



Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit

Bestandserhebung des Wartungsaufwandes  
von Drainagesystemen in Verkehrstunneln

Mariusz Fryderyk Czerniak, BSc

März 2023



**EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG**

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

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

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

Datum 14.02.2023

---

Unterschrift Verfasser/in  
Mariusz Fryderyk Czerniak

## Danksagung

Meinen größten Dank entrichte ich meiner Familie. Meiner Mutter - Teresa für die Vermittlung von moralischen und ethischen Werten. In der mitunter stürmischen See des Lebens dienen sie mir stets als richtungsweisender Kompass. Meinem Vater - Zbigniew danke ich für sein Vorbild an Mut, Kampfgeist, Ausdauer und psychischer Stärke. Mehr denn je ist die Resilienz wichtiger als zuvor.

Meinen Geschwistern - Zbigniew, Sylwia, Bernadette und Elisabeth - deren Liebe, Unterstützung und Beistand, in guten und weniger guten Tagen, ich immer gewiss sein darf, bleibe ich bis zum letzten Augenschlag verbunden.

Meinen Freunden aus der Studentenzeit und abseits dieser - Berni und Bernhard, Matt, Christoph, Richard, Milo und Schöffli - möchte ich mich auf diesem Weg für die so vielen erheiterten Momente im Laufe meines Studentenlebens und hoffentlich auch danach bedanken. Eine Freude sie an meiner Seite zu wissen. Nicht unerwähnt darf ich auch die Gruppierung „Die Altrover“ der Pfadfindergruppe Fürstenfeld lassen - ein Bund, der seinesgleichen sucht!

Ferner danke ich den vielversprechenden jungen Talenten Willi & Arne für neue Erkenntnisse aus der Aeronautik, des traditionellen Kickerns und der Leichtigkeit des Seins.

Meinen Betreuern Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler und Dipl. Ing. Robert Wenighofer danke ich für die Möglichkeit des Verfassens dieser Abschlussarbeit und die Betreuung dieser. Für die Geduld, die sie einem Freigeist gewährt haben und für den Einblick in das wissenschaftliche Handwerk des Lehrstuhls für Subsurface Engineering an der Alma Mater Leobensis.

Herrn Gero Scharrenbach danke ich für das Teilen von Wissen und Erfahrung sowie der Möglichkeit zur Begutachtung von in situ vorgeführten prä- und postsedimentärer Wartungsverfahren an Entwässerungssystemen. Es war stets eine Freude einen fachlichen Diskurs mit Ihm zu führen.

Den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben bedanke ich mich für die Bereitstellung von Messgeräten und umfassender Informationen zu jenen.

Allen hier nicht erwähnten Bekannten und Kollegen, verblichenen Freunden und Lebensabschnittspartnerinnen, flüchtigen Fremden und anderen Lebenszeiträubern – auch Euch - aus tiefstem Herzen Danke für all die Erfahrungen!

## Kurzfassung

Entwässerungssysteme sind integrale Bestandteile eines drainierten Tunnelbauwerkes. Deren unsachgemäße Planung, Ausführung sowie Wartung verursachen Versinterungen, Rohrschäden etc. und stellen für den Tunnelbetreiber kostspielige Instandhaltungsmaßnahmen und Tunnelsperren dar. Für die Minimierung zukünftiger Wartungstätigkeiten ist es notwendig die Ursache des Wartungsaufwandes zu erschließen und in die Planungsphase zukünftiger Projekte einfließen zu lassen.

Der erste Teil dieser Forschungsarbeit widmet sich der Evaluierung von Wartungsaufwänden am sekundären Entwässerungssystem. Als Tunnelbauwerke werden die Umfahrungstunnel „Hausmannstätten“, Steiermark und „Grünburg“, Oberösterreich sowie der Tunnel „Reinertshof“, Bayern evaluiert. Das Ziel ist Gründe für die im Entwässerungssystem bestehende Versinterungsproblematik und den Wartungsaufwand aufzuzeigen. Hierfür werden Bauwerksdaten, die herrschende Geologie und Hydrogeologie analysiert. Vorgenommene Wartungstätigkeiten am Entwässerungssystem vor Ort werden dokumentiert. Dabei wird der Wartungsaufwand an jeweiligen Leitungsabschnitten als Spülgeschwindigkeit definiert. Eine grafische Gegenüberstellung des Tunnelbauwerks mit seinem Entwässerungssystem, der herrschenden Geologie und Hydrogeologie sowie den erzielten Spülgeschwindigkeiten zeigt, dass im Bereich von Schachtbauwerken (UT „Hausmannstätten“ u. „Grünburg“) die Spülgeschwindigkeiten deutlich fallen und somit der Wartungsaufwand am Drainagesystem zunimmt. Die Auswertung des Tunnels „Reinertshof“ zeigt die Ausleitung des drückenden Grundwassers über das Entwässerungssystem als Ursache für die dominierende Versinterungsproblematik.

