 1. und 2. Republik ab dem Jahr 1918 bis 2005. [15]

Zu beachten ist die 30-jährige Archivsperre von heute zurückgerechnet, in der keine Akten ausgehoben werden dürfen. Mittels Antrag kann diese Sperrfrist auf 20 Jahre reduziert werden.

Das AdR besteht aus 22 Bestandsgruppen, darunter auch die Bestandsgruppe „Verkehr“ (Vk). Diese enthält u.a. Aktenbestände der für das Verkehrswesen zuständigen Ministerien ab 1918. Wichtig ist, dass auch umfangreiche Plan- und Urkundensammlungen zum Eisenbahnbau vorliegen, die noch weiter zurückgehen. Dies hängt damit zusammen, dass diese Sammlungen aufgrund fortlaufend geführter Indizes nicht in einen Monarchie- und Republikbestand geteilt werden können. [15]

Die Bestandsgruppe „Verkehr“ beinhaltet u.a. den Bestand „Planarchive“ mit einem Entstehungszeitraum vom Jahr 1861 bis ins Jahr 2012. Dieser enthält u.a. folgende Teilbestände: [15]

- Planarchiv der Generalinspektion der österreichischen Eisenbahnen und der Verkehrsministerien (GluVM)
- Planarchiv der Generaldirektion der Österreichischen Staats- und Bundesbahnen (GD)
- Planarchiv Urkundenbeilagen (Urklbg)

Das Planarchiv der GluVM enthält ein Stations- und ein Streckenverzeichnis. Diese verweisen auf einen bestimmten Streckenindex der gesuchten Bahnstrecke. Das Planarchiv der GluVM wird bis zum heutigen Tag ergänzt. [15]

Das Planarchiv der GD ist eine wertvolle Ergänzung zu obigem Planarchiv und beinhaltet ein Streckenverzeichnis mit den verschiedenen Bahnbezeichnungen, wo die gesuchte Bahnstrecke zu finden ist. [15]

Das Planarchiv der Urkundenbeilagen ist eine abgeschlossene Sammlung von Urkunden und dazugehörigen Plänen zu Bahnstrecken. Dieses enthält auch Planmappen mit großformatigen Plänen. [15]

Zu erwähnen ist die Kartensammlung des Kriegsarchivs, das zu den größten Kartensammlungen der Welt zählt. Hier sind auch topographische Karten und Eisenbahnkarten enthalten. [15]

5.1.2 Auswahl der Bahnstrecken

Innerhalb der oben genannten Archive werden unter der Vielzahl von Bahnlinien jene untersucht, die Tunnelbauten entlang der Strecke vorweisen. Im Zuge der Recherche werden folgende Bahnstrecken ausgewählt:

- AVA/Vk/D67
 - Südbahn
- AVA/Vk/D68
 - Südbahn
- AdR/Vk/GIuVM
 - Südbahn (SB)
 - Arlbergbahn (STB 2)
 - Tauernbahn (LB T 19)
- AdR/Vk/GD
 - Südbahn (SB)
 - Arlbergbahn (STB 2)
- AdR/Vk/Urksblg
 - Südbahn
 - Tauernbahn

Die Untersuchung des Archivmaterials der oberhalb angeführten Bahnstrecken erfordert die Durchsicht von ca. 100 Kartons von Akten.

5.1.3 Auswahl des Materials

Bei den oben genannten Bahnstrecken sind Verzeichnisse angegeben, die Hinweise auf den Inhalt der angeführten Kartonnummern geben. Bei den Streckenindizes des Planarchivs der GIuVM sind zusätzlich Archivzahlen und „ad“-Nummern anzugeben, um die gewünschten Akten bzw. Kartone zu bestellen.

Zu den Bahnstrecken findet sich unterschiedlichstes Material. Der Fokus der Recherche liegt auf folgenden Unterlagen:

- Tunnel-Längenschnitte
- Tunnel-Querschnitte
- Geologisches Längenprofil des Tunnels
- Zusätzliche Unterlagen zur Entwässerung des Tunnels

Schließlich werden Unterlagen zu folgenden Tunnelbauwerken ausgehoben:

- AVA/Vk/D67
 - Südbahn
 - **Semmering Haupttunnel**
 - **Steinbauer-Tunnel**
 - **Tunnel durch die Breitensteiner Höhe**
 - **Tunnel zwischen beiden Adlitzgräben**

- **Tunnel durch die Krausel-Wand**
 - **Tunnel durch die Bollers-Wand**
- AVA/Vk/D68
 - Südbahn
- AdR/Vk/GIuVM
 - Südbahn (SB)
 - **Leitersbergtunnel**
 - Arlbergbahn (STB 2)
 - **Arlbergtunnel**
 - **Wildentobeltunnel**
 - Tauernbahn (LB T 19)
 - **Tauerntunnel**
 - **Karawankentunnel**
 - **Oberer Klamm-tunnel**
 - **Tabor-Tunnel**
 - **Čuk-Tunnel**
 - **Revoltella-Tunnel**
 - **S. Giacomo-Tunnel**
 - **Seidelbach-Tunnel**
 - **Cupovo-Tunnel**
 - **Kumar-Tunnel**
 - **Bukovo-Tunnel**
- AdR/Vk/GD
 - Südbahn (SB)
 - **Semmeringtunnel**
 - Arlbergbahn (STB 2)
 - **Arlbergtunnel**
- AdR/Vk/Urkbgl
 - Südbahn
 - **Semmeringtunnel**
 - **Tunnel durch den Berg Isel**
 - **Tunnel durch die Sonnenburg**
 - **Tunnel bei den Patscherwiesen**
 - **Tunnel am Schürfes**
 - **Tunnel bei den Rinnerhöfen**
 - **Tunnel an der Mühlthaler Lehne**
 - **St. Jodok-Tunnel**

- **Stafflach-Tunnel**
- **Tunnel durch den Schelleberg**
- **Tunnel durch den Pontigl**
- Tauernbahn
 - **Tauerntunnel**

Auch ergänzende Unterlagen, wie Längenprofile der Bahnstrecken, Leistungsverzeichnisse oder Gutachten werden eingesehen, wenn solche vorhanden sind und das vorliegende Thema behandeln. Bei den längeren und neueren Tunneln ist umfangreicheres Material in den Archiven zu finden. Wegen der Archivsperre sind in den Streckenindizes der GIuVM jedoch keine aktuellen Tunnelbauvorhaben wie Tunnelsanierungen auf den ausgewählten Bahnstrecken der letzten 30 Jahre eingetragen. Als Beispiele sind die Sanierung des Arlbergeisenbahntunnels oder des Tauerneisenbahntunnels zu nennen, welche wertvolle Hinweise zum Entwässerungssystem geben würden.

5.2 Auswahl von Regelquerschnitten neuerer Tunnelbauwerke

Um der Entwicklung der Entwässerungssysteme der letzten Jahrzehnte Rechnung zu tragen, werden Unterlagen zu Tunnelbauwerken seitens des Lehrstuhls für Subsurface Engineering herangezogen. Folgende Tunnelbauwerke werden näher betrachtet:

- Südbahn
 - **Semmeringtunnel**
- Arlbergbahn
 - **Arlbergtunnel**
 - **Zammertunnel**
- Tauernbahn
 - **Birgltunnel**
 - **Kaponigtunnel**
- Unterinntalbahn
 - **Münsterertunnel**

Die Unterlagen der angeführten Tunnelbauwerke enthalten verschiedenste Pläne wie Längenschnitte, Regelquerschnitte und Entwässerungsdetails. In Summe wird anhand der Tunnelbauten aus verschiedenen Zeitperioden die Basis für die Analyse im nächsten Kapitel geschaffen.

6 Analyse

6.1 Datenanalyse

6.1.1 Die Semmeringbahn

Die folgende Datenanalyse dient der Auswertung der vorhandenen Unterlagen vom Österreichischen Staatsarchiv und vom Lehrstuhl für Subsurface Engineering. Auch wenn die Pläne Primärquellen aus der Zeit der Herstellung des Tunnelbauwerkes darstellen, werden diese einer Prüfung unterzogen. Die Unterschriften auf Plänen werden nicht entziffert, da diese Aufgabe von einem Historiker durchzuführen ist. Auch die Datierung eines Planes wird nicht festgestellt, wenn dazu keine Angaben gemacht werden. Ergänzend wird auf die teilweise vorhandene Sekundärliteratur zur Geschichte des Eisenbahnbaues aufmerksam gemacht, welche aber nicht Gegenstand dieser Analyse ist.

Semmering Haupttunnel

Im Längenprofil über den Baufortschritt des Semmering Haupttunnels von 1853 ist sowohl im Aufriss als auch Grundriss der durchgeschlagene Tunnel dargestellt. Von der „*südlichen Façade* [sic!]“ bis zur „*nördlichen Façade* [sic!]“ sind folgende Schächte abgeteuft worden: [16]

- Mundschacht (vertikal)
- Schacht IX (Fördermaschine von 8 Pferdekraften, vertikal)
- Schacht VIII (Fördermaschine von 4 Pferdekraften, vertikal)
- Schacht VII (Fördermaschine von 4 Pferdekraften, vertikal)
- Schacht VI (Fördermaschine von 4 Pferdekraften, vertikal)
- Schacht V (Dampfmaschine von 16 Pferdekraften, vertikal)
- Schacht IV (Dampfmaschine von 8 Pferdekraften, schräg)
- Schacht III (Fördermaschine von 4 Pferdekraften, schräg)
- Schacht II (Fördermaschine von 6 Pferdekraften, vertikal)
- Schacht I (schräg)

Im Längenschnitt sind 10 Durchschläge vermerkt. [16]

In einem weiteren Längenprofil des Semmering Haupttunnels vom 26. Dezember 1848 beträgt die geplante Gesamtlänge des Tunnel 720 Wiener Klafter (720 W.Klftr x 6 W.Fß/W.Klftr = 4300 W.Fß x 0,3161 m/W.Fß = 1400 m). Der Scheitelpunkt des Tunnels ist genau in der Hälfte der Gesamtlänge. Der Scheitelpunkt hat eine geplante Höhe über der Meeresfläche von 468,500 W.Klftr (888,6 m). Die maximale

Überdeckung beim Gipfel des Berges an der Landesgrenze würde 61,720 W.Klftr (117,1 m) betragen. Die geplante Steigung bzw. das Gefälle auf beiden Seiten beträgt 1/120 (8,33 ‰). [17]

In den einzelnen Vortriebsbereichen ist das zutretende Wasser über die Schächte abgepumpt worden. Die „*Pumpenvorrichtung zum Wasserheben aus den Schächten und Tunnel-Räumen während dem Baue [sic!] des Semmering Haupttunnels*“ im Anhang A zeigt deren Funktionsweise. Zwischen den Schächten VII und VIII ist ein Maschinenhaus mit einer Dampfmaschine stationiert gewesen, welches über ein Zuggestänge und Kolben das Bergwasser von der Tunnelsohle an die Oberfläche abwechselnd gepumpt hat. [18]

Die Wasserhubmaschine ist in Anhang B dargestellt. [19]

In der Ansicht der „*Façade [sic!] am Semmering Haupttunnel*“ von 1853 ist das im antiken, römischen Stil errichtete Südportal abgebildet. Im Längenschnitt und in der Draufsicht des Portals ist der gemauerte, in der Mitte der Tunnelsohle liegende Sohlenkanal erkennbar. Dieser ist mit einer Abdeckplatte versehen. Der Sohlenkanal zweigt nach dem Portal in einer rechteckigen Abwinklung beiderseits in den seitlichen Entwässerungsgraben im Freien ab. [20]

Steinbauer-Tunnel

Im Grundriss des Steinbauer-Tunnels ergeben sich die Länge des Tunnels von 46,5 W.Klftr (88,2 m) und ein Höhenunterschied von 1,163 W. Klftr (2,206 m). Dies ergibt eine Steigung von 25 ‰. Im Grundriss ist der mittige, gemauerte Sohlenkanal abgebildet, der mit einer Platte abgedeckt ist. Der Sohlenkanal wird diesmal in einer 90°-Kurve in den seitlichen Entwässerungsgraben geleitet. Zu beachten ist, dass auch das Wasser aus den Entwässerungsgräben des höher gelegenen Südportals im Sohlenkanal des Tunnels durchgeleitet wird. Die Widerlager und das Gewölbe sind sowohl aus Wiener Ziegeln als auch aus einheimischen Ziegeln hergestellt worden. Die Nachmauerung (Innenverkleidung) ist aus Bruchstein sowohl in Mörtel als auch trocken hergestellt worden. [21]

Tunnel durch die Breitensteiner-Höhe

Da im Längenprofil der Semmeringstrecke kein Tunnel mit dieser Länge und diesem Namen aufscheint, handelt es sich hier vermutlich um einen Entwurf vom Jahr 1850. Das Gefälle würde 1/400 (2,5 ‰) betragen. Der Tunnel würde eine Länge von 34,2 W. Klftr aufweisen (34,2 W. Klftr x 6 W. Fß/W.Klftr = 205 W.Fß x 0,3161 m/W.Fß = 64,9 m). Tatsächlich ist der „Weinzettelfeld-Tunnel“ hergestellt worden. Die Pläne zeigen keine Details des Entwässerungssystems. [22]

Tunnel zwischen beiden Adlitzgräben

Auch der Plan dieses Tunnels ist ein Entwurf vom Jahr 1849. Tatsächlich ist der „Weberkogel-Tunnel“ errichtet worden. Die Pläne zeigen keine Details des Entwässerungssystems. [23]

Tunnel durch die Krausel-Wand

Der kurze Tunnel durch die Krausel-Wand hat im Entwurf vom Jahr 1852 eine Länge von 5 W.Klftr ($5 \text{ W.Klftr} \times 6 \text{ W.Fß/W.Klftr} = 30 \text{ W.Fß} \times 0,3161 \text{ m/W.Fß} = 10 \text{ m}$) und eine Steigung von 1:60 (16,7 ‰). Die Pläne zeigen keine Details des Entwässerungssystems. [24]

Tunnel durch die Bollers-Wand

Der Tunnel durch die Bollers-Wand weist im Längenprofil von 1849 eine Länge von 180,2 W.Klftr (341,8 m) mit einer Steigung von 1/60 (16,7 ‰) auf. In der Mitte der Tunnelsohle befindet sich der gemauerte Sohlenkanal. Die zwei Seiten-Stollen befördern das anfallende Wasser zusätzlich nach außen. Der Seitenstollen I hat eine Länge von ca. 32 W.Klftr (ca. 60 m) und der Seitenstollen II eine Länge von ca. 39 W.Klftr (ca. 74 m). Die Seitenstollen führen im rechten Winkel zum Haupttunnel nach außen und besitzen ebenso einen gemauerten Sohlenkanal. [25]

Linie Wien-Triest

Die Semmeringbahn ist Teil der Strecke Wien – Triest. Das von der k.k. Südbahn-Gesellschaft herausgegebene Leporello der Linie Wien-Triest enthält deren General-Längenprofil und dient dem Reisenden mit Zusatzinformationen auf der Strecke. [26]

Die Gesamtlänge der Strecke Wien-Triest beträgt 577.191,76 m (577,2 km). Die Maximalsteigung wird mit 25 ‰ angegeben. Der Minimalradius der Kurven beträgt 189,6 m. [26]

Die Planunterlagen der Linie Wien-Triest sind im Hinblick auf Details des Entwässerungssystems gesichtet worden. Neben der Semmeringstrecke sind ausschließlich beim Leitersbergtunnel Planteile des Entwässerungssystems gefunden worden. Die durchfahrenen Tunnel von Wien aus Richtung Triest lauten: [26]

- Tunnel bei Gumpoldskirchen (L=164,95 m, St=2,5 ‰)
- Pettenbachertunnel (L=185,25 m, St=10 ‰ und horizontal)
- Steinbauertunnel (L=87,66 m, St=25 ‰)
- Eichbergtunnel (L=88,80 m, St=25 ‰)

- Gewölbter Einschnitt (L=80,95 m, St=25 ‰)
- Rumplertunnel (L=52,36 m, St=25 ‰)
- Klammertunnel (L=190,83 m, St=12,5 ‰)
- Gamperlertunnel (L=78,20 m, St=22,2 ‰)
- Weinzettlwandtunnel (L=688,00 m, St=19,6 ‰ und 25 ‰)
- Weinzettlfeldtunnel (L=238,96 m, St=25 ‰)
- Kleiner Krausel Tunnel (L=13,55m, St=16,556 ‰)
- Krausel-Tunnel (L=337 m, St=16,556 ‰) („Bollers-Tunnel“)
- Weberkogeltunnel (L=406,91 m, St=22,07 ‰)
- Wolfsbergtunnel (L=439,53 m, St=16,7 ‰)
- Kartnerkogeltunnel (L=201,16 m, St=10 ‰)
- Semmering-Haupttunnel (L=1430,34m, St=3,33‰, 898,056m ü.A., Ge=3,33‰)
- Egydi-Tunnel (L=189,70 m, St=6,63 ‰)
- Leitersbergtunnel bei Marburg (L=663,50 m, St=7,54 ‰)
- Kerschbachtunnel (L=241,60 m, St=7,692‰, horiz., Ge=7,692‰)
- Kreuzbergtunnel (L=182,90 m, St=7,69 ‰)
- Lipoglavertunnel (L=236,80 m, St=7,67 ‰)
- Ringotunnel (L=131 m, horiz.)
- Poganegertunnel (L=122,35 m, St=2 ‰)
- Tunnel I (L=538,9 m, Ge=6,67 ‰)
- Tunnel II (L=324,85 m, Ge=6,67 ‰)
- Tunnel III (L=283,93 m, Ge=6,67 ‰)
- Tunnel IV (L=359,61 m, Ge=6,67 ‰)
- Tunnel V (L=534,44 m, Ge=6,17 ‰)
- Tunnel VI (L=443,49 m, Ge=6,17 ‰)
- Barcola-Tunnel (L=75,00 m, Ge=10,75 ‰ und 13,7 ‰)

Die teilweise unterschiedlichen Längen und Steigungen der Tunnels im Vergleich zu den vorherigen Tunneln liegen daran, dass bei den vorherigen Tunneln teilweise Entwurfspläne vorliegen.