Im zweiten Teil wird der Frage nachgegangen, welchen Einfluss feste Härtestabilisatoren als präsedimentäres Wartungsverfahren auf zukünftige Wartungstätigkeiten am sekundären Entwässerungssystem eines Tunnelbauwerks haben. Hierfür wird mittels eines Langzeitversuchs an der Forschungseinrichtung „Zentrum am Berg“ der Versinterungsentstehung am während der ersten Monaten der Betriebsphase nachgegangen. Über ein Mess- und Beobachtungsprogramm werden Teststrecken mit festen Härtestabilisatoren und Vergleichstrecken ohne feste Härtestabilisatoren einander gegenübergestellt. Die Implementierung der festen Härtestabilisatoren erfolgt am Übergang der Sickerpackung zu der geschlitzten Bergwassersammelleitung. Die Auswertung zeigt, dass von einem zukünftig geringen Wartungsaufwand auszugehen ist. Der Einfluss implementierter Härtestabilisatoren konnte aufgrund allgemein geringen Versinterungsaufkommens auf Test- und Vergleichstrecken nicht vollends bestätigt werden.

## Abstract

Drainage systems are an integral part of any drained tunnel. Improper planning, execution and maintenance can cause sintering and pipe damage, which could mean costly maintenance measures and tunnel closures for the tunnel operating company. In order to minimize maintenance expenditures, it is necessary to identify potential problems that may need to be incorporated into the planning phase of any future projects.

The first portion of this paper is focused on the evaluation of maintenance procedures for secondary drainage systems. The bypass tunnels "Hausmannstätten" (Styria), "Grünburg" (Upper Austria) and the tunnel "Reinertshof" (Bavaria) are those that have been evaluated. The goal is to show the reasons behind the existing sintering problems in the drainage systems and the necessary maintenance steps required. Therefore, the building data, prevailing geology and hydrogeology are analyzed, and any maintenance activities carried out on the drainage systems on site are documented.

The maintenance measure at the respective pipe sections is defined as the flushing speed. A graphical comparison of the tunnel structure with its drainage system, the prevailing geology and hydrogeology, as well as the achieved flushing speeds shows that, in the area of shaft structures (UT "Hausmannstätten" and "Grünburg"), the flushing speeds are reduced considerably, resulting in an increase of required maintenance for the drainage system. The evaluation of the tunnel "Reinertshof" shows, that the discharge of the pressurized groundwater, via the drainage system, is the cause of the dominant sintering problem.

The second portion investigates the influence of solid hardness stabilizers as a pre-sedimentary maintenance method for future maintenance activities on the secondary drainage system of a tunnel structure. For this purpose, a long-term test at the "Zentrum am Berg" research facility evaluates the formation of sintering during the first months of the operating phase. A measurement and observation program compares sections both with and without solid hardness stabilizers. The implementation of the solid hardness stabilizers takes place at the transition of the drainage gravel to the slotted drainage pipe. The evaluation shows that minimum future maintenance efforts can be assumed. The influence of implemented hardness stabilizers could not be fully confirmed due to generally low sintering volumes on the test sections.

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	iii
Kurzfassung.....	iv
Abstract.....	v
Inhaltsverzeichnis.....	vi
1 Aufgabenstellung und Methodik.....	7
2 Theoretische Grundlagen.....	9
2.1 Entwässerung von Straßentunneln.....	9
2.2 Versinterungen im sekundären Entwässerungssystemen.....	13
2.3 Sekundäres Entwässerungssystem in Straßentunnel.....	18
2.3.1 Rohrleitungen – Material, Wandung, Form, Dimensionierung.....	22
2.3.2 Kontroll- und Reinigungsschächte.....	27
2.4 Wartungsverfahren am sekundären Entwässerungssystem.....	29
2.4.1 Postsedimentäre Wartungsverfahren.....	30
2.4.2 Präsedimentäre Wartungsverfahren.....	33
3 Evaluierte Tunnelbauwerke.....	38
3.1 Umfahrungstunnel Hausmannstätten.....	39
3.2 Umfahrungstunnel Grünburg.....	49
3.3 Tunnel Reinertshof.....	60
4 Langzeitversuch mit festen Härtestabilisatoren.....	69
5 Zusammenfassung und Diskussion.....	83
5.1 Evaluierte Tunnelbauwerke.....	83
5.2 Langzeitversuch mit festen Härtestabilisatoren.....	84
6 Begriffsbestimmungen.....	86
7 Abkürzungen.....	88
8 Abbildungsverzeichnis.....	90
9 Tabellenverzeichnis.....	94
10 Literaturverzeichnis.....	95
11 Anhang.....	98
Anhang A: Entwässerungsschema Straßentunnel - „Zentrum am Berg“.....	98
Anhang B: Entwässerungsschema Eisenbahntunnel - „Zentrum am Berg“.....	99
Anhang C: Ergebnisse der Wasseranalytik.....	100
Anhang D: Bilddokumentation der Beobachtungspunkte.....	101

# 1 Aufgabenstellung und Methodik

Diese Forschungsarbeit gliedert sich wesentlich in zwei Kerngebiete, nämlich die Evaluierung von Wartungsaufwänden an sekundären Entwässerungssystemen bestehender Straßentunnel und einen Langzeitversuch.

Der erste Teil widmet sich der Bestandserhebung des Wartungsaufwands von Drainagesystemen in bestehenden Straßentunnel und gleichzeitig der Ergründung von Versinterungsursachen des sekundären Entwässerungssystems (EWS). Tabelle 1 weist die evaluierten Tunnelbauwerke aus.

Tabelle 1. Evaluierte Tunnelbauwerke

<b>Tunnelbezeichnung</b>	<b>Lage</b>	<b>Bauweise</b>
Umfahrungstunnel „Hausmannstätten“	Steiermark, AT	geschlossen
Umfahrungstunnel „Grünburg“	Oberösterreich, AT	geschlossen
Tunnel „Reinertshof“	Bayern, D	offen

Das Ziel ist es einen möglichen Zusammenhang zwischen geologischen und hydrogeologischer Gegebenheiten, der Tunnelbauweise, dem ausgeführten sekundären Entwässerungssystem, dem festgestellten Wartungsaufwand dieser sowie der Versinterungsproblematik zu eruieren.

Der theoretische Teil der vorliegenden Arbeit widmet sich den Anforderungen an die Entwässerungssysteme und den bautechnischen Ausführungen. Weiters werden Verunreinigungen von Entwässerungsanlagen in Tunnelbauwerken, deren Arten sowie die Entstehung dieser thematisiert. Zuletzt werden prä- und postsedimentäre Wartungsverfahren an Entwässerungssystem erläutert.

Die evaluierten Tunnelbauwerke werden im Kapitel 3 behandelt. Für jedes Objekt sollen nachfolgende Daten erhoben werden:

- Allgemeine Bauwerksdaten
- Geologische und hydrologische Gegebenheiten
- Pläne (Regelquerschnitte, Entwässerungssysteme etc.)
- Wartungsprotokolle und Erfahrungsberichte
- Dokumentation der Wartungsarbeiten an Entwässerungssystem vor Ort
- Dokumentation bestehender Versinterungen vor Ort

Anhand der theoretischen Grundlagen und der Erkenntnisse aus den erhobenen Daten werden für jedes Tunnelbauwerk Zusammenhänge und Gründe für den herrschenden Wartungsaufwand dargelegt.

Im Kapitel 4 wird der Langzeitversuch behandelt. Dabei handelt es sich um eine Langzeitbeobachtung von Versinterungserscheinungen im Entwässerungssystem eines Tunnelbauwerks in den ersten Monaten der Betriebsphase. Dabei soll ergründet werden, inwieweit präsedimentäre Wartungsverfahren (feste Härtestabilisatoren) zukünftige postsedimentäre Wartungsverfahren beeinflussen.

Als Versuchsstandort soll ein Tunnelbauwerk gewählt werden, das die Implementierung fester Härtestabilisatoren in das primäre Entwässerungssystem ermöglicht und eine regelmäßige Begehung, ohne den laufenden Betrieb zu beeinträchtigen, zulässt.

Über ein Mess- und Beobachtungsprogramm sollen die Veränderung der Wasseranalytik und das Versinterungsaufkommen chronologisch erfasst werden und somit der Einfluss fester Härtestabilisatoren im primären Entwässerungssystem auf die Versinterungsentstehung aufgezeigt werden.

Eine Gegenüberstellung von Teststrecken mit festen Härtestabilisatoren im primären Entwässerungssystem und Vergleichstrecken ohne feste Härtestabilisatoren sollen Aussagen über zukünftige Wartungsarbeiten am sekundären Entwässerungssystem liefern. Die Anordnung der Härtestabilisatoren soll längs der eingebetteten Drainageleitungen erfolgen.

## 2 Theoretische Grundlagen

Ein Tunnelbauwerk stellt einen Eingriff in ein, sich im natürlichen Gleichgewicht befindliches, geologisches und hydrogeologisches System dar. Wirtschaftlich technische Lösungen müssen nicht nur aus der Komplexität des Bauwerkes und dessen Interaktion mit seiner Umgebung erarbeitet werden, sondern auch die gesamte Lebensspanne eines Bauwerks umfassen. Eine entsprechende Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer soll deshalb auch erzielt werden.

PIARC – World Road Association geht von einer Nutzungsdauer für einen Tunnel von 120 Jahren aus. Wobei einzelnen Tunnelausrüstungskategorien, wie elektronischer bzw. elektrischer Ausrüstung etc., eine deutlich kürzere Nutzungsdauer diagnostiziert wird. (PIARC - World Road Association, 1999)

Entwässerungssysteme sind integrale Bestandteile eines Tunnelbauwerkes. Folglich ist deren Auslegung, Ausführung und Instandhaltung essentiell für die Langlebigkeit der gesamten Baustruktur. Unsachgemäße Planung, Ausführung sowie deren Wartung verursachen Versinterungen, Rohrschäden etc. In weiterer Folge sind kostspielige Sanierungsarbeiten gepaart mit Tunnelsperren und Verkehrsüberlastungen an verkehrsreichen Strecken unausweichlich. Gleichzeitig steigen die Betriebskosten, im Speziellen die Instandhaltungskosten, aber auch kostspielige Instandsetzungsarbeiten können die Folge sein.

Nachfolgende Kapitel vertiefen das komplexe Thema der Entwässerung von Straßentunneln, deren Ausführungen, auftretende Probleme und Wartungen.

### 2.1 Entwässerung von Straßentunneln

Schon in der Planungsphase werden durch hydrogeologische Vorerkundung Informationen über die herrschenden Bergwasserverhältnisse erhoben. Diese Erkenntnisse ermöglichen es ein zielgerechtes Entwässerungs- und Abdichtungskonzept für das jeweilige Tunnelbauprojekt zu wählen. Dabei wird grundsätzlich zwischen zwei Entwässerungskonzepten unterschieden.