Leitersbergtunnel

Der Leitersbergtunnel ist Teil der Linie Wien – Triest in der Nähe der alt-österreichischen Stadt Marburg. Im Situationsplan von 1896 ist die Errichtung einer Entwässerungsanlage für das südliche Ende des Leitersbergtunnels dargestellt. Seitlich des Tunnels ist ein bis zu 85 m langer Entwässerungsschlitz ausgehoben worden. Der Entwässerungsschlitz führt das Wasser von einer Quelle weg zu einem Entwässerungsschacht. Von der Schachtsohle weg führt ein Entwässerungsstollen

das Bergwasser in den Sohlenkanal des Haupttunnels, wo das Wasser abgeleitet wird. [27]

Der Schlitz weist eine Breite von 1 m auf und ist bis zu 8 m tief. Der Schacht ist 2 m breit und hat eine Tiefe von 12,5 m. Der Entwässerungsschlitz und der –schacht sind beide mit Bruchsteinen aufgefüllt. Der gemauerte Entwässerungsstollen hat eine lichte Weite von 1 m und eine Länge von ca. 4,60 m. Dieser mündet in einen Seitenkanal im Haupttunnel, welcher rechtwinkelig in den mittigen Sohlenkanal mündet. [27]

Im Längensprofil von 1904 ist die Erweiterung der Entwässerungsanlage dargestellt. Auf der gegenüberliegenden Seite des Tunnels ist ein bis zu 87 m langer und bis zu 16,5 m tiefer Entwässerungsschlitz gegraben worden. Weiter südlich ist noch ein weiterer, 60 m langer und bis zu 9,80 m tiefer Entwässerungsschlitz ausgehoben und mit Bruchsteinen befüllt worden. Bei den Schlitzten führt jeweils ein Schacht zum Entwässerungsstollen, der das Wasser in den Sohlenkanal ableitet. [28]

Außerdem sind Lüftungsschächte an der Firste des Haupttunnels eingezeichnet. Ob diese Schächte beim Vortrieb als Förderschächte und zum Wasserheben eingesetzt worden sind, kann nur vermutet werden. [28]

Neuer Semmeringtunnel

Nach ca. 100 Jahren des Betriebes des Alten Semmering-Haupttunnels hat sich wieder die Frage „Semmeringtunnel“ gestellt und verschiedene Lösungen dieser Frage sind aus technischer und wirtschaftlicher Sicht genau geprüft worden.

Der tunnelfachmännische Standpunkt ist in Form eines Gutachtens von Professor Ladislaus v. Rabcewicz eingeholt worden. [29]

Das Gutachten von 1947 stellt verschiedene Lösungen dar: [29]

- Rekonstruktion des Alten Tunnels
 - Firststollenbauweise
 - Bauweise „Kunz“
- Paralleltunnellösung
 - Bauweise „Rabcewicz“
 - Österreichische Bauweise
- Einbau der eingleisigen Röhre in den Alten Tunnel
 - Bau der Röhre in Beton
 - Bau der Röhre mit Mauerungsverkleidung

Bei der Firststollenbauweise wäre bei der Gewölbewiderherstellung ein Eisenblech als Isolierung zwischen Sparbeton und Gewölbebeton zum Einsatz gekommen. Das

Bergwasser wäre außerhalb der Isolierung im Bereich des Widerlagers über ein Drainagerohr (D=10cm) nach innen zum mittigen Sohlkanal geleitet worden. [29]

Im Zuge der Bauweise „Kunz“ wäre ebenso eine Isolierung aus Eisenblech und Drainagerohre (D=10cm) alle 3 m am Gewölbefuß zum Einsatz gekommen, die das zutretende Bergwasser in den mittigen Sohlenkanal ableiten. [29]

Die Bauweise „Rabcewicz“ hätte ebenfalls den Gewölbebeton mit einem Stahlblech isoliert und das anfallende Bergwasser alle 3 m über eine Drainrohr (D=10cm) nach innen geleitet. Die Tunnelsohle weist ein Gefälle auf und am Tiefpunkt befindet sich der seitliche, gemauerte Sohlenkanal. [29]

Auch bei der „Österreichischen Bauweise“ wäre ein Stahlblech als Isolierung verwendet worden und ein Drainrohr (D=10cm) alle 3 m eingebaut worden, welches das Bergwasser zum seitlichen Sohlenkanal in der Tunnelsohle abgeleitet hätte. [29]

Schließlich ist die Paralleltunnellösung umgesetzt worden. Mittels der belgischen Bauweise ist ein eingleisiger Paralleltunnel errichtet worden. Nach Fertigstellung ist der Bahnverkehr in den neuen Semmeringtunnel umgeleitet worden und der Alte Tunnel hat saniert werden können. Der Alte Semmering Haupttunnel ist mit einem Betoninnengewölbe versehen worden, sodass dieser ebenso zu einem eingleisigen Tunnel ausgebaut worden ist. [30]

Das Längenprofil des Neuen Semmeringtunnels ist dachförmig ausgestaltet worden, mit beiderseitigen Neigungen von 4 ‰. Auf die Innenlaibung des Gewölbebetons ist eine Isolierung angebracht worden und anschließend eine Granitverkleidung gemauert worden. Beim Umbau des Alten Semmeringtunnels ist eine Ringstoßfugenabdichtung angebracht worden. Drainrohre (D=10cm) führen in die seitlichen Sohlenkanäle. [30]

Zur Entwässerung sind neben den Entwässerungsbohrlöchern auch Oberhasli-Ableitungen eingesetzt worden (siehe Abbildung 6). [31]

Dabei werden mittels eines kurzen Schlauches und Zementes Hohlräume hergestellt, die der Ableitung von zutretendem Bergwasser dienen. Der Name stammt von der Kraftwerke Oberhasli AG, die Wasserkraftanlagen in der Schweiz betreibt.

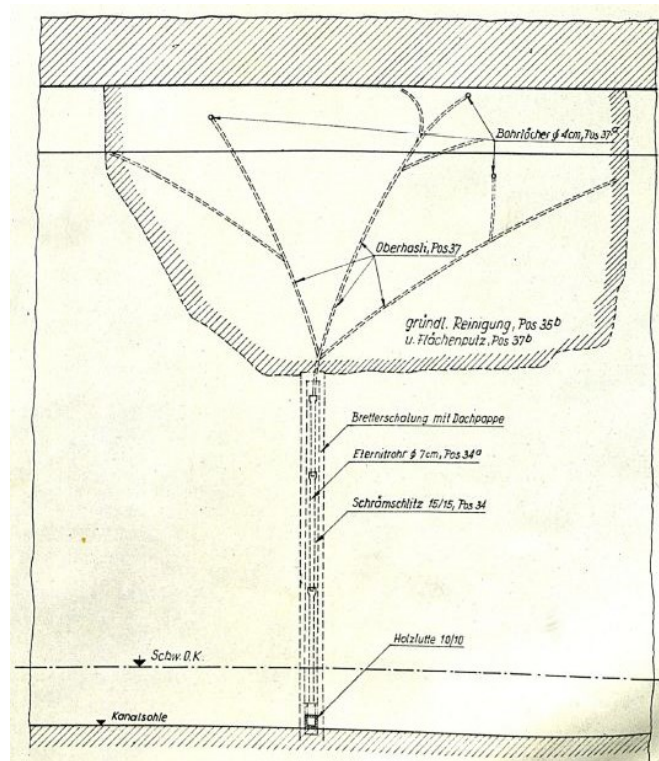


Abb. 6: Oberhasli-Ableitungen beim Umbau des Alten Semmeringtunnels [31]

6.1.2 Die Brennerbahn

Das Längenprofil vom „1. Loos [sic!]“ (1. Baulos) von 1864 der k.k. privaten Südbahngesellschaft zeigt die Strecke vom Bahnhof Innsbruck bis zur Grenze zum 2. Baulos. Bei den Tunneln ist der mittige Sohlenkanal eingezeichnet. Am unteren Portal eines Tunnels ist jeweils eine „Tunneldohle“ vorhanden, um das Bergwasser seitlich abzuleiten. Eine Tunneldohle ist ein Kanal mit Abdeckplatte, der das Wasser aus dem Sohlenkanal am unteren Portal eines Tunnels nach außen abführt. [32]

Tunnel durch den Berg Isel

Die Länge des Tunnels beträgt „2086,38 Fuss [sic!]“ ($2086,38 \text{ Fß} \times 0,3161 \text{ m/Fß} = 659,5 \text{ m}$). Die Steigung weist einen Wert von 1:40 auf (25 ‰). [32]

Tunnel durch die Sonnenburg

Die Länge des Tunnels beträgt „788 Fuss [sic!]“ ($788 \text{ Fß} \times 0,3161 \text{ m/Fß} = 249 \text{ m}$). Die Steigung hat einen Wert von 1:40 (25 ‰). [32]

Zur Entwässerung ist zusätzlich ein Entwässerungsstollen gebaut worden. Das Blatt „Entwässerungen durch Canalanlagen [sic!]“ im Anhang C zeigt den Entwässerungsstollen an der Westflanke im Bereich des Nordportals. [33]

Tunnel an der Mühlthaler Lehne

Vom Tunnel an der Mühlthaler Lehne sind 4 Besonderheiten im Österreichischen Staatsarchiv vom Jahr 1868 dokumentiert: [34]

- Entwurf eines imposanten Nordportals des Tunnels
- Hölzerner Einbau zur Sicherung der Gewölbemauerung
- Ausmauerung der Seitenstollen zur Bergwasserableitung (siehe Anhang D)
- Verstärkungsarbeiten bei der Gewölbemauerung

Tunnel St. Jodock

Der Tunnel bei St. Jodock im Baulos IV weist ebenso Seitenstollen und Schachtanlagen auf. Die „Anlage der Schächte und Seitenstollen“ vom Jahr 1865 in Anhang E zeigt die Schnitte dieser Stollen, die vermutlich dem Vortrieb im Haupttunnel gedient haben. 2 Durchschläge im Haupttunnel sind vermerkt. [35]

Der gemauerte Sohlenkanal liegt in der Mitte der Tunnelsohle (siehe Abbildung 7). [36]

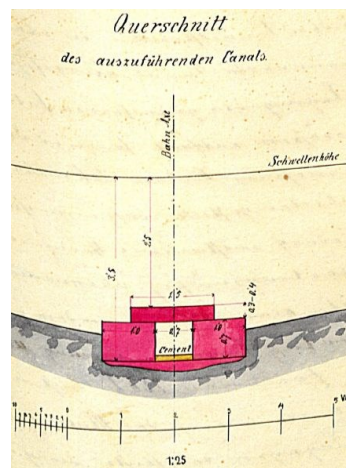


Abb. 7: Sohlenkanal St. Jodock- Tunnel [36]

Die weiteren Tunnels der Brennerbahn weisen ähnliche Baumaßnahmen zur Entwässerung auf. Auch abseits des Tunnels sind Maßnahmen zur Entwässerung, wie Entwässerungsgräben, Sickerschlitze, offene Durchlässe oder Bachumleitungen, gesetzt worden.

Die Tunnelanlagen der Brennerbahn sind seit ca. 150 Jahren in Verwendung. Eine Entlastung bringt der derzeit in Bau befindliche Brennerbasistunnel.

Münsterertunnel

Der im Jahr 2012 fertiggestellte Münsterertunnel befindet sich im Unterinntal in Tirol und ist Teil der Zulaufstrecke Nord der neuen Eisenbahnachse Brenner.

Der Tunnel gliedert sich in folgende 5 Baulose: [37]

- Baulos H2-2
 - Grundwasserwanne, Gewölbe mit Sohlplatte
 - Offene Bauweise, druckdicht
 - L=2390,00 m
- Baulos H2-1
 - Gewölbe mit Sohlgewölbe, Gewölbe mit Sohlplatte
 - Bergmännische Bauweise, sowohl druckdicht, als auch drainiert
 - L=4195,00 m
- Baulos H3-4
 - Kreisprofil Schildbauweise
 - Bergmännische Sonderbauweise „Tunnel in Schildbauweise“, druckdicht
 - L=5826,00 m
- Baulos H3-6
 - Gewölbe mit Sohlgewölbe
 - Bergmännische Bauweise, druckdicht
 - L=655 m
- Baulos H8
 - Kreisprofil Schildbauweise, Kasten mit Sohlplatte, Grundwasserwanne
 - Bergmännische Sonderbauweise „Tunnel in Schildbauweise“, Offene Bauweise, alles druckdicht
 - L=4324,00 m

Im Baulos H2-1 wird im Anhydritbereich sowohl der Haupttunnel als auch der parallel verlaufende Rettungsstollen mit den Notausgängen zwischen Haupttunnel und Rettungsstollen drainiert, also druckwasserentlastend, ausgeführt. [37]

Bei Plankilometer 30,0 befinden sich folgende Baumaßnahmen der Entwässerung im Haupttunnel (siehe Abbildung 8): [37]

- Ulmendrainage PP DN250 mm (2 Mal seitlich)
- Tunnelhauptentwässerung PVC-U DN400 mm (1 Mal in der nördlichen Gleisachse)
- Quersammler PVC-U DN250 mm (alle 50 m, 90° zur Tunnelachse)
- Revisionschächte Ulmendrainage RVS 100x60 cm bei Quersammler
- Revisionschächte Tunnelhauptentwässerung RVS DN1000 mm bei Quersammler

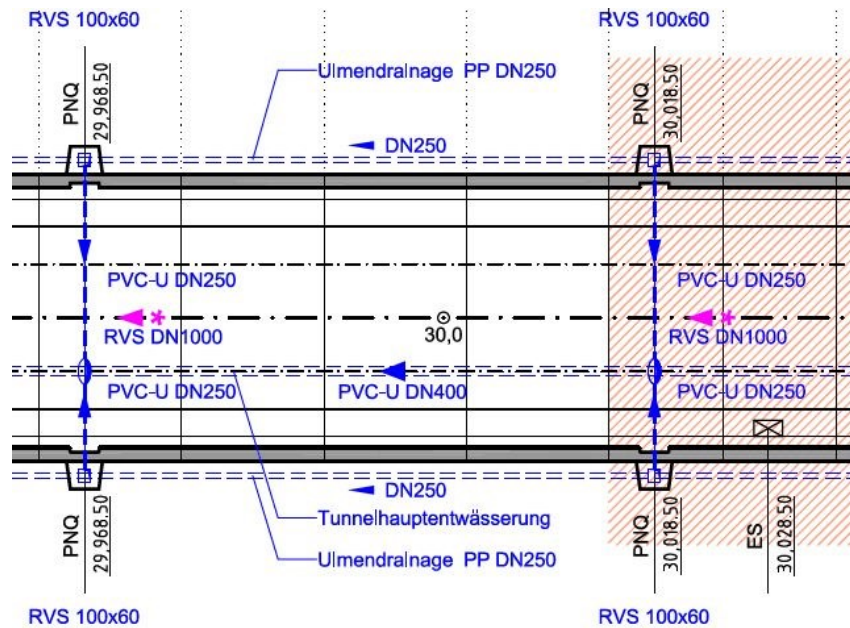


Abb. 8: H2-1 Haupttunnel Anhydritbereich – drainiert [37]

Außerdem ist eine Regenschirm-Abdichtung zwischen Spritzbeton und Gewölbebeton bis zur beiderseitigen Ulmendrainage vorhanden.

Im Baulos H3-4 ist eine druckdichte Tübbing-Außenschale ausgeführt worden. Die Abdichtung erfolgt über 2 Hartgummi-Bänder in den Tübbingfugen. Falls trotzdem Leckagewasser eintritt, wird das Bergwasser über die Tübbingfugen zur Sohl drainage geleitet (siehe Abbildung 9). Als Regenschirmabdichtung ist zusätzlich eine Kunststoffdichtungsbahn zwischen Tübbing-Außenschale und Brandschutz-Innenschale angebracht worden.



Abb. 9: Verlegung der Sohl drainage für Leckagewasser, Quelle: ÖBA H3-4

Im Bereich bei Plankilometer 33,2 sind folgende Baumaßnahmen zur Entwässerung ausgeführt worden (siehe Abbildung 10): [37]

- Sohl drainage für Leckagewasser PE-HD DN315 (Tunnelsohle, mittig)
- Revisionschächte RVS 3400x1300 mm mit DN1000 mm (alle 90 m)
- Störfallrinne 10 cm tief (mittig)

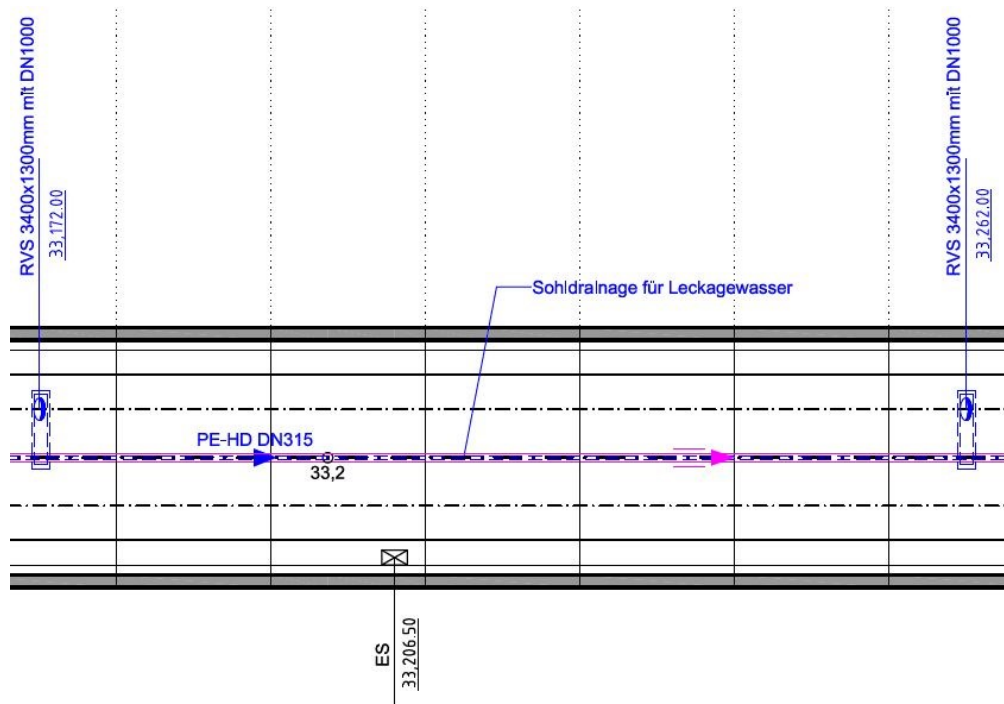


Abb. 10: H3-4 Haupttunnel – druckdicht [37]

Im Bereich des Tiefpunktes des Haupttunnels bei km 33,98 im Baulos H3-4 sind zwei Sammelschächte mit Tauchpumpe getrennt für Störfallwässer und Bergwässer vorhanden, die über Pumpleitungen die Wässer zu den Rettungsstollen abführen. [37]

6.1.3 Die Arlbergbahn

Die Profiltypen für den Arlbergtunnel der „K.k. Direction [sic!] für Staats-Eisenbahnbauten“ von 1880 zeigen folgende Schnittansichten: [38]

- Lichtraum-Profil
- Felsen-Profil
- Verkleidungs-Profil
- Leichtes Druckprofil
- Schweres Druckprofil (ohne oder mit Sohlengewölbe)
- Große Kammer
- Kleine Kammer
- Nische
- Sohlenkanal

Zur Wasserabführung wird folgende Bemerkung gemacht: [38]

„Der Ausbruch für das Tunnelgewölbe ist bei Fig. 6 bis incl. [sic!] 11 so reichlich zu halten, dass zur Wasserabführung überall die nöthige [sic!] Steinschichtung eingebracht werden könne.“

Auch die Anbringung von Sickerschlitzten wird bei der Gewölbe-Hintermauerung in hydraulischem Mörtel gefordert. [38]

Im Übersichts-Situationsplan und Längensprofil von 1880 wird der geplante Arlbergtunnel dargestellt. Dieser führt von St. Anton nach Langen mit einer Tunnellänge von 10.247,5 m. Zuerst steigt der Tunnel mit 2 ‰ bis zum Scheitelpunkt des Tunnels (1310,6 m ü.A.) und fällt anschließend mit 15 ‰ Richtung Westen. [39]

Zur Entwässerung dient hauptsächlich der mittige, gemauerte Sohlenkanal (siehe Anhang F). [40]

Im Zuge der sicherheitstechnischen Nachrüstung des Arlbergtunnels ist im Jahr 2006 die Bergwasserableitung des bestehenden Mauerwerks in Bereichen mit Spritzbetonversiegelung geplant worden. Der Tunnelquerschnitt dafür ist in Anhang G dargestellt. [41]

Dabei werden Bergwasserzutritte beim bestehenden Mauerwerk durch streifenförmige Flächendrains (Breite jeweils max. 1 m) in Tunnelquerrichtung gefasst. Durch streifenförmige Flächendrains in Tunnellängsrichtung unterhalb (Breite jeweils 50 cm, 5 ‰ Gefälle) werden die Bergwässer zu den Ringfugen geleitet. Dort wird ein Schlitz im Mauerwerk (B/H min. = 20/10 cm) hergestellt. Im Schlitz entlang den Ringfugen befindet sich ein Stützkorb aus Mattenstahl, wo luftseitig ein Filterdrain mit Dichtmörtel angebracht ist. [41]

Das Bergwasser fließt entlang des Schlitzes und im Ulmenbereich in ein Vollrohr (DN 100 mm), das in Beton gebettet ist. Dort befindet sich außerdem eine Putzöffnung mit Schraubdeckel. Schließlich erfolgt die Spritzbetonversiegelung (Dicke mind. 5 cm) mit einer alkaliresistenten Glasfaserbewehrung, welche im Mauerwerk im Raster 1,5/1,5 m verankert ist. [41]

Auch die Randwegentwässerung mündet in den Quersammler (Vollrohr DN 100 mm). Der Quersammler weist ein Gefälle von 2 ‰ auf. Im bestehenden Sohlenkanal ist ein Mehrzweckrohr (DN 250 mm) eingebaut worden, das auf einem Unterlagsbeton gebettet ist. Der Quersammler mündet in das Mehrzweckrohr. [41]

Zusätzlich führt oberhalb des Mehrzweckrohres eine Löschwasserleitung in einem Kabeltrog durch den Tunnel. [41]

Wildentobeltunnel

In der Darstellung des Ausfahrtsportals Richtung Bludenz bei Plankilometer 115,53 km von 1913 ist der mittige, gemauerte Sohlenkanal erkennbar. Dieser mündet beim Portal in einer runden, 90°-Abwinkelung in den seitlichen Entwässerungsgraben. Der Tunnel fällt mit 29,56 ‰ Richtung Bludenz. [42]

Der Seitenstollen bei Plankilometer 114,86 km dient der künstlichen Lüftung. [43]

Zammertunnel

Der Zammertunnel liegt bei der Ortschaft Zams in Tirol und ist 1999 fertiggestellt worden. In der Plandarstellung des Tunnelregelquerschnittes ist der Aufbau des Tunnels ersichtlich. Die Außenschale besteht aus Spritzbeton. Darauf folgt das Abdichtungssystem als Regenschirmabdichtung. Schließlich grenzt der Gewölbebeton der Ort beton-Innenschale an. Im Ulmenbereich befindet sich jeweils die Ulmendrainage (PVC-MZ DN250mm). Diese ist oberhalb vom Filterbeton, seitlich von Beton und unterhalb von einem Mörtelbett umgeben. [44]

6.1.4 Die Tauernbahn

Für die 2. Eisenbahnverbindung nach Triest sind ab 1901 4 lange Alpentunnels errichtet worden:

- Bosrucktunnel (Pyhrnbahn)
- Wocheinertunnel (Wocheinerbahn)
- Karawankentunnel (Karawankenbahn)
- Tauerntunnel (Tauernbahn)

Karawankentunnel

Der im Übersichts-Lageplan und Längenschnitt von 1902 dargestellte Karawankentunnel hat eine Länge von 7960 m. Dieser steigt auf Kärntner Seite mit 3 ‰ und fällt im Bereich der Landesgrenze mit 6 ‰ Richtung Krain (heutiges Slowenien). [45]

Tauerntunnel

Der Tauerntunnel weist eine Länge von 8526,30 m auf. Auf Salzburger Seite steigt der Tunnel mit 10,0 ‰ bis zum Scheitelpunkt im Bereich der Landesgrenze und fällt mit 2 ‰ Richtung Kärnten. [46]

Bei Ring Nr. 41 ist im Zuge des Vortriebs vom Sohlstollen aus normal zur Tunnelachse ein Entwässerungsstollen von ca. 10,40 m Länge errichtet worden. Vom Firststollen ist ebenfalls ein Entwässerungsstollen vorgetrieben worden. Die

beiden Stollen sind durch einen Schacht miteinander verbunden. Auch bei Ring Nr. 43 ist im Zuge des Vortriebs ein Entwässerungsstollen vom Sohlstollen aus vorgetrieben worden. Die Stollen sind mit einer Betonsohle versehen und ein Kanal leitet das Bergwasser ab. Der Rest des Querschnittes ist mit Steinen ausgefüllt. (siehe Anhang H). [47]

Zur Entwässerung dient der mittige, gemauerte Sohlenkanal. Weiters wird bei den Tunnelprofilen der K.k. Eisenbahnbaudirektion folgende Bemerkung gemacht:

„Die Ausmündung der in der Gewölbehintermauerung hergestellten Wasserschlitzte ist annähernd in Kämpferhöhe anzuordnen; im Widerlager sind die Wasserschlitzte entsprechend den örtlichen Verhältnissen herzustellen.“ [48]

Im Schuttkegel des Hierkaarbaches sind folgende Entwässerungselemente vorhanden:

- Trockenschichtung
- Wellblechabdeckungen
- Entwässerungsschlitzte alle 2 m
- Sohlenkanal [49]

Kaponigtunnel

Im Zuge des zweigleisigen Ausbaus der Tauernbahn ist auf der Südrampe der Kaponigtunnel hergestellt worden. Im Ausführungsplan von 1996 ist der Regelquerschnitt mit Sohlgewölbe dargestellt. Die Ausbruchslaibung wird mit Spritzbeton gesichert. Zusätzliche Sicherungselemente wie Ausbaubögen oder Anker sind nicht auf dem Plan eingezeichnet. Bei Herstellung des Innenausbaus wird nach der Betonage des Widerlagers die Ulmendrainage (DN 250mm) beiderseitig verlegt. Diese ist auf einem Mörtelbett gebettet und der Bereich darüber ist mit Filterbeton aufgefüllt. Auf die Außenschale wird das Abdichtungssystem bestehend aus Folie und Vlies angebracht. Anschließend erfolgt die Betonage des Innengewölbes. Im Füllbeton oberhalb des Sohlengewölbes befinden sich folgende Rohrleitungen: [50]

- Sohl drainage (DN 250mm)
- PVC-Rohr (DN 250 mm)
- Sohlkanal (DN 250 mm)

Im Bereich der Ulmendrainage werden in der Spritzbetonaußenschale Entspannungslöcher gebohrt (1 Stk./lfm). [50]

6.2 Darstellung der Entwicklung der Entwässerungssysteme

Im Folgenden werden verschiedene Tunnels einer Bahnstrecke einander gegenübergestellt.

Der Vergleich zwischen Altem und Neuem Semmeringtunnel auf der Bestandsstrecke der Semmeringbahn zeigt, dass sich einige Aspekte des Tunnelbaus und der daraus folgenden Baumaßnahmen zur Entwässerung grundlegend unterscheiden. (siehe Tabelle 1)

Vergleich Alter und Neuer Semmeringtunnel	
Alter Semmering Haupttunnel	Neuer Semmeringtunnel
Jahr ca. 1853	Jahr ca. 1952
Länge ca. 1430 m	Länge ca. 1512 m
dachförmiges Längenprofil	dachförmiges Längenprofil
Steigung beiderseitig 3,33 ‰	Steigung beiderseitig 4 ‰
9 Förderschächte	keine Förderschächte
10 Durchschläge	1 Durchschlag
Pumpenvorrichtung zum Wasserheben	Wasserkanal während des Vortriebes
mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	seitlicher Entwässerungskanal mit Abdeckplatte
Baustoffe Bruchstein, Ziegel	Baustoffe Beton, Granitsteine
keine Abdichtung	Isolierung
keine Entwässerungstollen	keine Entwässerungstollen

Tabelle 1: Vergleich Alter und Neuer Semmeringtunnel

Auch der Vergleich zwischen dem Berg-Isel Tunnel und Münsterertunnel zeigt wesentliche Unterschiede in der Herstellung des Tunnelbauwerkes auf. (siehe Tabelle 2)

Vergleich Berg-Isel Tunnel und Münsterertunnel	
Berg-Isel Tunnel	Münsterertunnel
Jahr ca. 1864	Jahr ca. 2012
Länge ca. 660 m	Länge ca. 15.990 m
schräges Längenprofil	w-förmiges Längenprofil
Steigung 25 ‰ (Richtung S)	-10,917; 2,5; -3,358; -9,200; 4,805; -8,000; 4,000, 12,500 ‰ (O-W)
keine Förderschächte	Förderschächte, Rettungsschächte, Rettungsstollen
mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	Tunnelhauptentwässerung u. Ulmendrainage bzw. Sohl drainage
Baustoffe Bruchstein, Ziegel	Baustoffe Spritzbeton, Sicherungselemente aus Stahl, Zementsuspension, Ortbeton, Kunststoffe, Bewehrung bzw. Tübbing-Betonfertigteile, Stahlbögen, Bewehrung, Kunststoffe, Faserbeton
keine Abdichtung	Regenschirmabdichtung bzw. druckdichte Tübbingaußenschale
keine Entwässerungsstollen	keine Entwässerungsstollen

Tabelle 2: Vergleich Berg-Isel-Tunnel und Münsterertunnel

Weiters werden der Arlbergtunnel und der Zammertunnel der Arlbergbahn einander gegenübergestellt. (siehe Tabelle 3)

Vergleich Arlbergtunnel und Zammertunnel	
Arlbergtunnel	Zammertunnel
Jahr ca. 1880	Jahr ca. 1999
Länge ca. 10.248 m	Länge ca. 2.335 m
dachförmiges Längenprofil	schräges Längenprofil
Steigung 2 ‰, Gefälle 15 ‰ (Richtung W)	Steigung 7,58 ‰ (Richtung W)
keine Förderschächte	keine Förderschächte
mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	Ulmendrainage beiderseitig
Baustoffe Bruchstein, Ziegel, Steinschichtung	Baustoffe Spritzbeton, Sicherungselemente aus Stahl, Zementsuspension, Ortbeton, Kunststoffe, Bewehrung
keine Abdichtung	Regenschirmabdichtung aus Folie und Vlies
seitliche Entwässerungsstollen	keine Entwässerungsstollen

Tabelle 3: Vergleich Arlbergtunnel und Zammertunnel

Auch die Gegenüberstellung von Tauerntunnel und Kaponigtunnel der Tauernbahn zeigt große Unterschiede in der Herstellung der Tunnelbauwerke auf. (siehe Tabelle 4)

Vergleich Tauerntunnel und Kaponigtunnel	
Tauerntunnel	Kaponigtunnel
Jahr ca. 1908	Jahr ca. 1996
Länge ca. 8.526 m	Länge ca. 5.096 m
dachförmiges Längenprofil	schräges Längenprofil
Steigung 10,0 ‰, Gefälle 2 ‰ (Richtung S)	(Keine Angabe)
keine Förderschächte	keine Förderschächte
mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	Ulmendrainage beiderseitig, Sohl- drainage und Sohlkanal seitlich
Baustoffe Bruchstein, Ziegel, Steinschichtung	Baustoffe Spritzbeton, Sicherungselemente aus Stahl, Zementsuspension, Ortbeton, Kunststoffe, Bewehrung
Wellblechabdeckungen	Regenschirmabdichtung aus Folie und Vlies
seitliche Entwässerungsstollen	keine Entwässerungsstollen

Tabelle 4: Vergleich Tauerntunnel und Kaponigtunnel

Schließlich werden die 8 ausgewählten Tunnelbauwerke chronologisch gegenübergestellt. (siehe Tabelle 5)

Tabelle 5: Chronologischer Vergleich der ausgewählten gegenübergestellten Tunnelbauwerke

Alter Semmering-Haupttunnel	Berg-Isel-Tunnel	Arlbergtunnel	Tauerntunnel	Neuer Semmeringtunnel	Kaponigtunnel	Zammertunnel	Münsterertunnel
Jahr ca. 1853	Jahr ca. 1864	Jahr ca. 1880	Jahr ca. 1908	Jahr ca. 1952	Jahr ca. 1996	Jahr ca. 1999	Jahr ca. 2012
Länge ca. 1430 m	Länge ca. 660 m	Länge ca. 10.248 m	Länge ca. 8.526 m	Länge ca. 1512 m	Länge ca. 5.096 m	Länge ca. 2.335 m	Länge ca. 15.990 m
dachförmiges Längenprofil	schräges Längenprofil	dachförmiges Längenprofil	dachförmiges Längenprofil	dachförmiges Längenprofil	schräges Längenprofil	schräges Längenprofil	w-förmiges Längenprofil
Steigung beiderseitig 3,33 ‰	Steigung 25 ‰ (Richtung S)	Steigung 2 ‰, Gefälle 15 ‰ (Richtung W)	Steigung 10,0 ‰, Gefälle 2 ‰ (Richtung S)	Steigung beiderseitig 4 ‰	k.A.	Steigung 7,58 ‰ (Richtung W)	-10,917; 2,5; -3,358; -9,200; 4,805; -8,000; 4,000, 12,500 ‰ (O-W)
9 Förderschächte	keine Förderschächte	keine Förderschächte	keine Förderschächte	keine Förderschächte	keine Förderschächte	keine Förderschächte	Förderschächte, Rettungsschächte, Rettungstollen
mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	seitlicher Entwässerungskanal mit Abdeckplatte	Ulmendrainage beiderseitig, Sohl- drainage beiderseitig	Ulmendrainage beiderseitig	Tunnelhauptentwässerung, Ulmendrainage beiderseitig bzw. Sohl- drainage
Baustoffe Bruchstein, Ziegel	Baustoffe Bruchstein, Ziegel	Baustoffe Bruchstein, Ziegel, Steinschichtung	Baustoffe Bruchstein, Ziegel, Steinschichtung	Baustoffe Beton, Granitsteine	Baustoffe Spritzbeton, Sicherungselemente aus Stahl, Zementsuspension, Ort- beton, Kunststoffe, Bewehrung	Baustoffe Spritzbeton, Sicherungselemente aus Stahl, Zementsuspension, Ort- beton, Kunststoffe, Bewehrung	Baustoffe Spritzbeton, Sicherungselemente aus Stahl, Zementsuspension, Ort- beton, Kunststoffe, Bewehrung bzw. Tübbing- Betonfertigteile, Stahlbögen, Bewehrung, Kunststoffe, Faserbeton
keine Abdichtung	keine Abdichtung	keine Abdichtung	Wellblechabdeckungen	Isolierung	Regenschirmabdichtung aus Folie und Vlies	Regenschirmabdichtung aus Folie und Vlies	Regenschirmabdichtung bzw. druckdichte Tübbingaußenschale
keine Entwässerungstollen	keine Entwässerungstollen	seitliche Entwässerungstollen	seitliche Entwässerungstollen	keine Entwässerungstollen	keine Entwässerungstollen	keine Entwässerungstollen	keine Entwässerungstollen

Der einheitliche Erhebungsstandard der Bauwerksdrainagen der TFD umfasst verschiedene in Abb. 5 präsentierte Aspekte. Sie werden im vorangehenden chronologischen Vergleich der Tunnelbauwerke berücksichtigt und im Folgenden näher erläutert.