- Konzept der druckwasserhaltenden Ausführung
- Konzept der nicht druckwasserhaltenden Ausführung

Ferner besteht die Möglichkeit eines Mischkonzepts. Dieses kann bei längeren Tunnelbauwerken mit weitgehend trockenen bzw. wasserführenden Zonen, je nach Längenverhältnissen durchaus eine Anwendung finden. Die Übergangsbereiche bedürfen jedenfalls einer genauen Planung und Ausführung. (Chabot, et al., 2000)

### **Druckwasserhaltende Ausführung – der „undrainierte“ Tunnel**

Straßentunnel in druckwasserhaltender Ausführung bedürfen keiner Entwässerung. Das Tunnelbauwerk wird mit einem Abdichtungssystem ausgeführt, welches auf den umgebenden Wasserdruck ausgelegt ist. Für die Ausführung der sogenannte Rundumabdichtung kommt eine Kunststoffdichtungsbahn (KDB) oder eine bewehrte bzw. unbewehrte wasserundurchlässige Innenschale (WDI) zum Einsatz (Richtlinie Tunnelabdichtung, ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2012).

Auch bei einer tadellosen Ausführung des Abdichtungssystems in druckwasserhaltenden Tunneln wird eine Leckwasserdrainage für allfällige Leckagen empfohlen. (Chabot, et al., 2000)

„Grundsätzlich ist man mit den heutigen Bauverfahren in der Lage, Bauwerke zu errichten, die ein gewisses Mass [sic!] an Wasserdruck ohne weiteres ertragen können. Allerdings steigen mit der Höhe des abzutragenden Wasserdrucks auch die Kosten für die Erstellung der Bauwerke. Oft sind es also auch wirtschaftliche Gründe, die zur Entscheidung führen, das Grund- bzw. Bergwasser mittels einer Drainage abzuleiten und somit planmässig [sic!] keinen oder nur einen festgelegten Wasserdruck auf das Bauwerk einwirken zu lassen.“ (Girmscheid, et al., 2005)

### **Nicht druckwasserhaltende Ausführung – der „drainierte“ Tunnel**

Bei diesem Konzept wird das Berg- bzw. Sickerwasser über das Gewölbe entlang einer Abdichtung – Regenschirmabdichtung genannt – drucklos gefasst und über das Entwässerungssystem ausgeleitet.

„Das Tunnelgewölbe muss nicht auf Wasserdruck bemessen werden. Die Sohle kann bei Bedarf flach ausgebildet werden. Die Drainage soll einen dauerhaften drucklosen Wasserabfluss gewährleisten und einfach zu warten sein. Ein drainierter Tunnel kann einschalig oder zweischalig mit Abdichtung erstellt werden.“ (Chabot, et al., 2000)

### **Theoretischer Sonderfall – der „druckgeregelte“ Tunnel**

„Einen theoretischen Sonderfall stellt eine druckgeregelte Entwässerung dar. Dabei sollte der Wasserdruck nur zum Teil abgebaut werden, indem die abzuleitende Wassermenge durch einen künstlich erzeugten Rückstau am Auslauf des Entwässerungssystems reduziert wird. Die Belastung von Abdichtung und Auskleidung ist abhängig vom verbleibenden Wasserdruck. Die abzuleitende Wassermenge wird umso mehr reduziert, je höher der Wasserdruck gewählt wird. .... Es handelt sich dabei um ein ständig wassergefülltes Leitungssystem, bei dem der Kontakt des Wassers mit der Luft erst an der Austrittsöffnung am Portal stattfindet.“ (Arbeiter, et al., 2021)

Der weitere Teil dieser Arbeit bezieht sich nur auf Ausführungen drainierter (druckwasserentlasteter) Straßentunnel in offener oder geschlossener Bauweise.

### **Rechtliche Aspekte**

Ein drainierter Straßentunnel ist grundsätzlich mit zwei Arten von Wasserströmen konfrontiert. Das bergseitig zudrängende Berg- bzw. Sickerwasser einerseits und das, im Tunnelinnenraum, anfallende Fahrbahnwasser. Beide sind zu fassen und aus dem Tunnel abzuleiten. Bevor sie in die Vorflut gelangen, müssen sie nach wasserrechtlichen Bestimmungen behandelt werden.

Für die Fassung und Ableitung von Wässern des Tunnelinnenraums (Niederschlagswasser, Waschwasser, Löschwasser etc.) wird eine Fahrbahntwässerung im Zuge des Innenausbau hergestellt. Bei Straßentunnel, welche für Gefahrguttransporte zugelassen sind, ist laut **Anlage 2.6.1 Straßentunnel-Sicherheitsgesetz – STSG** diese so auszulegen, dass toxische und entzündliche Flüssigkeiten entsprechend gefasst und sicher ausgeleitet werden ohne eine Ausbreitung in andere Bereiche zu ermöglichen. Des Weiteren wird in der Richtlinie Verkehr und Straße – RVS 09.01.23 – Innenausbau, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr unter Punkt 10.3 die Planung und Ausführung der Fahrbahntwässerung behandelt.

Die Planung hat sich auch an die bestehenden regionalen und überregionalen gesetzlichen Bestimmungen und Vorgaben zu halten. In Österreich wird der Schutz und das Reinhalten von Gewässern im Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG 1959) geregelt. Für die Thematik des Fahrbahnwassers (Reinigungswasser, Havariewasser) sei auf die Allgemeine Abwasseremissionsverordnung – AAEV sowie die Indirekteinleiterverordnung – IEV verwiesen. In Verbindung mit dem öffentlichen Kanalnetz ist auch das Kanalgesetz 1988 zu beachten.