Jahr

Mit dem Beginn des Baues der ersten Gebirgsbahnen in Europa sind auch die ersten Eisenbahntunnels hergestellt worden. Der Bau von Eisenbahnstrecken hat auch natürlich mit der Entwicklung der Lokomotiven zusammengehungen. Die 2. Eisenbahnverbindung nach Triest mit den 4 langen Alpentunnels Bosrucktunnel, Tauernntunnel, Karawankentunnel und Wocheinertunnel ist die letzte Errungenschaft im Bau von Eisenbahntunneln der alt-österreichischen Monarchie gewesen.

Zu Beginn der 2. Republik ist der Neue Semmeringtunnel gebaut worden. Der Tunnel unterscheidet sich grundlegend von den vorherigen Tunnelbauten.

Länge

Mit einer Länge über 10 km ist der Arlbergtunnel bereits seit ca. 1880 einer der längsten Tunnels Österreichs. Der Münsterertunnel in Tirol mit knapp 16 km Länge ist derzeit der längste Tunnel Österreichs. Nicht zu vergessen sind die derzeit in Bau befindlichen Basistunnels in Österreich, die zu noch längeren Tunneln führen werden.

Längenprofil

Das Längenprofil hängt in erster Linie von der Topographie des Geländes ab. Bei der Durchörterung der Spitze eines Gebirges ist meist ein dachförmiges Längenprofil vorhanden. Auf den Rampen zum Haupttunnel sind meist schräge Tunnellängenprofile entstanden. Eine Besonderheit ist der Münsterertunnel im Unterinntal, der ein w-förmiges Längenprofil aufweist.

Steigung

Die gewählte Steigung eines Eisenbahntunnels hängt von dem gewählten Längenprofil ab. Beim Bau der Semmeringbahn ist die größte Steigung 25 ‰ gewesen, die die damaligen Dampflokomotiven gerade noch bewältigt haben. So weisen auch einige Tunnelbauwerke eine Steigung von 25 ‰ auf. Hingegen hat die geringe Steigung von 3,33 ‰ im Alten Semmering Haupttunnel vor allem der Entwässerung des Tunnels gedient.

Förderschächte

Die Förderschächte haben einen vielseitigen Nutzen für den Tunnelbau. Der Förderschacht dient in erster Linie der Förderung von Ausbruchsmaterial, aber auch der Förderung von zutretendem Bergwasser während des Vortriebes. Bei längeren Tunneln verkürzt ein Förderschacht die Bauzeit. Immer wichtiger werden Rettungszugänge beim Tunnel, die auch zur Ableitung von Leckagewasser oder Störfallwasser herangezogen werden.

Entwässerungssystem

Das Entwässerungssystem hat sich in der Entwicklung der Eisenbahntunnels stark erweitert. Anfangs ist ein mittiger Sohlenkanal ausreichend gewesen. Das zutretende Bergwasser ist über die Steinschichtung hinter der Gewölbemauerung nach unten gesickert und über Entwässerungsschlitze nach innen zum Sohlenkanal abgeleitet worden. Solche Tunnels sind auch heute noch in Verwendung.

Beim Neuen Semmeringtunnel ist der Entwässerungskanal seitlich gebaut worden. Die Sohle unter dem Schotterbett weist ein Gefälle hin zum Kanal auf.

Bei den neueren Tunneln, wie der Kaponigtunnel oder der Zammertunnel, sind auf beiden Seiten Ulmendrainagen zwischen Spritzbeton-Außenschale und Ortbeton-Innenschale verlegt worden.

Beim Münsterertunnel ist im drainierten Bereich zusätzlich eine Tunnelhauptentwässerung gebaut worden. Im druckwasserhaltenden Bereich im konventionellen Vortrieb, wo die Abdichtung auch in der Sohle verlegt worden ist, entfallen die Ulmendrainagen.

Im Schildvortrieb beim Münsterertunnel ist schließlich eine druckdichte Tübbing-Außenschale hergestellt worden. Die Sohl drainage dient hier, wie bereits erwähnt, der Ableitung von Leckagewasser.

Baustoffe

Die Baustoffe im 19. Jahrhundert sind vor allem Bruchsteine und Ziegel gewesen. Auch Mörtel und eine Steinschichtung sind eingesetzt worden.

Im Neuen Semmeringtunnel sind das Gewölbe, die Widerlager und das Sohlgewölbe in Beton hergestellt worden. Die Innenverkleidung besteht aus Granitsteinen.

Die klassischen Baustoffe bei den neueren Tunneln im konventionellen Tunnelbau nach der NÖT sind:

- Spritzbeton

- Stahlelemente wie z.B. Ausbaubögen, Anker, Spieße, Rohrschirm
- Zementsuspensionen
- Betone wie z.B. Ortbeton, Filterbeton, Faserbeton
- Kunststoffe wie z.B. Noppenbahnen, Kunststoffrohre, Folien, Fugenbänder
- Bewehrung wie z.B. Mattenbewehrung, Stabstahl

Beim Schildvortrieb mit einer Tübbingaußenschale und einer Brandschutzinnenschale werden folgende Baustoffe eingesetzt:

- Tübbing-Stahlbetonfertigteile
- Stahlverschraubungen
- Hartgummibänder
- Betone wie z.B. Faserbeton
- Kunststoffe wie z.B. Kunststoffrohrleitungen, Folien
- Bewehrung wie z.B. Spannbögen, Mattenbewehrung
- Erdungsstahlbänder

Abdichtung

Im 19. Jahrhundert ist anfangs keine Abdichtung eingesetzt worden. Dies hat oftmals zu Eisbildung und zur Zerstörung des Mauerwerks geführt. Beim Bau des Tauerntunnels sind Wellblechabdeckungen im Gewölbebereich verwendet worden. Beim Neuen Semmeringtunnel ist das Gewölbe und das Widerlager mit einer Folie isoliert worden.

Schließlich wird ein Abdichtungssystem aus Folie und Vlies als Regenschirmabdichtung im drainierten, also druckwasserentlastenden Bereich, eingesetzt.

Das Abdichtungssystem kann auch zusätzlich in der Sohle verlegt werden, sodass der Tunnel druckwasserhaltend gebaut wird. Auch eine Tübbingaußenschale ist druckwasserhaltend.

Entwässerungstollen

Entwässerungstollen sind im 19. Jahrhundert oftmals gebaut worden, um den Wasserdruck im Ausbruchsbereich fernzuhalten. Auch Seitenstollen zur Bergwasserableitung ins Freie sind hergestellt worden. Beim Leitersbergtunnel haben die Entwässerungsschlitze und-schächte auch die Oberfläche erreicht.

Versinterungen

Versinterungen haben schon immer ein Problem dargestellt, wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung.

Beim Alten Semmering Haupttunnel haben die unvermeidbaren Wasserzutritte zu Eisbildung und zur Zerstörung des Mauerwerks geführt (siehe Abbildung 11). [30]



Abb. 11: Eissäulen und Bodeneis im Alten Semmering Haupttunnel [30]

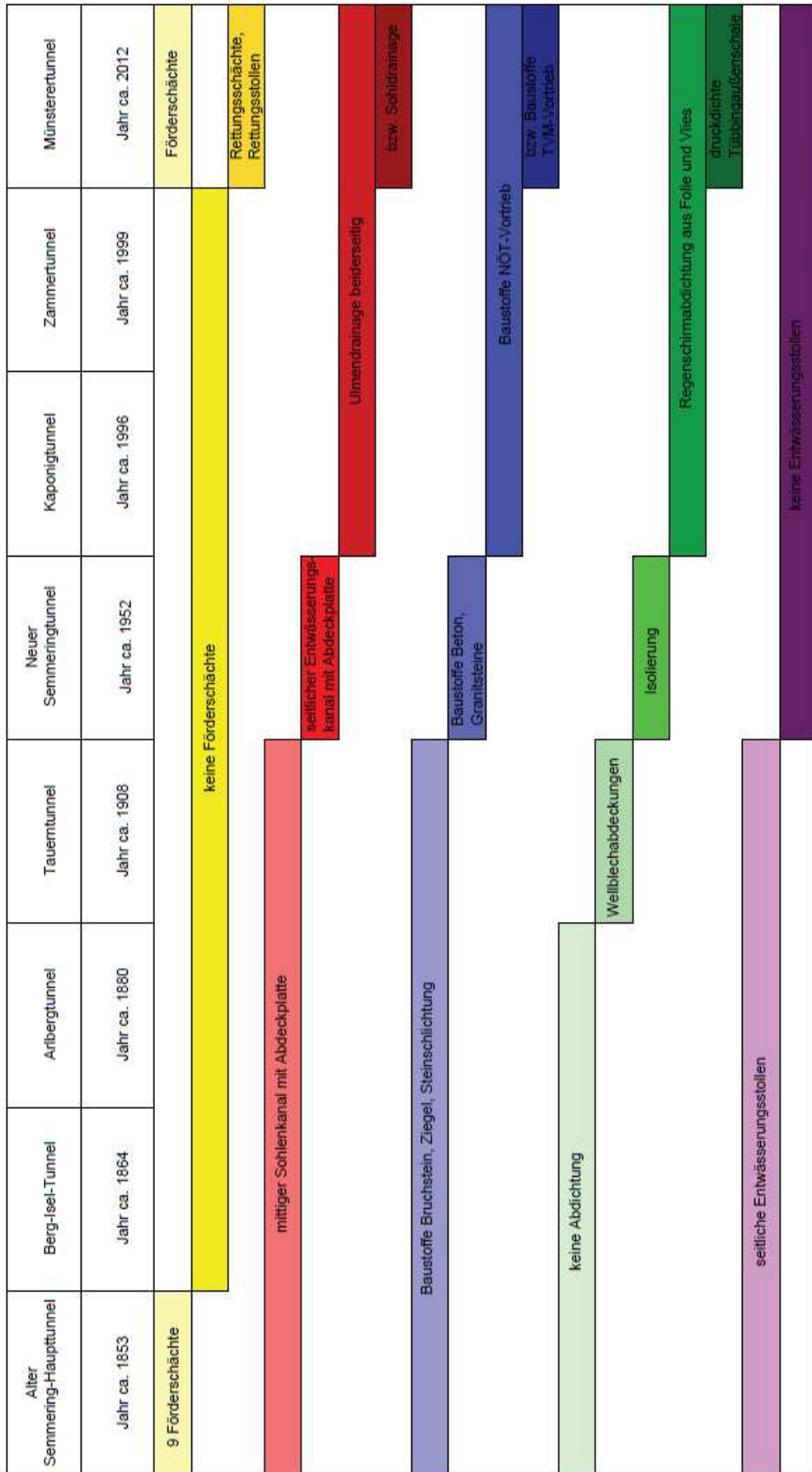
Nach der Fertigstellung des Neuen Semmeringtunnels 1952 sind auf der Innenverkleidung nasse Stellen und weiße Sinterfahnen dokumentiert worden. [51]

Beim Zammertunnel der Arlbergbahn sind harte Ablagerungen aufgrund von Versinterungen in den Ulmendrainagen festgestellt worden, die zu Verklausungen und Schäden an den Rohren geführt haben (siehe Abbildung 12). [52]



Abb. 12: Verklausungen der Ulmendrainage im Zammertunnel [52]

Die verschiedenen Aspekte im Vergleich der Tunnelbauwerke werden in einem Zeitbalken-Diagramm dargestellt. (siehe Abbildung 13)



gez. David Gusenbauer, 08.08.2019

Abb. 13: Zeitbalken-Diagramm im chronologischen Vergleich der Tunnelbauwerke

Das Entwässerungssystem vom Bau des Arlbergtunnels 1880, vom Bau des Tauerntunnels 1908, vom Umbau des Alten Semmering Haupttunnels und dem Bau des Neuen Semmeringtunnels 1952 und vom Bau des Zammertunnels 1999 werden in eigens gezeichneten Längenschnitten dargestellt. (siehe Anhang I)

6.3 Skizzierung der Fortentwicklung von Entwässerungssystemen

Damit ein zukünftiges Entwässerungssystem in Tunnelbauwerken überhaupt gebaut wird, ist die Planung und Bauausführung des Entwässerungssystems erforderlich. (siehe Kapitel 2)

Die Fortentwicklung des Entwässerungssystems in Eisenbahntunneln steht folglich unter der Prämisse der wirtschaftlichen Optimierung. Zur Kostensenkung sind optimierte Entwässerungssysteme untersucht worden. (siehe Kapitel 3)

Die Untersuchungen zur Bildung von Versinterungen in Tunnel drainagen sind dargestellt worden. (siehe Kapitel 3)

Die aufgestellten Hypothesen der vorliegenden Arbeit verfolgen das Ziel, durch Erhebung historischer Bestände des Staatsarchivs zur Verminderung der Versinterungsproblematik in Tunnel drainagen beizutragen und die Planung eines funktionierenden, wartungsarmen Entwässerungssystems zu unterstützen. (siehe Kapitel 4)

Analysen der Tunnelwässer und der Materialien sind auch im 19. Jahrhundert durchgeführt worden. Sie beziehen die Relevanz des in der Luft des Tunnels vorhandenen Kohlendioxids für den Chemismus des Drainagewassers ein und legen eine äußerst komplexe Wechselwirkung zwischen den atmosphärischen Bedingungen und den abgeleiteten Wässern des Tunnelbauwerks dar. Aus ihnen erschließen sich die in der Planung zu berücksichtigenden Aspekte für wartungsarme Entwässerungssysteme.

Der Grund der Untersuchungen sind allerdings nicht versinterte Tunnel drainagen gewesen, sondern die Rauchgase der Dampflokomotiven. Im Vordergrund ist der Schutz der Gesundheit der Tunnelarbeiter gestanden. In diesem Zusammenhang ist auch der Ventilation des Tunnels große Bedeutung zugeteilt worden. [53]

Bei den Untersuchungen zu den Rauchverhältnissen im Arlbergtunnel ist im Jahre 1896 folgende Erkenntnis gewonnen worden:

„Der Umstand, dass sich während der ersten 6 Jahre des Tunnelbetriebes Störungen nicht ergeben haben, war ebenfalls Gegenstand eingehender Untersuchungen, deren Ergebnisse zur Annahme berechtigten, dass sowohl das Schottermateriale des

Oberbaues, als auch hauptsächlich der Mauerwerkskörper des Tunnels in der ersten Zeit eine gewisse Absorptionsfähigkeit für alle jene Theile [sic!] der Verbrennungsprodukte hatten, welche zumeist schädlich auf den menschlichen Organismus wirken.“ [53]

Die erstellten Gutachten über die Luftuntersuchungen im Arlbergtunnel haben den Zweck verfolgt, einerseits die Luftverhältnisse im Arlbergtunnel auch in hygienischer Hinsicht günstig zu halten, andererseits das im Tunnel vorhandene Eisen und Holzmaterial vor weiteren rapiden Zerstörungen zu schützen. [54]

Zu erwähnen ist, dass die in der Tunnelluft enthaltene Kohlensäure durch den sich kondensierenden Lokomotivdampf und die feuchten Tunnelwände absorbiert worden ist und den Tunnel als kohlensäurehaltiges Wasser verlassen hat. Dies haben auch Analysen des Arlbergtunnelwassers bestätigt. [54]

Die Anmerkung über eine gewisse Absorptionsfähigkeit der Materialien ist insofern von Bedeutung, da sich die Frage stellt, welche chemische Reaktion dahintersteht. Zu diesem Zweck werden die damaligen Analysen zum Gutachten über die Luftuntersuchungen im Arlbergtunnel herangezogen (siehe Anhang J). [54]

Für das Bruchsteinmauerwerk sind die plattenförmig brechenden, quarzreichen Glimmerschiefer und die lagerhaften Kalksteine der Umgebung des Arlberges unter Anwendung eines Zementmörtels verwendet worden. [53]

Die Wasserproben der durchgeführten Wasseranalysen sind einerseits von der Tunnelwand (Wasser Nr. 1) und andererseits vom Tunnelkanal (Wasser Nr. 2) entnommen worden. Auch das Eisenmaterial, der Zement, die Rauchgase und die Luft aus dem Arlbergtunnel sind untersucht worden. [54]

Die Kohlensäure ist in allen Medien bis auf die Luft nachgewiesen worden, welche allerdings an einem sehr günstigen Tag entnommen worden ist. [54]

In beiden Wasserproben wird, wie bereits erwähnt, Kohlensäure mitgeführt – sowohl in gebundener (HCO_3^- und CO_3^{2-}) als auch in freier Form (CO_2 und H_2CO_3). Die Frage lautet, ob das Wasser im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht steht, untersättigt oder übersättigt ist.