Ferner sind laut **Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 – (UVP - G 2000)** die unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen sowie Wechselwirkungen der geplanten Ausführung vollumfänglich zu prüfen und zu bewerten (Umweltverträglichkeitsprüfung – UVP) und zu begutachten (UVP – Gutachten). Das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie – BMK (ehemals: „Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie – BMVIT“) hat diesbezüglich 2014 die Leitlinie UVP-Verfahren und Wasserrecht für Straßenbauvorhaben herausgegeben. Der Punkt 4 dieser Leitlinie listet alle Gesetze und Verordnungen, Normen und Technischen Regelwerke auf, die zur einer effizienten Einreichplanung in Verbindung mit der UVP und wasserrechtlicher Bewilligung notwendig sind. Eine Harmonisierung von Projektunterlagen von Auftraggebern, Planungsbüros, Behörden und Sachverständigen wird dadurch ermöglicht (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie - BMVIT, 2014).

### **Mischsystem – Trennsystem**

Das Entwässerungssystem eines drainierten Straßentunnels kann entweder als Mischsystem oder als Trennsystem ausgeführt werden. Bei einem Mischsystem werden die beiden gefassten Wasserströme in einem einzigen Leitungssystem abgeführt. Solche Systeme bestehen in vielen älteren Straßentunnel. (Chabot, et al., 2000)

Ein Mischsystem muss nicht nur auf die prognostizierte Bergwassermenge ausgelegt sein. Durch mögliche Havariewässer aus dem Tunnelinnenraum ist dieses zusätzlich mit genügend

Auffangkapazitäten auszustatten. Zusätzlich sind vor der Einleitung in die Vorflut entsprechend groß bemessene Abwasseraufbereitungsanlagen – Gewässerschutzanlagen (GSA) zu errichten. Deren Dimensionierung ist bei einem Trennsystem entsprechend schlanker ausgelegt. (Chabot, et al., 2000)

Bei einem Trennsystem werden die beiden Wässer in voneinander getrennten Entwässerungssystemen gefasst und aus dem Tunnel geleitet. Hierbei kommt es zu keiner Kontamination des Bergwassers durch das verunreinigte Fahrbahnwasser. (Chabot, et al., 2000) Diese Ausführung erlaubt es das auftretende Bergwasser als Ressource zu nutzen.

„Die Nutzungsmöglichkeiten können entsprechend der anfallenden Tunnelwassermenge, Tunnelwasserqualität und Tunnelwassertemperatur in eine energetische Nutzungskomponente (Erdwärme und Erdkälte) und eine Komponente der Wasserversorgung (Brauchwasser, Trinkwasser, Notwasservorsorge, Spezialnutzungen) eingeteilt werden.“ (Domberger, et al., 2008)

Für die optimale Planung eines Entwässerungssystems bedarf es einer fundierten Vorerkundung. Eine gute hydrogeologische Prognose bzw. die Beschreibung des herrschenden hydrogeologischen Systems kann nur mit dem Willen des Bauherrn erfolgen, in dem Untersuchungen und Messungen ausreichend lange vor Baubeginn stattfinden (Reichl, et al., 2008). Durch diese lässt sich die Planung des Entwässerungssystems optimieren. Eine im Zuge des Vortriebs stattfindende Dokumentation der tatsächlichen angetroffenen Bergwasserverhältnisse – als auch deren Zusammensetzung – lässt eine nachträgliche Adaptierung des noch nicht im Bau befindlichen Entwässerungssystems zu.

### **Das primäre und sekundäre Entwässerungssystem (EWS)**

Das EWS eines Tunnelbauwerkes wird aufgrund seiner Systemkomponenten in zwei Kategorien (primäres und sekundäres EWS) unterteilt.

„Zum ... *primären Entwässerungssystem* zählen alle Bauteile eines Tunnels, die zur Drainage des umgebenden Gebirges erforderlich und im späteren Gebrauchszustand des Tunnels – ausser [sic!] durch aufwendige bauliche Massnahmen [sic!] - nicht mehr zugänglich sind.“ (Gamisch, et al., 2007)

Zu dem primären EWS gehören flexible Halbschalen zum Ableiten punktueller Wasserzutritte, flächige Noppenbahnen, Vliese und Kunststoffgitter, aber auch Drainagekörper (gebundene oder ungebundene Sickerpackungen).

„Zum *sekundären Entwässerungssystem* zählen alle Bauteile, die auch im Gebrauchszustand des Tunnels zugänglich sind und mit geeigneten Massnahmen [sic!] und Geräten regelmässig [sic!] instand gehalten werden können. .... Der Übergang zwischen Sickerpackung und Drainagerohr kann als direkter Anschluss des primären an das sekundäre Entwässerungssystem angesehen werden.“ (Gamisch, et al., 2007)

Die weitere Arbeit widmet sich im Speziellen der Ausleitung von Berg- oder Sickerwässern, der damit verbundenen Problematik von Versinterungen im sekundären EWS, der Ausführung des sekundären Entwässerungssystems nach dem derzeitigen Stand der Technik sowie den derzeitigen Wartungsverfahren.

## 2.2 Versinterungen im sekundären Entwässerungssystemen

Versinterungen treten aufgrund von Ausfällungsprozessen aszendenter oder deszendenter Bergwässer auf und setzen sich im Entwässerungssystem des Tunnelbauwerks ab. Das Ausmaß der Versinterung ist auf verschiedene chemische und physikalische Gegebenheiten des gefassten Bergwassers zurückzuführen.

Wichtigste mineralische Ablagerungen in wasserführenden Systemen aufgrund von Fällungsreaktionen, sowie deren mögliche Entstehungsursachen (außer Temperatur und Druckänderungen) gibt Tabelle 2 wieder. (Gamisch, et al., 2007)

Tabelle 2. Wichtigste mineralische Ablagerungen in wasserführenden Systemen und deren Entstehungsursachen in Anlehnung an Gamisch, et al., 2007

Ablagerungen	Summenformel	Entstehungsursachen
Kalk, Kalziumkarbonat, Calcit, (Kesselstein, Wasserstein)	$\text{CaCO}_3$	Entweichen von Kohlendioxid, Aufnahme von Kohlendioxid, pH-Wert-Erhöhung, Eindickung, andere chemische Reaktionen
Gips, Kalziumsulfat	$\text{CaSO}_4(\text{aq})$	Eindickung der Lösung, Chemische Absorbtion von $\text{SO}_2$
Bariumsulfat	$\text{BaSO}_4$	Eindickung der Lösung, Chemische Absorbtion von $\text{SO}_2$
Kalziumphosphat, Phosphatstein, Hydroxylapatit (pH > 8)	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , $\text{Ca}_9(\text{PO}_4)_6$ , $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$	Phosphatierung, pH-Wert-Erhöhung, Eindickung
Magnesiumsilikat	$\text{MgSiO}_3$	starke Eindickung, pH-Wert-Erhöhung (Kesselbetrieb)
Eisen(III)-oxid, Ocker, Rost	$\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow \rightarrow \text{FeOOH}$ $(+\text{H}_2\text{O}) \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3(+\text{H}_2\text{O})$	Oxidation von $\text{Fe}^{2+}$ zu $\text{Fe}^{3+}$ , Werkstoffkorrosion
Braunstein, Manganoxid	$\text{MnO}_2$	Oxidation von $\text{Mn}^{2+}$ zu $\text{Mn}^{4+}$
Sand, Kieselsäure	$\text{SiO}_2$	Verschmutzung durch äußere Einflüsse, Eindickung

Die häufigsten Ablagerungen in Tunnelentwässerungsanlagen bestehen aus Kalziumkarbonat (Galli, 2000 und Dietzel, et al., 2008). Andere Ausfällungstypen in Entwässerungen wie beispielsweise die Verockerung (Eisenausfällung) spielen im alpinen Raum eine untergeordnete Rolle (Wegmüller, 2001).

„Den Mechanismus von Kalkausscheidungen in Drainageleitungen kann man erfassen und verstehen, wenn man die zentrale Rolle des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts in die Betrachtung einbezieht.“ (Wegmüller, 2001)

**Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht (KKG)**

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) entsteht in den obersten Bodenschichten infolge von Vergärungsprozessen von Bakterien (organische Herkunft) oder kommt tief aus dem Untergrund (anorganische Herkunft). Während der Gehalt an CO<sub>2</sub> der normalen Luft bei ca. 0,03% liegt, kann dieser in der Bodenluft bis auf 7% ansteigen. In gewöhnlicher Bodenluft liegt der Gehalt an CO<sub>2</sub> zwischen 0,4% und 1,4%. (Wegmüller, 2001)

In Wasser ist Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) gut löslich. Seine Löslichkeit nimmt mit ansteigender Temperatur (T) ab und mit steigendem Druck (p) zu (Tabelle 3). Bei konstantem Druck stellt sich zwischen dem im Wasser gelösten und in der Umgebung gasförmigen CO<sub>2</sub> ein dynamisches Gleichgewicht ein. Die wässrige CO<sub>2</sub>-Lösung reagiert schwach sauer, wobei ihr pH-Wert von der gelösten Menge an CO<sub>2</sub> abhängt. (Benedix, 2008)

Tabelle 3. Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser (p = 1,013 bar) in Anlehnung an Benedix, 2008

Temperatur [°C]	Löslichkeit von CO <sub>2</sub> [l CO <sub>2</sub> /l H <sub>2</sub> O]
0	1,713
10	1,190
20	0,880
25	0,757
30	0,665
40	0,530

Ein kleiner Teil des gelösten CO<sub>2</sub> bildet die Kohlensäure (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Kohlensäurehaltiges Wasser hat im Vergleich zu reinem (weichem) Wasser, gegenüber allen Mineralien ein viel besseres Lösungsvermögen. Die Löslichkeit von Karbonaten ist im hohem Maße vom Gehalt an freiem CO<sub>2</sub>-Gas im Wasser abhängig. Ein mit Kohlensäure gesättigtes Wasser löst ca. 165 g/l Kalziumkarbonat. Die Löslichkeit des Kalziumkarbonats wird durch das KKG bestimmt. Die Kalkauflösung umfasst das Stoffsystem CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CaCO<sub>3</sub> mit zahlreichen chemischen und physikalischen Prozessen, bei denen alle Aggregatzustände teilnehmen (Abbildung 1). (Wegmüller, 2001)