Schon im Jahr 1912 ist ein Zusammenhang für das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ermittelt worden, welcher eine Abschätzung darstellt. [55]

Das gebundene und freie CO_2 einer Wasserprobe ist direkt vom pH-Wert abhängig (siehe Abbildung 14). [56]

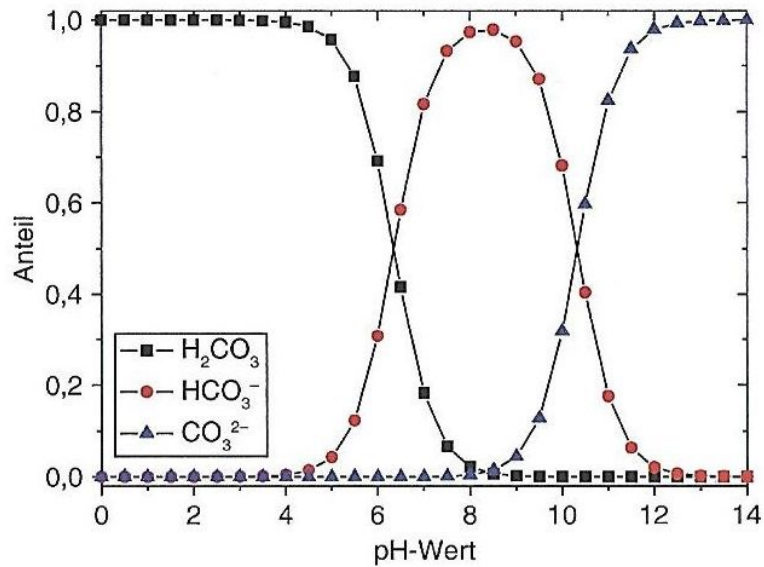
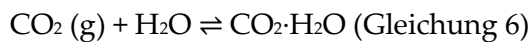


Abb. 14: Anteil der Kohlensäure (H_2CO_3^*), des Hydrogencarbonats (HCO_3^-) und des Carbonations (CO_3^{2-}) in einer Wasserprobe in Abhängigkeit des pH-Wertes [56]

Bei pH-Werten unterhalb von 4,3 ist ausschließlich die Kohlensäure vorhanden. Zwischen den pH-Werten 4,3 und 8,2 treten sowohl die Kohlensäure als auch das Hydrogencarbonat im Wasser auf. Carbonat-Ionen entstehen erst ab einem pH-Wert von 8,2. [56]

Die Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtsreaktion in deszendendem Bergwasser wird durch folgende Gleichungen näher erläutert: [11]

- 1.) Physikalische Absorption von Kohlendioxid in Wasser:



- 2.) Hydratation des absorbierten Kohlendioxids zu Kohlensäure (echte Kohlensäure):



- 3.) Dissoziation der Kohlensäure in Hydrogencarbonat-Ionen und Protonen

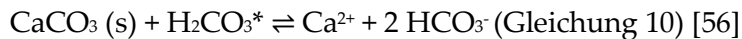


- 4.) Dissoziation der Hydrogencarbonat-Ionen in Carbonat-Ionen und Protonen

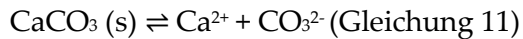


Bei Standardbedingungen ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 1 \text{ atm}$) reagieren ca. 0,2 % des gelösten Kohlendioxids zu echter Kohlensäure (H_2CO_3). Ca. 99,8 % des gelösten Kohlendioxids liegen molekular absorbiert in der Lösung vor ($\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Beides zusammen wird als Gesamt-Kohlensäure (H_2CO_3^*) bezeichnet. [11]

5.) Auflösung von Calcit in kohlendioxidhaltigem Wasser



6.) Dissoziation von Calciumcarbonat zu Calcium- und Carbonat-Ionen (geringe Löslichkeit in wässriger Lösung)



Die Gleichungen 6 bis 11 stellen Gleichgewichtsreaktionen dar, welche auch in die umgekehrte Richtung ablaufen können. Zusätzlich werden außerdem Calcium-Komplexe gebildet. Der Ablauf der chemischen Reaktionen hängt von den Reaktionsbedingungen ab. [11]

Der Ablauf chemischer Reaktionen wird von folgenden Faktoren beeinflusst: [7]

- Temperatur
- Konzentration der Reaktionspartner
- Druck
- Oberfläche der Reaktionspartner
- Katalyse

Die im Bergwasser gelösten Calcium-Ionen und weiteren Ionen der Erdalkalielemente verursachen die Gesamthärte des Wassers. [7]

Heute werden die Wasserproben gemäß anerkannten Methoden der Wasseranalytik und anhand von Normen auf folgende Parameter zur Feststellung der Versinterungsneigung analysiert: [6]

- Temperatur an der Entnahmestelle
- pH-Wert an der Entnahmestelle
- elektrische Leitfähigkeit
- Gesamthärte
- Carbonathärte
- Calcitsättigung
- Marmorlöseversuch
- Wassermenge an der Entnahmestelle
- Zusätzlich für Betonangriff: Ammonium (NH_4^+)

Wünschenswert ist ein Tunnelwasser, dass sich im Gleichgewicht befindet, sodass es weder untersättigt – also nicht kalkaggressiv –, noch übersättigt – also nicht kalkabscheidend – ist.

Eine Säure enthält in wässriger Lösung H^+ -Ionen und eine Base enthält in wässriger Lösung OH^- -Ionen. Damit kann der pH-Wert einer anderen wässrigen Lösung

erniedrigt oder erhöht werden – in Abhängigkeit von den Reaktionsbedingungen und den weiteren vorhandenen Ionen. Enthält die Lösung Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3^-) oder Carbonat-Ionen (CO_3^{2-}), kann durch Zugabe einer Säure der pH-Wert gesenkt werden – solange, bis nur mehr freie Kohlensäure vorhanden ist.

Durch Zugabe einer Base hingegen wird der pH-Wert erhöht. Die freie Kohlensäure wird in Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3^-) überführt und diese werden weiter in Carbonat-Ionen (CO_3^{2-}) umgewandelt.

Die Anteile der Kohlensäurespezies ändern sich gemäß Abbildung 14.

In diesem Zusammenhang sei auf die pH-Pufferung der Kohlensäurespezies hingewiesen, die im Bereich der beiden Säurekonstanten pK_1 und pK_2 im pH-Bereich um 6,3 und um 10,3 ihr Maximum aufweist. Kommt es in diesem Bereich zu einem geringen Säure- oder Baseeintrag, so verändert sich der pH-Wert nur geringfügig. [56]

Der Kontakt des Bergwassers mit alkalischen – also basischen – Baustoffen wie Zement entspricht der Zugabe einer Base (OH^- -Ionen). Dadurch können, wie bereits erwähnt, bei hohen pH-Werten Carbonat-Ionen (CO_3^{2-}) entstehen. Gemeinsam mit den im Wasser enthaltenden Calcium-Ionen (Ca^{2+}) kann bei Überschreiten des Löslichkeitsproduktes das feste Calciumcarbonat (CaCO_3) abgeschieden werden.

Auch beim Erwärmen des Wassers entweicht CO_2 , sodass die H^+ -Konzentration sinkt und in weiterer Folge bei Überschreitung des Löslichkeitsproduktes das Calciumcarbonat ausfällt. [7]

In der Wasseraufbereitung wird das Wasser absichtlich entsäuert, wenn dieses kalkaggressiv ist. Dies wird z.B. durch CO_2 -Entgasung erreicht, um das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Wassers zu erreichen. Dabei kommt es zu Filterverblockungen durch Kalkausfällungen. [56]

Zementhaltige Baustoffe, Temperaturerhöhung (z.B. bei der Betonage), Entgasungen und wahrscheinlich noch weitere Bedingungen führen leider zu Ausfällungen von Calciumcarbonat direkt im Entwässerungssystem des Tunnels.

Zur Verhinderung der Calciumcarbonatbildung im Entwässerungssystem können folgende Maßnahmen ergriffen werden: [7]

- Vorheriges Ausfällen von Calciumcarbonat
- Verwendung von Komplexbildnern
- Selektiver Calciumionenaustausch

Dies wird auch im Haushaltsbereich und im Industriebetrieb durchgeführt. [7]

Im Tunnelbau werden ebenso Härtestabilisatoren eingesetzt – in fester oder flüssiger Form. Neben Wasserenthärtern werden auch Kristallisationsinhibitoren verwendet. Dazu zählen die Polyasparaginsäuren, die gut biologisch abbaubar sind. [11]

Was die Zugabe von Kohlensäure selbst bewirkt, hängt von den Reaktionsbedingungen und verschiedenen Szenarien ab. Dazu müssten Versuche durchgeführt werden, die die Reaktionen verschiedener Mischungen von CO₂ – haltigen Wässern (in freier sowie gebundener Form) in Abhängigkeit vom pH-Wert und den Löslichkeitsprodukten beschreiben.

Die Fortentwicklung der Entwässerungssysteme in Tunnelbauwerken wird von den gewählten Strategien abhängen:

- Maximierung versus Minimierung der zutretenden Wassermenge
 - Maximierung: z.B. Entwässerungsstollen
 - Minimierung: z.B. druckdichte Tübbing-Außenschale
- Gezielte versus verminderte Versinterung im Tunnel
 - Gezielte Versinterung: z.B. Entwässerungsstollen
 - Verminderte Versinterung: z.B. Noppenbahnen

7 Beweis der Arbeitshypothesen

7.1 Arbeitshypothese 1

Im Österreichischen Staatsarchiv befinden sich zahlreiche Planarchive, die größtenteils abgeschlossene Sammlungen darstellen. Von Bedeutung ist die Bestandsgruppe „Verkehr“ – sowohl im Allgemeinen Verwaltungsarchiv, als auch im Archiv der Republik. Die historischen Planunterlagen und Schriftstücke werden je Bahnstrecke in Kartons, Akten oder großformatigen Planmappen archiviert. Für den interessierten Leser gibt es eine Vielzahl weiterer Archive und weitere Bahnstrecken, die vom Verfasser nicht eingesehen worden sind. Das Planarchiv der Generalinspektion der österreichischen Eisenbahnen und der Verkehrsministerien wird bis zum heutigen Tag ergänzt. Aufgrund der 30-jährigen Archivsperre eignen sich die letzten 30 Jahre allerdings nicht zur Recherche. Außerdem sind die Unterlagen generell nicht vollständig.

Das Archiv enthält eine große Anzahl der Entwässerungsschemen der untersuchten Tunnels und diese konnten im Literaturverzeichnis referenziert werden. Aus vorhandenen Längenschnitten gehen außerdem die Fließrichtung sowie die Geologie hervor. Die verwendeten Ausbaumaterialien können aus Tunnelquerschnitten ersehen werden. Rückschlüsse auf die Mengen anfallenden Bergwassers während des Vortriebs lassen sich aus den Unterlagen kaum herleiten. Über vorkommende oder nicht auftretende, geschweige denn einen Grad der Versinterung in den Tunnelbauwerken gibt es in den Archivmaterialien keinen Hinweis.

Aus dem Fundus des Staatsarchivs ist daher die Darstellung der Tunnels entsprechend dem Verständnis der TFD von einer adäquaten Darstellung versinterungsrelevanter Parameter und den verfügbaren Materialien gelungen. Sie sind im Anhang ersichtlich.

Die Arbeitshypothese 1 ist teilweise bestätigt.

7.2 Arbeitshypothese 2

Planunterlagen neuerer Tunnelbauwerke sind über den Lehrstuhl für Subsurface Engineering herangezogen worden. Die Auswertung der Datenanalyse zeigt wesentliche Unterschiede in der historischen Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln auf. Auch heute stehen verschiedene

Möglichkeiten betreffend die Wasserhaltung, die Abdichtung, das Entwässerungssystem und die Baustoffe zur Verfügung. Die unterschiedlichen Varianten werden in einem chronologischen Vergleich (Abb. 13) der ausgewählten Tunnelbauwerke gezeigt. Der Entwässerungsstollen, die Steinschichtung hinter der Gewölbemauerung, Entwässerungsschlitze und der Sohlenkanal haben früher eine gezielte Versinterung bei kalkübersättigten Wässern ermöglicht.

Die Arbeitshypothese 2 ist bestätigt.

7.3 Arbeitshypothese 3

Die Fortentwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln wird von den gewählten Strategien abhängen. Dies erfordert eine hohe Flexibilität des Tunnelbaus insgesamt. Die Versinterung ist von zahlreichen zu klärenden Faktoren abhängig.

Die Arbeitshypothese 3 ist teilweise bestätigt.

8 Schluss

Die derzeitige Situation betreffend der Versinterungsproblematik ist die Bildung von Versinterungen direkt im Entwässerungssystem des Tunnels. Neben der natürlichen Versinterung von kalkübersättigtem Wasser führt der Kontakt mit kalkhaltigen Baustoffen zur starken Erhöhung des pH-Wertes des Bergwassers. Dadurch wird das vermehrte Ausfällen des Calciumcarbonates (CaCO_3) verursacht.

Bei einem verschlossenen Entwässerungssystem können beträchtliche Schäden am Tunnelbauwerk entstehen. Mögliche Folge ist, dass der Tunnel nicht mehr drainiert – also nicht mehr druckwasserentlastend ist. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die statischen Bedingungen des Tunnelbauwerkes. Der Tunnel muss in diesem Fall auch dem entstandenen Wasserdruck standhalten. Dies muss in der Statik des Tunnels bereits berücksichtigt werden.

Wenn die Versinterungen sowohl im primären als auch im sekundären Entwässerungssystem nicht verhindert werden können (außer durch kostspielige Adaptionen zur Härtestabilisation), ist es besser, auf das Entwässerungssystem der Bergwässer zu verzichten. Dies entspricht der Strategie der Minimierung der zutretenden Wassermenge. Wasserzutritte können dann z.B. mittels Zement- oder Kunstharzinjektionen, am besten im Vorhinein, gestoppt werden. Hier besteht jedoch die Gefahr, dass das zutretende Wasser lokal nur verdrängt wird und es an anderen Stellen austritt. Falls doch geringe Wasserzutritte befürchtet werden, sorgt eine „Rundumabdichtung“ mittels Folie und Vlies für die Verhinderung der Bergwasserzutritte, jedoch erst nach der Betonage der Innenschale und der Verpressung vorhandener Baudrainagen. Falls auch undichte Stellen der „Rundumabdichtung“ erwartet werden, ist die Ableitung des möglichen Leckagewassers notwendig. Dies gilt in Abhängigkeit der hydrogeologischen Verhältnisse.

Die Strategie der Maximierung der zutretenden Wassermenge z.B. durch Entwässerungstollen darf allerdings nicht vernachlässigt werden, da ein großes Potenzial der Tunnelwassernutzung vorliegt.

9 Zusammenfassung

Im Vordergrund der vorliegenden Arbeit stehen die kritische Auseinandersetzung mit Primärquellen aus dem Österreichischen Staatsarchiv und die übersichtliche Darstellung der Entwicklung der Entwässerungssysteme anhand verschiedener Eisenbahntunnels in Österreich.

Im Zuge der geotechnischen Planung werden die Einflussfaktoren für das Entwässerungssystem bestimmt. Die Entscheidung für die Ausführung der Baumaßnahmen basiert auf der Planung und aller vor Ort gewonnener Informationen und hat zum Ziel, eine sichere und wirtschaftliche Bauausführung zu gewährleisten.

Im Hinblick auf das Entwässerungssystem entstehen allerdings in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Verhältnissen Versinterungen, die die Funktionsfähigkeit des Entwässerungssystems einschränken.

In früheren Untersuchungen ist festgestellt worden, dass die Minimierung des Bergwasserkontaktes mit zementhaltigen Baustoffen die Ablagerungsbildung verringert. Die Bildung von Versinterungen im Entwässerungssystem wird durch verschiedene Versinterungsmechanismen verursacht. Aufgrund der erforderlichen Instandhaltung der Bauwerksdrainagen in Eisenbahntunneln ist eine eigene „Task-Force Drainage“ ins Leben gerufen worden. Im Zuge der Beurteilung von Versinterungsprozessen in Untertagebauten wird ein verstärktes Augenmerk auf das Versinterungsmonitoring gerichtet.

Zur Beantwortung spezieller Fragestellungen werden drei Arbeitshypothesen gebildet:

Arbeitshypothese 1: „Das Österreichische Staatsarchiv in Wien eignet sich als Grundlage zur Recherche über die Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich.“

Arbeitshypothese 2: „Die Darstellung der Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich trägt zur Beseitigung der Versinterungsproblematik in Tunnelndrainagen in Österreich bei.“

Arbeitshypothese 3: „Die Skizzierung der Fortentwicklung von Entwässerungssystemen in Eisenbahntunneln in Österreich unterstützt die Planung eines funktionierenden, wartungsarmen Entwässerungssystems in Tunnelbauwerken in Österreich.“

Die Analyse des Untersuchungsmaterials aus dem Österreichischen Staatsarchiv und vom Lehrstuhl für Subsurface Engineering beginnt mit einer Datenanalyse von Eisenbahntunneln auf den Bahnstrecken „Semmeringbahn“, „Brennerbahn“, „Arlbergbahn“ und „Tauernbahn“.

Die Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich wird in einem chronologischen Vergleich ab dem Jahr 1853 von acht ausgewählten Tunnelbauwerken dargestellt.

Für ausgewählte Tunnels werden Längsschnitte mit versinterungsrelevanten Parametern entsprechend der von der TFD skizzierten Weise angefertigt und können im Anhang eingesehen werden.

Die damalige „Österreichische Tunnelbauweise“ hat den Kontakt mit kalkhaltigen Baustoffen verringert und eine gezielte Versinterung durch folgende Systemelemente der Entwässerung bei verschiedenen Eisenbahntunneln ermöglicht:

- Entwässerungsstollen
- Steinschichtung hinter der Gewölbemauerung
- Entwässerungsschlitze
- Sohlenkanal

Die Fortentwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich wird von den gewählten Strategien abhängen:

- Maximierung versus Minimierung der zutretenden Wassermenge
- Gezielte versus verminderte Versinterung im Tunnel

In diesem Zusammenhang wird der natürlichen Kohlensäure verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet, die schon im Jahr 1896 bei den Untersuchungen über die Rauchverhältnisse im Arlbergtunnel thematisiert worden ist.

Die Analyse des Untersuchungsmaterials zeigt folgende Ergebnisse:

Die **Arbeitshypothese 1** ist teilweise bestätigt.

Die **Arbeitshypothese 2** ist bestätigt.

Die **Arbeitshypothese 3** ist teilweise bestätigt.

Zum Schluss steht die Feststellung, dass es in der derzeitigen Situation in Abhängigkeit der hydrogeologischen Verhältnisse besser ist, einen druckwasserhaltenden Tunnel herzustellen.