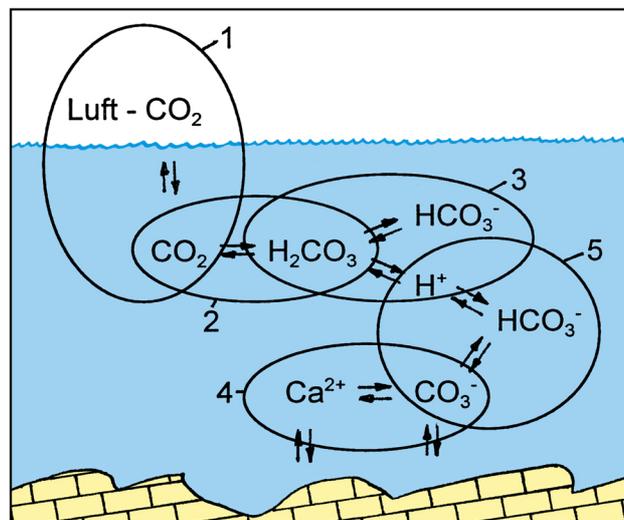
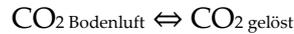


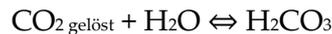
Abbildung 1. Die verschiedenen Stufen der Kalkauflösung; Quelle: Wegmüller, 2001

Die einzelnen Schritte der Kalkauflösung wurden aus Wegmüller, (2001) entnommen (vgl. Abbildung 1).

1. Das Bergwasser reichert sich mit CO<sub>2</sub> an.



2. Das gelöste CO<sub>2</sub> ist bei 4 °C zu 0,75% hydratisiert (Kohlensäure).



3. Als starke Säure ist H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> völlig dissoziiert: 1. Oxidationsstufe.

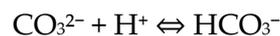


Die 2. Ordnungsstufe, die Zerlegung von HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> und H<sup>+</sup>, kann bei einem pH unter 8,5 wegen des geringen Anteils vernachlässigt werden (nicht aber bei hohen pH-Werten wie z. B. durch Beeinflussung zementgebundener Baustoffe).

4. An der Grenzfläche Bergwasser-Kalkgestein werden die Ionen aus dem Kristallgitter herausgelöst. Ein rein physikalischer Vorgang.



5. Das neu entstandene CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> assoziiert sich mit dem H<sup>+</sup> aus dem 3. Schritt.



6. Die Lösung verarmt an CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Dadurch wird das Lösungsgleichgewicht mit dem CaCO<sub>3</sub> gestört, und das Ionenprodukt entspricht dem Löslichkeitsprodukt L.

$$[\text{Ca}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}] = L = 4,0 \cdot 10^{-9}$$

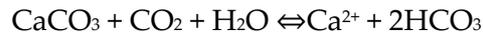
() = Aktivität des Klammerinhalts

[] Konzentration des Klammerinhalts

Um das verbrauchte CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> zu ersetzen, wird erneut CaCO<sub>3</sub> in Lösung gehen (4. Schritt), wobei [Ca<sup>2+</sup>] gegenüber [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>] zunehmend überwiegt. Durch den Verbrauch von H<sup>+</sup> wird auch das Gleichgewicht zwischen der Kohlensäure und dem 1. Dissoziationsprodukt gestört, und es kommt zu einer erneuten Dissoziation.

Um das Gleichgewicht zu erhalten, wird gelöstes CO<sub>2</sub> hydratisiert und dadurch das Gleichgewicht zum Luft-CO<sub>2</sub> gestört, weshalb neues CO<sub>2</sub> aus der Bodenluft in das Bergwasser hineindiffundiert. Der Vorgang läuft nun so lange weiter, bis sich ein neues Gleichgewicht

eingestellt hat. Durch die Addition der Schritte 2–5 ergibt sich die bekannte Sammelgleichung der Kalklösung.



„Ablagerungen entstehen durch Veränderung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts. Dieses Gleichgewicht wird durch mehrere Parameter bestimmt, die sich zudem gegenseitig beeinflussen.“ (Wegmüller, 2001)

### **Die Temperatur des Bergwassers**

Alle Gleichgewichte des KKG werden durch die Temperatur beeinflusst. Die Löslichkeit von Kalziumkarbonaten in kohlendioxidhaltigem Wasser verläuft gleichsinnig mit der Gleichgewichts-Konzentration des gelösten anorganischen Kohlenstoffs. Bei einer Temperaturzunahme sinkt die Menge des gelösten Kohlendioxids (vgl. Tabelle 3). Damit verbunden sinkt die Löslichkeit von Kalziumkarbonat. (Gamisch, et al., 2007)