Hingegen bietet die Nutzung des Tunnelwassers die Möglichkeit, auf einzelne, bewährte Baumaßnahmen der damaligen „Österreichischen Tunnelbauweise“ zurückzugreifen.

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Abdichtung Eisenbahntunnel früher und heute [8].....	14
Abb. 2:	Leitungsführung Drainagespülsystem am Beispiel des Semmering-Basistunnels [9].....	16
Abb. 3:	Lageplan Entwässerungsstollen des Bosruck-Eisenbahntunnels [10].....	17
Abb. 4:	Beispiel für harte Ablagerungen im Drainagerohr [6].....	19
Abb.5:	Beispiel Längenschnitt für die Planung der Probenahme aus Bauwerksdrainagen [12]	20
Abb. 6:	Oberhasli-Ableitungen beim Umbau des Alten Semmeringtunnels [31] .	37
Abb. 7:	Sohlenkanal St. Jodock- Tunnel [36].....	38
Abb. 8:	H2-1 Haupttunnel Anhydritbereich – drainiert [37].....	40
Abb. 9:	Verlegung der Sohl drainage für Leckagewasser, Quelle: ÖBA H3-4.....	40
Abb. 10:	H3-4 Haupttunnel – druckdicht [37]	41
Abb. 11:	Eissäulen und Bodeneis im Alten Semmering Haupttunnel [30].....	53
Abb. 12:	Verkläusungen der Ulmendrainage im Zammertunnel [52]	53
Abb. 13:	Zeitbalken-Diagramm im chronologischen Vergleich der Tunnelbauwerke	54
Abb. 14:	Anteil der Kohlensäure (H_2CO_3^*), des Hydrogencarbonats (HCO_3^-) und des Carbonations (CO_3^{2-}) in einer Wasserprobe in Abhängigkeit des pH-Wertes [56].....	57

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich Alter und Neuer Semmeringtunnel	45
Tabelle 2: Vergleich Berg-Isel-Tunnel und Münsterertunnel.....	46
Tabelle 3: Vergleich Arlbergtunnel und Zammertunnel	47
Tabelle 4: Vergleich Tauerntunnel und Kaponigtunnel	48
Tabelle 5: Chronologischer Vergleich der ausgewählten gegenübergestellten Tunnelbauwerke	49

12 Literaturverzeichnis

- [1] Eco, Umberto: Wie man eine wissenschaftliche Abschlußarbeit schreibt. Doktor-, Diplom- und Magisterarbeit in den Geistes- und Sozialwissenschaften. Ins Deutsche übersetzt von Walter Schick, Wien, Facultas, 13. Auflage, 2010.
- [2] Karmasin, Matthias/ Ribing, Rainer: Die Gestaltung wissenschaftlicher Arbeiten. Ein Leitfaden für Facharbeit/VWA, Seminararbeiten, Bachelor-, Master-, Magister- und Diplomarbeiten sowie Dissertationen, Wien, Facultas, 9.Auflage, 2017.
- [3] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (Hrsg.): Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb. Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung, Salzburg, ÖGG, 2. Auflage, 2008.
- [4] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (Hrsg.): Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb. Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung, Salzburg, ÖGG, 2013.
- [5] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (Hrsg.): Ermittlung geologisch-geotechnischer Grundlagen für die Planung tiefliegender Tunnel. Leitfaden, Salzburg, ÖGG, 2017.
- [6] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (Hrsg.): Richtlinie Tunnelentwässerung, Wien, ÖVBB, 2010.
- [7] Knoblauch, Harald/ Schneider, Ulrich: Bauchemie, Köln, Werner Verlag, 7. Auflage, 2013.
- [8] Girmscheid, Gerhard/ Gamisch, Tobias/ Meinschmidt, Alfred: Versinterung von Tunneldrainagen – Empfehlungen für die Planung und Bauausführung von Tunneln in deszendenden Wässern, in: Bauingenieur, Band 78, 2003, S. 478-487.
- [9] Wagner, Oliver Kai et al.: Instandhaltungsoptimiertes Entwässerungssystem für den Semmering-Basistunnel neu und Tunnel Pummersdorf, in: Geomechanics and Tunnelling, Nr. 5, 2014, S.626-635.

- [10] Domberger, Gunnar/ Reichl, Peter: Hydrologische Aspekte der Nutzungsmöglichkeiten und wasserwirtschaftliche Bedeutung von Tunnelwasser, in: BHM, 153. Jahrgang, Heft 10, 2008, S.373-379.
- [11] Gamisch, Tobias/ Girmscheid, Gerhard: Versinterungsprobleme in Bauwerksentwässerungen, Berlin, Bauwerk, 2007.
- [12] Schachinger, Tobias et al.: Task-Force Dränagen (TFD) – Das Projekt für das Leben danach, in: Geomechanics and Tunnelling, Nr. 6, 2017, S.779-787.
- [13] Dietzel, Martin et al.: Aktuelle Herausforderungen bei der Versinterung von Tunneldränagen – Modellierungsansätze, Monitoringwerkzeuge und Präventionsstrategien, in: Geomechanics and Tunnelling, Nr. 6, 2013, S.743-753.
- [14] Schachinger, Tobias et al.: Aktuelle Forschungen der ÖBB Infrastruktur-AG zu Versinterungsmonitoring ohne Einschränkung des Eisenbahnbetriebes, in: Geomechanics and Tunnelling, Nr. 3, 2018, S.277-285.
- [15] Österreichisches Staatsarchiv: Archivinformationssystem, online unter URL: <https://www.archivinformationssystem.at/archivplansuche.aspx> [19.02.2019].
- [16] o.V.: Längenprofil über den Baufortschritt des Semmering-Haupttunnels, 1853, in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 74.
- [17] Ghega, Carl v. et al.: Längenprofil des Semmering Haupttunnels, 1848, in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 76.
- [18] o.V.: Pumpenvorrichtung zum Wasserheben aus den Schächten und Tunnel-Räumen während dem Baue des Semmering Haupttunnels, o.J., in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 79.
- [19] Hummitzsch, H. v.: Wasserhubmaschine für den Schacht Nro VII und VIII beim Tunnel Baue am Semmering, o.J., in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 79.
- [20] o.V.: Façade am Semmering-Haupttunnel, 1853, in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 76.
- [21] o.V.: Steinbauer Tunnel, Grundriß und Schnitte, o.J., in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 76.
- [22] Ghega, Carl v. et al.: Tunnel durch die Breitensteiner-Höhe, 1850, in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 76.
- [23] Ghega, Carl v. et al.: Tunnel zwischen beiden Adlitzgräben, 1849, in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 76.

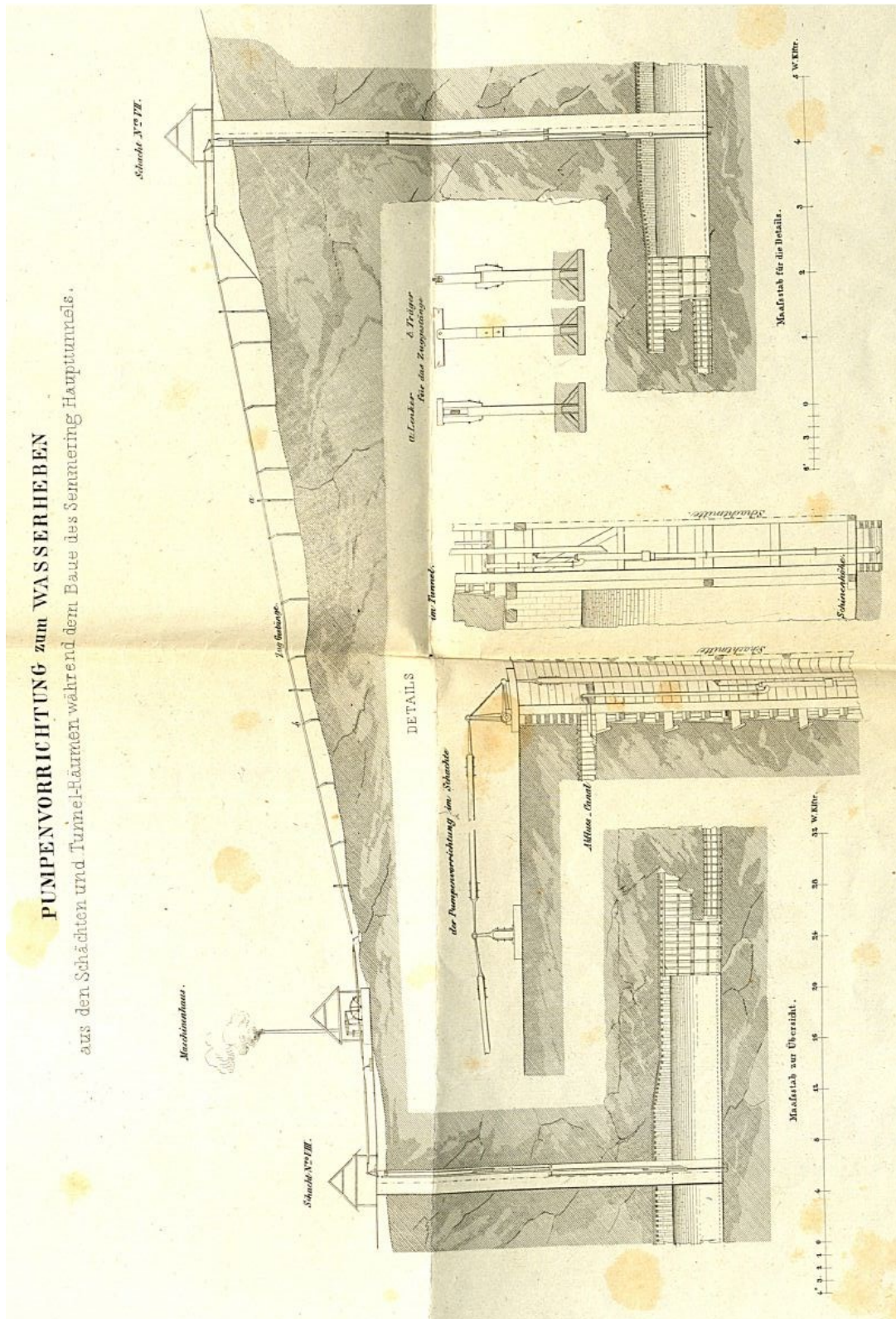
- [24] Ghega, Carl v. et al.: Façaden für den Tunnel durch die Krausel-Wand, 1852, in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 76.
- [25] Ghega, Carl v. et al.: Tunnel durch die Bollers-Wand, 1849, in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 76.
- [26] K.K. Südbahn-Gesellschaft (Hrsg.): General-Längenprofil der Linie Wien-Triest, o.J., in: ÖStA, AdR, Vk, GIuVM, SB, 12574.
- [27] o.V.: Entwässerungsanlage für das südliche Ende des Leitersbergtunnels, 1896, in: ÖStA, AdR, Vk, GIuVM, SB, 21383, 1.ad.
- [28] o.V.: Entwässerungsanlage für das südliche Ende des Leitersbergtunnels, 1904, in: ÖStA, AdR, Vk, GIuVM, SB, 21383, 3.ad.
- [29] Rabcewicz, Ladislaus v.: Gutachten Semmeringtunnel, 1947, in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. neu 222.
- [30] ÖBB (Hrsg.): Der neue Semmeringtunnel. Der größte Investitionsbau der Nachkriegszeit, Wien, Verlag Ployer & Co, 1952.
- [31] ARGE Semmeringtunnel (Hrsg.): Umbau Alter Semmeringtunnel. Typenblatt für Entwässerungsarbeiten, 1953, in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. alt M587.
- [32] K.k. priv. Südbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Längenprofil. I. Loos, 1864, in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. neu 199.
- [33] o.V.: Abrechnung. Diverse Pläne. I. Loos, o.J., in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. neu 199.
- [34] K.k. priv. Südbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Kostenvoranschlag. II. Loos. Tunnel Nr.3 an d. Mühlthalerlehne, 1868, in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. alt 539.
- [35] K.k. pr. südl. Staats-, lomb.-venet. und central-italien. Eisenbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Kostenvoranschlag. Loos IV. Tunnel Nr. 1 bei St. Jodock, 1865, in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. alt 548.
- [36] K.k. priv. Südbahn-Gesellschaft (Hrsg.): Kunstbauten. St.Jodok-Tunnel, 1867, in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. alt 548.
- [37] ÖBB Infrastruktur (Hrsg.): Münsterertunnel. R1310.a00. Blockteilungs- & Übersetzungsplan. Entwässerungsplan. P-AF-UE-R1310.a00-030-0001...0019.90-00, Bestandsplan, 2012, in: Lehrstuhl für Subsurface Engineering, MU Leoben.
- [38] K.k. Direction für Staats-Eisenbahnbauten (Hrsg.): Arlbergtunnel, 1880, in: ÖStA, AdR, Vk, GIuVM, STB 2, 7468, 2.ad.

- [39] K.k. Direktion für Staats-Eisenbahnbauten (Hrsg.): Linie Innsbruck-Bludenz. Strecke St. Anton – Langen. Übersichts- Situationsplan u. Längensprofil, 1880, in: ÖStA, AdR, Vk, GIuVM, STB 2, 7719.
- [40] K.k. Direktion für Staats-Eisenbahnbauten (Hrsg.): Arlbergtunnel. Einsteigöffnungen in den Sohlenkanal, 1883, in: ÖStA, AdR, Vk, GIuVM, STB 2, 9905.
- [41] ÖBB Infrastruktur Bau AG (Hrsg.): Strecke Innsbruck-Bludenz. Sicherheitstechnische Nachrüstung Arlbergtunnel. Km 99.500 – Km 110.474. Detailprojekt. Tunnelplanung. Regelplan Bergwasserableitung Mauerwerk in Bereichen mit Spritzbetonversiegelung. 70-TL04-36-050-F01, 2006, in: Lehrstuhl für Subsurface Engineering, MU Leoben.
- [42] K.k. Staatsbahndirektion Innsbruck (Hrsg.): Wildentobeltunnel. Ausfahrtsportal, 1913, in: ÖStA, AdR, Vk, GIuVM, STB 2, 35601.
- [43] K.k. Staatsbahndirektion Innsbruck (Hrsg.): Einmündung des Seitenstollens in den Wildentobeltunnel für eine künstliche Lüftung, 1913, in: ÖStA, AdR, Vk, GIuVM, STB 2, 35601, 1.ad.
- [44] ÖBB (Hrsg.): Zweigleisiger Ausbau Nahverkehr. Ötztal – Landeck. Abschnitt Kronburg – Landeck. Km 67+740,000 – Km 71+356,296. Ausführungsprojekt. Zammertunnel. Tunnelregelquerschnitt mit Sohlgewölbe Masse-Feder-System. 2020-503, 1994, in: Lehrstuhl für Subsurface Engineering, MU Leoben.
- [45] K.k. Eisenbahnbaudirektion (Hrsg.): Linie Klagenfurt (Villach) – Görz – Triest. Karawanken-Tunnel, Nordseite (Rosenbachthal). Übersichts-Lageplan und Längenschnitt, 1902, in: ÖStA, AdR, GIuVM, LBT19, 27341, 19.ad.
- [46] K.k. Eisenbahnbaudirektion (Hrsg.): Tauernbahn. Teilstrecke Gastein – Spittal a. d. Drau. Los 6 und Los 7. Tauerntunnel, Nordseite. Übersichts- Lageplan und Längenschnitt, o.J., in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. neu 66.
- [47] K.k. österreichische Staatsbahnen (Hrsg.): Abrechnungsmaßurkunde Nr. 2 über die Anlage der Entwässerungsstollen in den Ringen Nr. 41 und 43, 1908, in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. neu 88.
- [48] K.k. Eisenbahnbaudirektion (Hrsg.): Tunnelbau-Profile, 1902, in: ÖStA, AdR, Vk, GIuVM, LBT 19, 24915, 38.ad.
- [49] K.k. Eisenbahnbaudirektion (Hrsg.): Entwässerungsanlagen im Schuttkegel des Hierkaarbaches, 1904, in: ÖStA, AdR, Vk, GIuVM, LBT 19, 27029, 36.ad.

- [50] ÖBB (Hrsg.): Projekt zweigleisiger Ausbau der Tauernbahn. Kaponigtunnel. Ausführungsprojekt. Mallnitz – Lindisch. 47.000 – 53.766. Regelquerschnitt mit Sohlgewölbe. 124/2.02, 1996, in: Lehrstuhl für Subsurface Engineering, MU Leoben.
- [51] ÖBB (Hrsg.): Neuer Semmeringtunnel. Aufnahme und bildliche Darstellung von feuchten und nassen Stellen nach dem Stand vom 25. Juli 1952, 1952, in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. neu 224.
- [52] ÖBB Infrastruktur (Hrsg.): Zammertunnel. Spüleinsatz, 2016, in: Lehrstuhl für Subsurface Engineering, MU Leoben.
- [53] K.k. Staatsbahndirection Innsbruck (Hrsg.): Die Arlbergbahn. Denkschrift aus Anlass des zehnjährigen Betriebes 1884 – 1894, Innsbruck, 1896, in: Universitäts- und Landesbibliothek Tirol, Universität Innsbruck.
- [54] Chemisch-Mikroskopisches Laboratorium für medizinische, hygienische und technische Untersuchungen von Dr. M. und Ad. Jolles (Hrsg.): II. Gutachten. Gutachten über die Luftuntersuchungen im Arlbergtunnel, 1891, in: K.k. Staatsbahndirection Innsbruck (Hrsg.): Die Arlbergbahn. Denkschrift aus Anlass des zehnjährigen Betriebes 1884 – 1894, Innsbruck, 1896, Universitäts- und Landesbibliothek Tirol, Universität Innsbruck.
- [55] Tillmanns, J./ Heublein, O.: Über die kohlen-sauren Kalk angreifende Kohlensäure der natürlichen Wässer, Gesundheitsingenieur, Nr. 34, 1912, S. 669-677, zit. nach: Wisotzky, Frank: Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrochemische Modellierung. Grundlagen, Anwendungen und Problemlösungen, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2011.
- [56] Wisotzky, Frank: Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrochemische Modellierung. Grundlagen, Anwendungen und Problemlösungen, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2011.

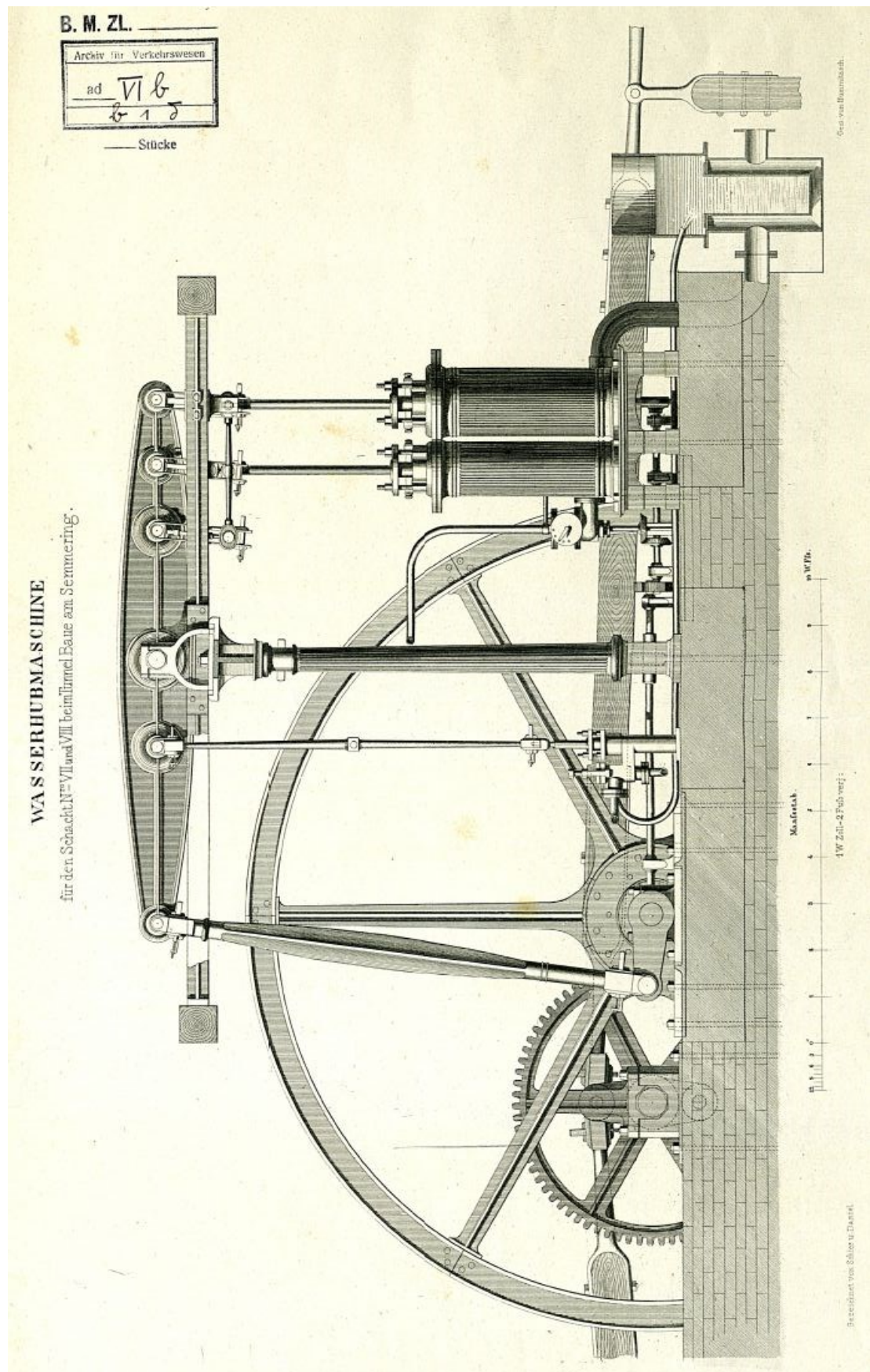
Anhang

A Pumpenvorrichtung zum Wasserheben - Semmering Haupttunnel



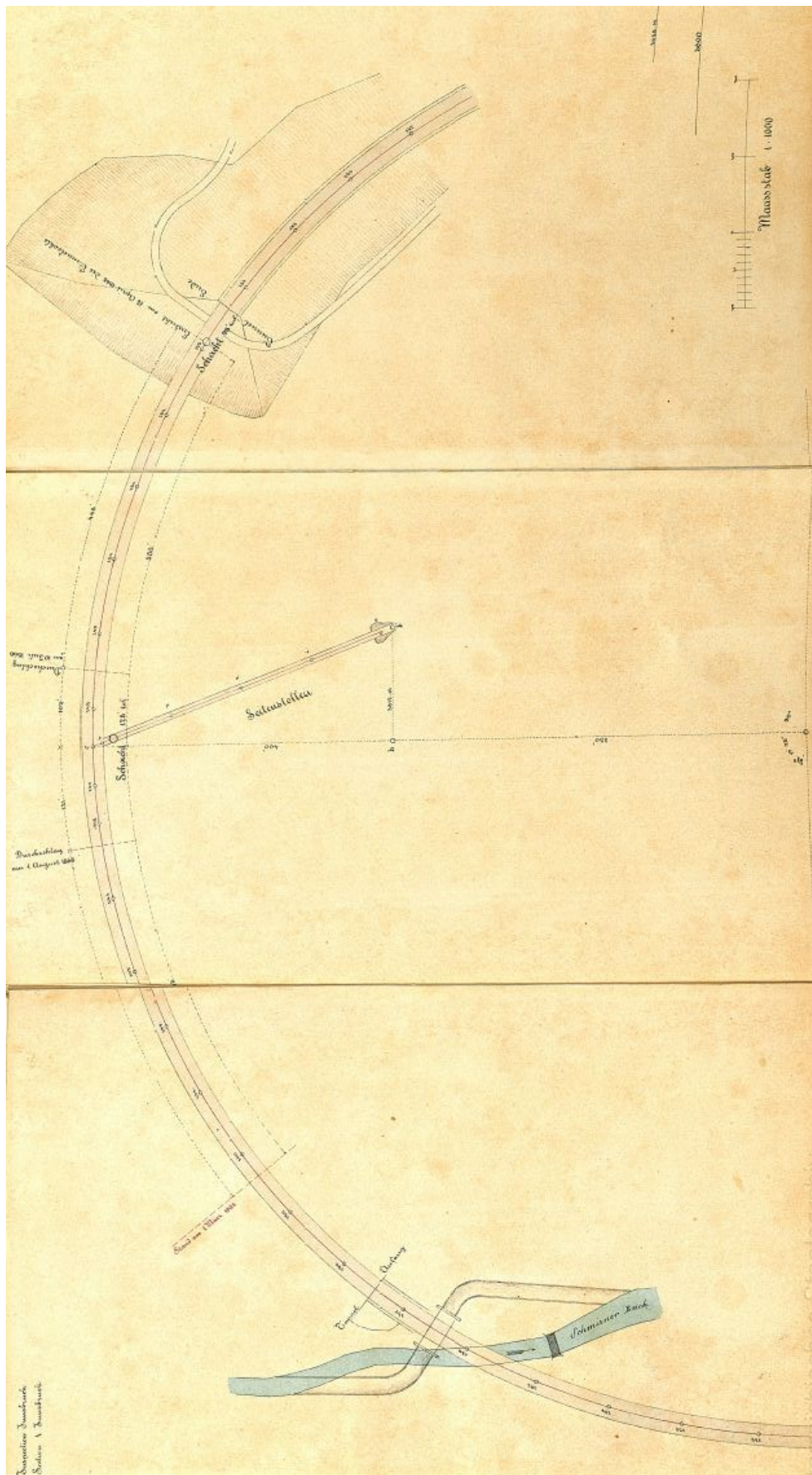
Anhang A: Pumpenvorrichtung zum Wasserheben [18]

B Wasserhubmaschine Tunnel - Semmering Haupttunnel



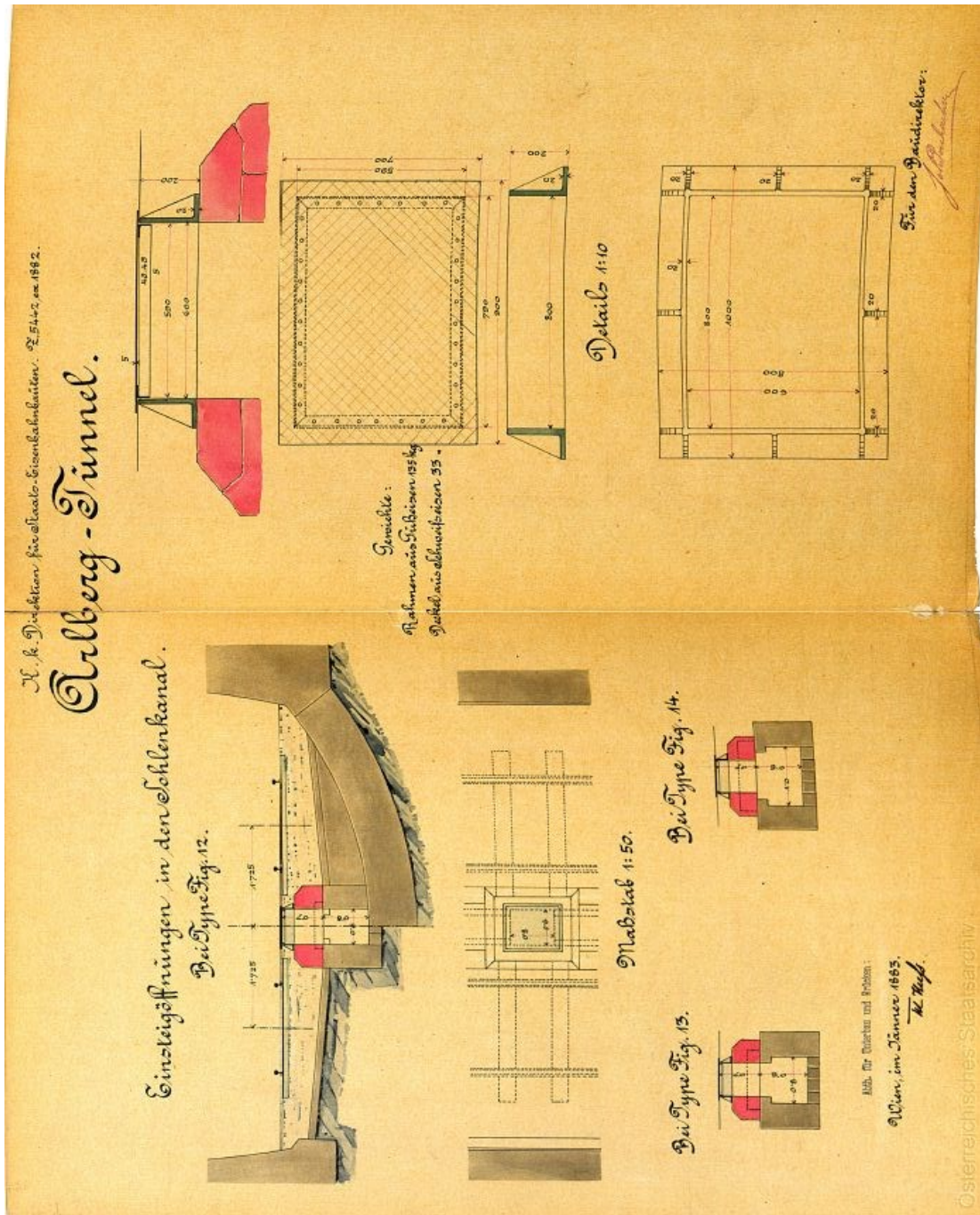
Anhang B: Wasserhubmaschine [19]

E Anlage der Schächte und Seitenstollen - St. Jodock-Tunnel



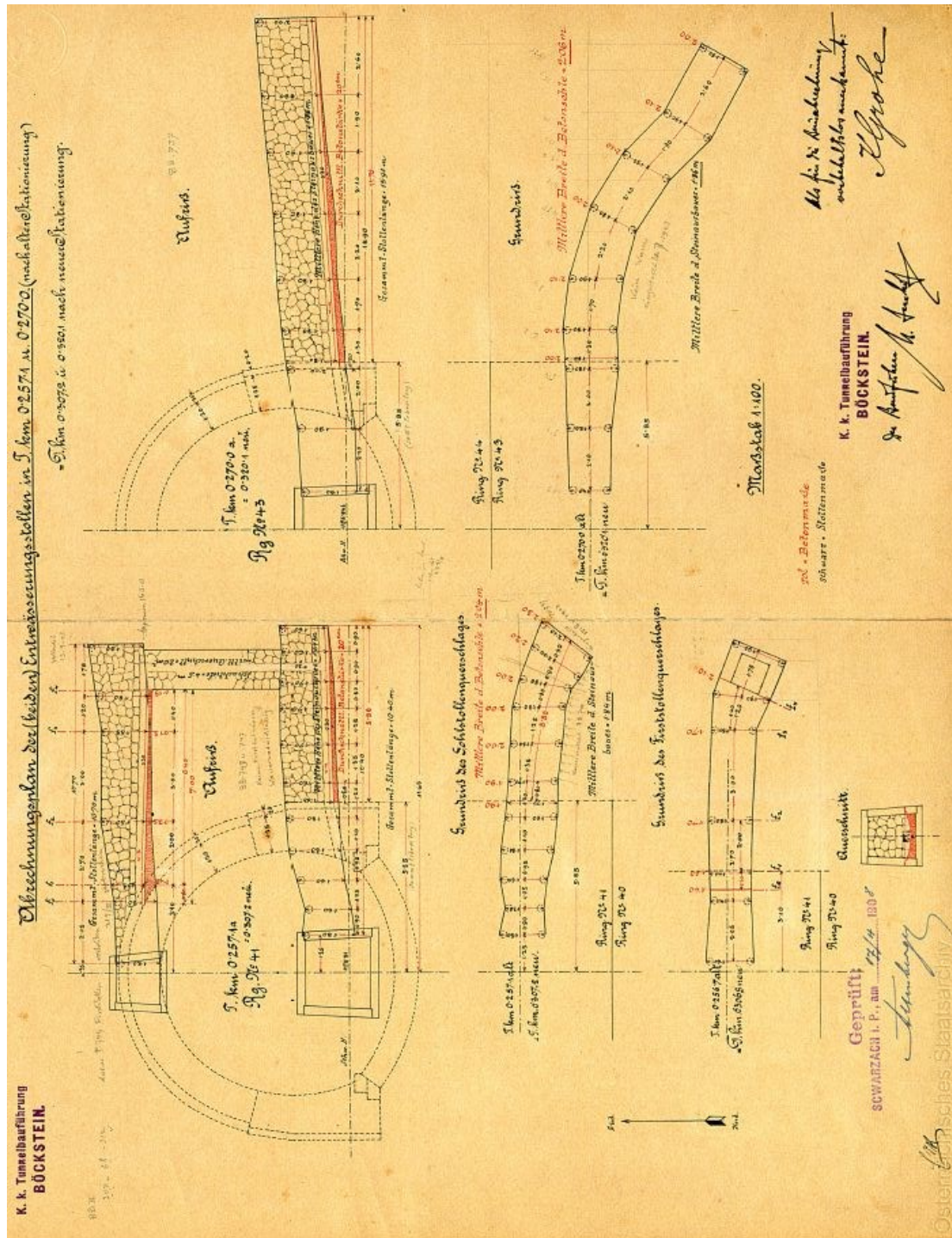
Anhang E: Anlage der Schächte und Seitenstollen St. Jodock (Teil 1) [35]

F Einsteigöffnungen in den Sohlenkanal – Arlberg-Tunnel



Anhang F: Einsteigöffnungen in den Sohlenkanal – Arlberg-Tunnel [40]

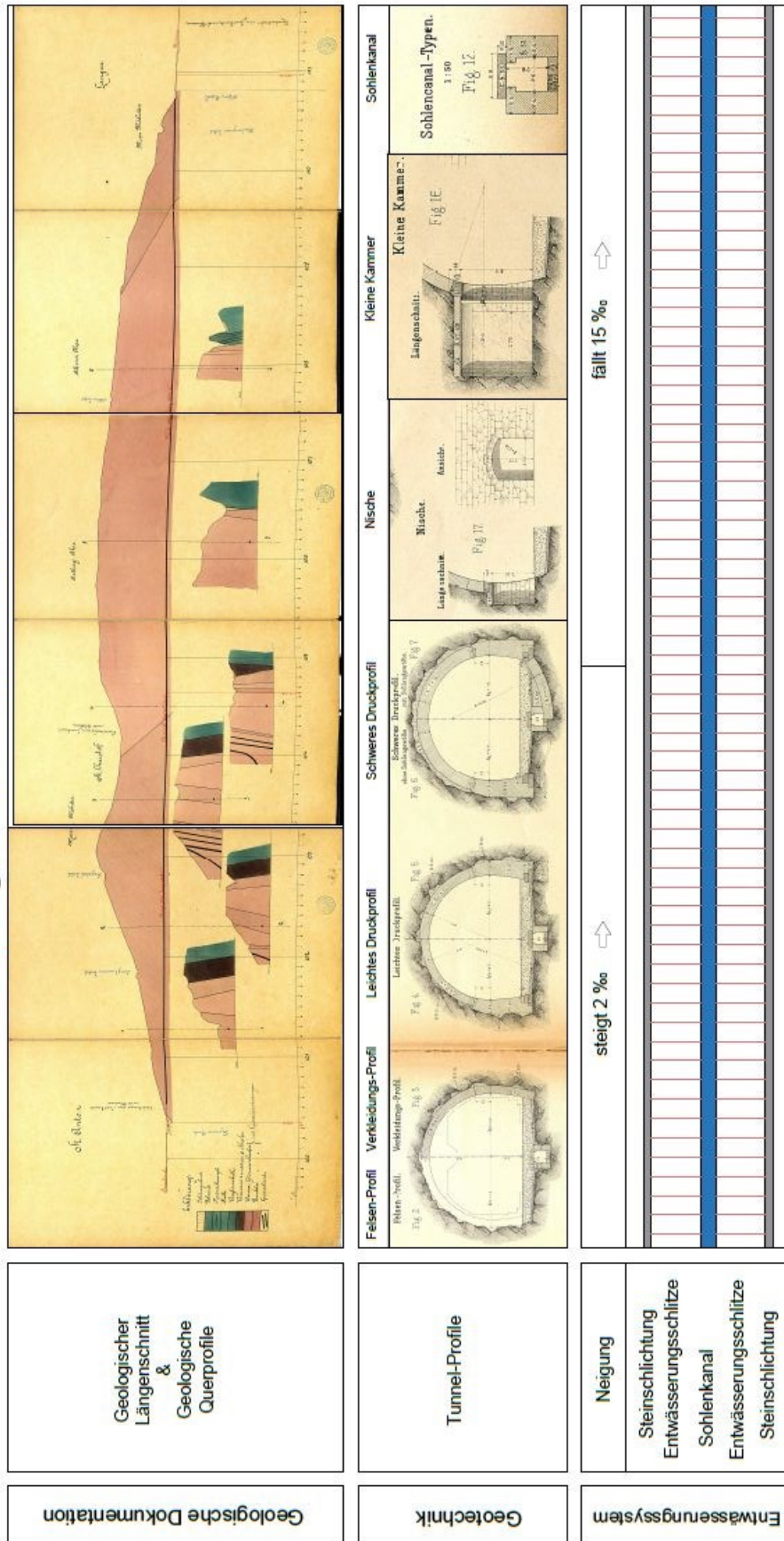
H Entwässerungsstollen - Tauerntunnel



Anhang H: Entwässerungsstollen – Tauerntunnel [47]

I Längenschnitte

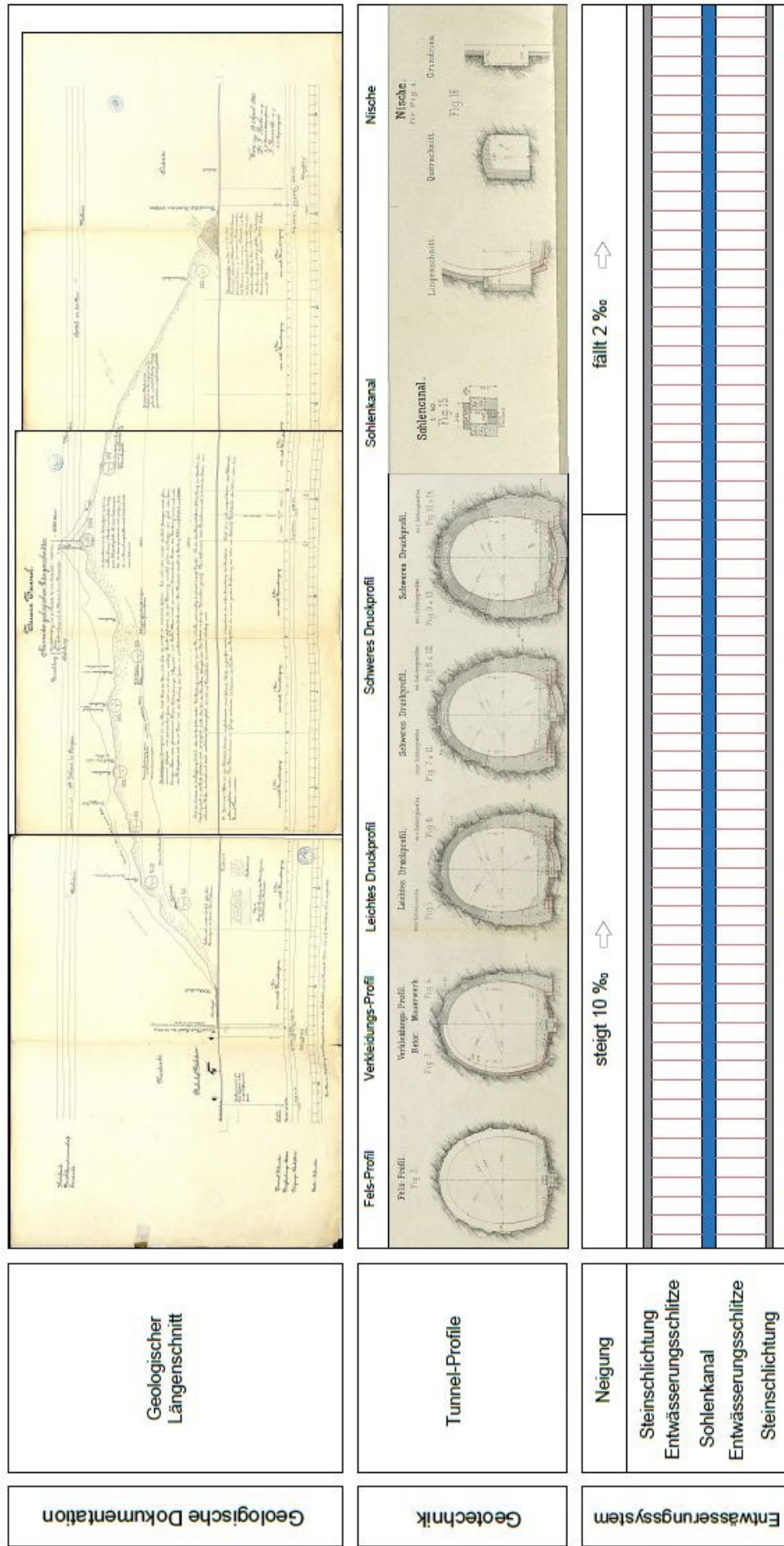
Arlbergtunnel Jahr ca. 1880



Verwendete Quellen stammen aus dem Österreichischen Staatsarchiv

gez. David Gusenbauer am 08.08.2019

Tauerntunnel Jahr ca. 1908

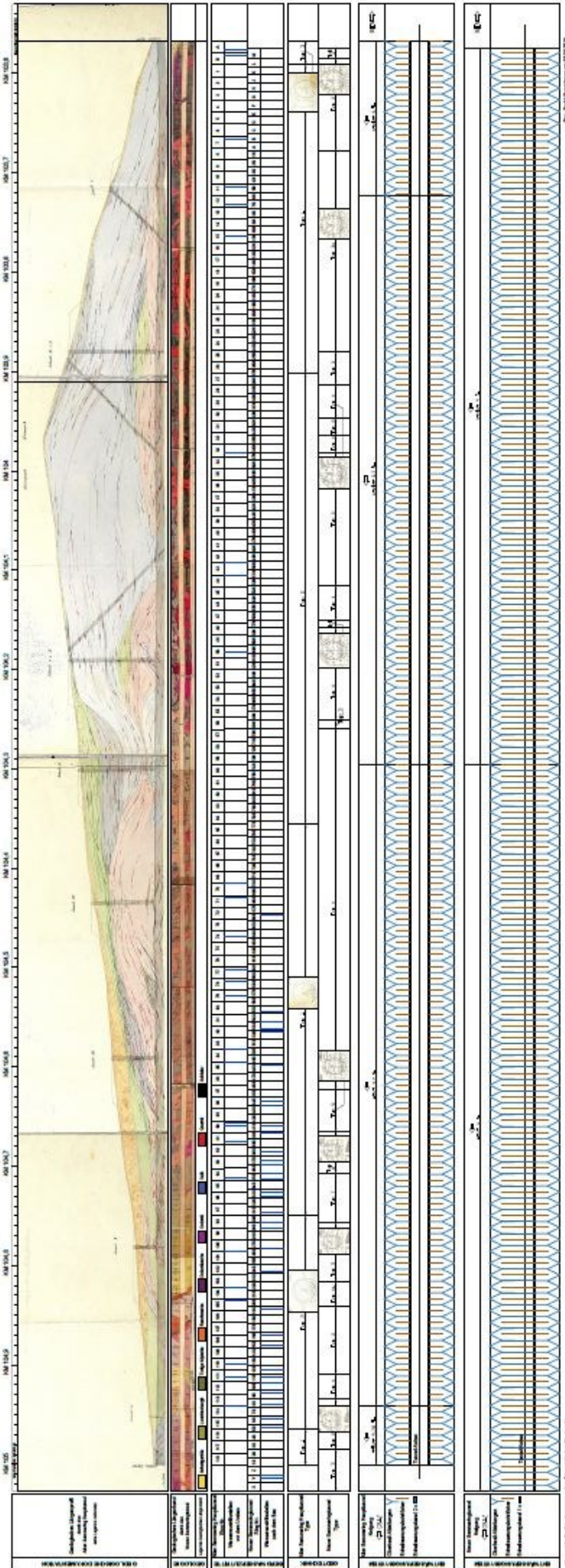


Verwendete Quellen stammen aus dem Österreichischen Staatsarchiv

gez. David Gusenbauer am 08.08.2019

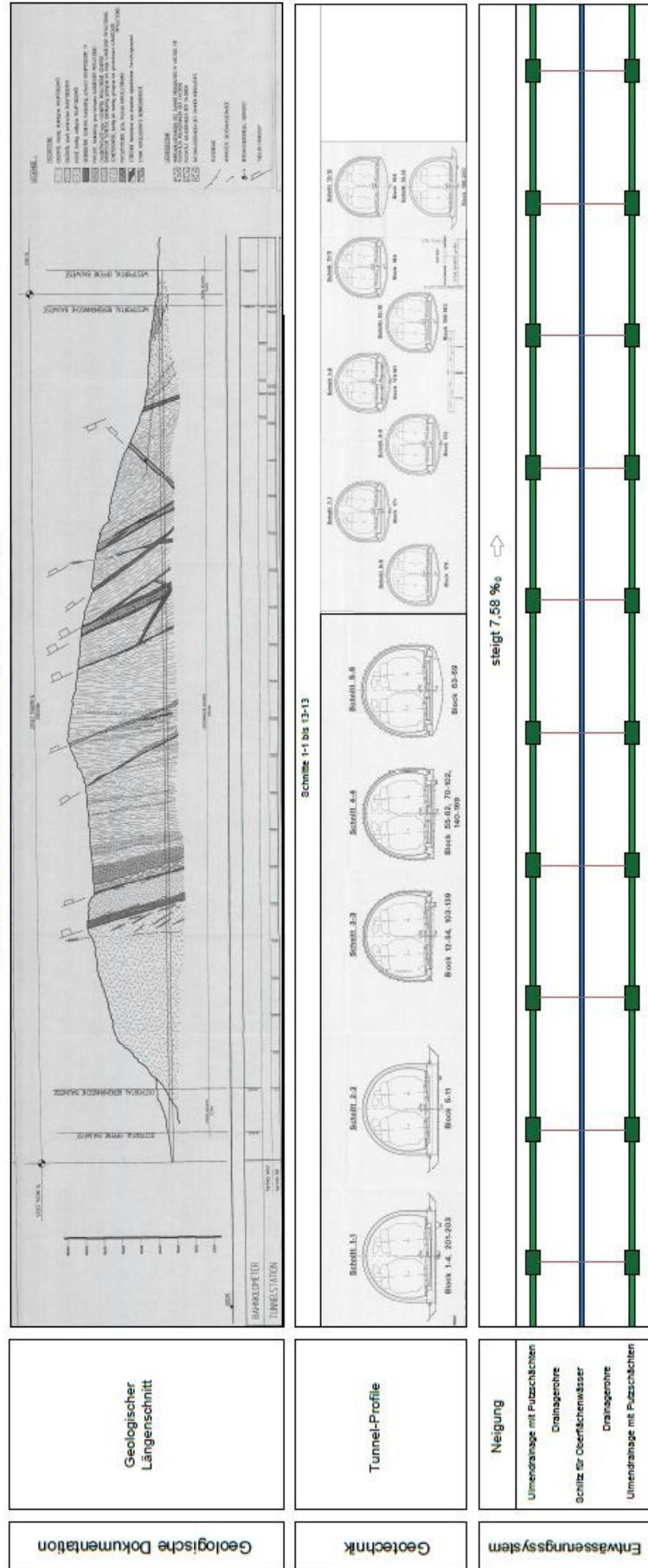
Anhang I: Längsschnitte (Teil 2)

Umbau des Alten Semmering Haupttunnels
und Bau des Neuen Semmeringtunnels 1952



Anhang I: Längenschnitte (Teil 3)

Zammertunnel Jahr ca. 1999



Anhang I: Längenschnitte (Teil 4)

J Analysen zum Gutachten der Luftuntersuchungen - Arlbergtunnel

Analysen zu vorstehendem Gutachten.

Untersuchung des Eisenmaterials.

Die Untersuchung der Eisenabfälle hatte den Zweck, constatieren zu können, durch welche Einflüsse das Eisenmaterial angegriffen werde.

Die Analyse derselben ergab folgende Resultate:

Eisenabfälle	
gesammelt zwischen 2. und 3. Kilometer.	
In Salzsäure unlöslich	9.20%
Wasser	11.83%
Eisenoxyd	72.24%
Eisenoxydul	4.19%
Schwefelsäure	2.39%
Kohlensäure	0.15%

Eisenabfälle	
gesammelt zwischen 4. und 5. Kilometer.	
In Salzsäure unlöslich	10.25%
Wasser	12.05%
Eisenoxyd	69.28%
Eisenoxydul	5.54%
Schwefelsäure	2.71%
Kohlensäure	0.17%

Eisenabfälle	
gesammelt zwischen 6. und 7. Kilometer.	
In Salzsäure unlöslich	12.34%
Wasser	13.42%
Eisenoxyd	68.37%
Eisenoxydul	4.15%
Schwefelsäure	1.64%
Kohlensäure	0.08%

Wasser-Analysen.**Wasser Nr. 1.**

Das Wasser wurde beim Ring Nr. 828 zwischen dem 6. und 7. Kilometer entnommen. Dasselbe ist schwach getrübt, geruch- und geschmacklos und von neutraler Reaction.

In 1 Liter sind enthalten:

Gesamtrückstand	0.1792 gr
Darunter anorganische Bestandtheile	0.1548 gr
organische Bestandtheile	0.0244 gr
Kalk	0.0150 gr
Magnesia	in Spuren
Eisen	in Spuren
Kieselsäure	0.0066 gr
Schwefelsäure	0.0320 gr
Kohlensäure gebunden	0.0531 gr
freie	0.0042 gr
Salpetersäure	negativ
Salpetrige Säure	negativ
Ammoniak	negativ

100 cm³ Wasser benötigen zur Oxydation der organischen Substanzen 0.00379 gr Kaliumpermanganat.

Wasser Nr. 2.

Das Wasser wurde bei der ersten Kammer dem Tunnelkanal entnommen. Dasselbe ist klar, geruch- und geschmacklos und von neutraler Reaction.

In 1 Liter sind enthalten:

Gesamtrückstand	0.1780 gr
Darunter anorganische Bestandtheile	0.1516 gr
organische Bestandtheile	0.0264 gr
Kalk	0.0378 gr
Magnesia	0.0042 gr
Eisen	in Spuren
Kieselsäure	0.0101 gr
Schwefelsäure	0.0537 gr
Chlor	0.0039 gr
Kohlensäure gebunden	0.0560 gr
freie	0.0030 gr
Salpetersäure	in Spuren
Salpetrige Säure	negativ
Ammoniak	negativ

100 cm³ Wasser benötigen zur Oxydation der organischen Substanzen 0.00263 gr Kaliumpermanganat.

Cement-Analysen.**Cement Nr. 1.**

Wasser	8.78%
Kohle	1.66%
Kieselsäure	29.72%
Eisenoxyd und Thonerde	11.07%
Calciumoxyd	25.34%
Magnesiumoxyd	2.75%
Schwefelsäure	7.55%
Kohlensäure	13.13%

— 363 —

Cement Nr. 2.

Wasser	8.78%
Kohle	1.66%
Kieselsäure	29.72%
Eisenoxyd und Thonerde	11.07%
Calciumcarbonat	22.97%
Magnesiumcarbonat	5.77%
Calciumsulfat	12.83%
Calciumoxyd	7.20%

Gas-Analysen.

Die Rauchgase wurden direct aus dem Rauchfang der Maschine entnommen und in Glasflaschen aufgefangen.

Rauchgas Nr. 1.

Die Maschine wurde mit Litzter und Mörtschauer Coaks geheizt, ausserdem war noch eingebraunte Kohle vorhanden.

100 cm³ dieses Rauchgases enthielten durchschnittlich:

Kohlensäure	11.86 Vol. %
Kohlenoxyd	0.02 Vol. %
Kohlenwasserstoffe	0.67 Vol. %
Sauerstoff	2.40 Vol. %

Rauchgas Nr. 2.

Die Maschine wurde mit Coaks Nr. 4 und Nr. 5 (Oberschlesische) geheizt.

100 cm³ Rauchgas enthielten:

Kohlensäure	9.38 Vol. %
Kohlenoxyd	0.03 Vol. %
Kohlenwasserstoffe	0.58 Vol. %
Sauerstoff	8.28 Vol. %

Rauchgas Nr. 3.

Die Maschine wurde mit Coaks I, II und III (Litzter Coaks) geheizt.

100 cm³ Rauchgas enthielten:

Kohlensäure	1.75 Vol. %
Kohlenoxyd	negativ
Kohlenwasserstoff	negativ
Sauerstoff	18.55 Vol. %

Luft aus dem Arlbergtunnel.

Die Entnahme erfolgte an einem sehr günstigen Tage.

Sauerstoff	20.8%
Stickstoff	79.2%
Kohlensäure	negativ
Kohlenoxyd	negativ
Kohlenwasserstoffe	negativ

46*