In Tunnelbauwerken treten Temperaturerhöhungen vor allem im Sommer und besonders in Nahbereich von Portalen auf. Auch bei langen, schlecht belüfteten Tunneln kann durch die Abwärme von Fahrzeugen die Temperatur der Tunnelluft höher als die des Gebirges liegen und folglich die des Drainagewassers. Werden Schachtabdeckungen nicht luftdicht ausgeführt, kommt es zu einem Luftaustausch der kühlen Luft des sekundären EWS und der oft wärmeren Tunnelluft. Dieser Luftaustausch wird durch die Druck- und Sogwirkung der Fahrzeuge stark begünstigt. Das Drainagewasser erfährt eine Temperaturerhöhung wodurch die Löslichkeit von Kohlendioxid und gelösten Erdalkal karbonaten sinkt. Übersteigen die Ionenkonzentrationen die Gleichgewichtsgrenzen (GGG), kommt es zu einer Ausscheidung der überschüssigen Ionen und Versinterungen entstehen. Begünstigt wird die Reduktion des gelösten Kohlendioxids durch Abstürze und Verwirbelungen des Wassers. Die Phasengrenzfläche Wasser-Luft wird durch das künstliche Untermischen von Luftblasen zusätzlich vergrößert. Dies vergrößert die bereits stattfindenden Diffusions- und Ausgleichsvorgänge. (Gamisch, et al., 2007)

### **Der CO<sub>2</sub>-Partialdruck der Umgebung**

Der Partialdruck des im Fels befindlichen Bergwasser ( $p_1$ ) ist höher als der Partialdruck der Umgebungsluft im Drainagesystem ( $p_2$ ). Es kommt zur Angleichung dieser CO<sub>2</sub>-Partialdrücke  $p_1$  und  $p_2$ . Dieser Ausgleich findet bei turbulenter Strömung viel schneller statt als bei stationärer (ruhiger) Strömung bzw. stehendem Wasser. Durch den Druckausgleich ändern sich gleichzeitig die Systemkomponenten des KKG. Im Normalfall ( $p_1 > p_2$ ) kommt es zu einer Kalkausfällung. Bei stark übersättigtem Bergwasser verursachen kleinste Unstetigkeiten unverhältnismäßige Ablagerungen. (Wegmüller, 2001)

### **Der Absolutdruck**

Einen wesentlichen Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Partialdruck übt der Absolutdruck aus. Der CO<sub>2</sub>-Partialdruck der Umgebungsluft des Drainagewassers (korrespondierende Atmosphäre) steigt linear mit dem Absolutdruck, wenn die Konzentrationen der Einzelgase konstant bleiben. Deshalb bewirkt eine Erhöhung des Absolutdrucks die Zunahme des in Wasser gelösten CO<sub>2</sub>. Durch den höheren Anteil an CO<sub>2</sub> ist das Wasser in der Lage größere Mengen

an Kalk aufzulösen. Ein Aufstau des Grundwassers in einem Boden mit hohem CO<sub>2</sub>-Gehalt bzw. eine hohe mikrobiologische Aktivität in aufgestautem Grundwasser führt dazu, dass große Mengen an CO<sub>2</sub> und damit einhergehend große Mengen an Kalk im Grundwasser aufgelöst werden können. Tritt dieses unter Druck stehende, mit CO<sub>2</sub> und Kalk gesättigtes Grundwasser in ein frei drainiertes EWS ein, wird das Wasser entspannt. Diese Druckentspannung bewirkt ein Entweichen des gelösten CO<sub>2</sub>, folglich einen Rückgang der Löslichkeit von Erdalkal karbonaten. Versinterungen entstehen. (Gamisch, et al., 2007)

### **Verdunstung**

Der Einfluss von Versinterung wird in Bauwerksentwässerungssystemen oft übersehen. Bergwasser im KKG hat, in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen, eine bestimmte Menge an CO<sub>2</sub> und eine damit in Gleichgewicht stehende Menge an Kalziumkarbonat. Verflüchtigt sich ein Teil des Bergwassers (Lösungsmittel), steigen die Konzentrationen der gelösten Stoffe. Zur Aufrechterhaltung des KKG kommt es zur Ausfällung. Die Verdunstung wird umso einflussreicher, je geringer die Wassermenge  $Q$  in einer Leitung bzw. je kleiner das Verhältnis von Wassermenge zu Wasseroberfläche (Phasengrenzfläche) ist. (Gamisch, et al., 2007)

### **Der pH-Wert des Bergwasser**

Die Löslichkeit von Kalk, CaCO<sub>3</sub> oder auch Löschkalk, Ca(OH)<sub>2</sub> wird durch den pH-Wert bestimmt. Dieser kann sowohl durch die Änderung des KKG als auch durch die Zugabe von Basen, wie z. B. Portlandit, CaCO<sub>3</sub> ansteigen. Bei einer Erhöhung des pH-Wertes des Bergwassers steigt die Konzentration von Karbonat-Ionen an, während die Konzentrationen von Kohlenstoff, Kohlensäure und der Hydrogenkarbonat-Ionen absinken. Aufgrund dessen, dass das Löslichkeitsprodukt von Kalziumkarbonat bei konstanten Umgebungsbedingungen konstant bleibt, nimmt die Menge des insgesamt gelösten Kalziums mit steigendem pH-Wert des Wassers ab. Wird das Löslichkeitsprodukt von Kalziumkarbonat überschritten, kommt es zur Ausfällung und Versinterungen. Bei einem mit CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> gesättigten Bergwasser wird bereits durch eine geringe Erhöhung des pH-Wertes das Löslichkeitsprodukt von Kalziumkarbonat überschritten. Dies resultiert aus dem Auflösen von Portlandit (Ca(OH)<sub>2</sub>) oder alkalihaltigen Beschleunigern wie Natriumaluminat, (Na[Al(OH)<sub>4</sub>]) oder Kaliumaluminat, (K[Al(OH)<sub>4</sub>]) aus dem Beton. (Gamisch, et al., 2007)

### **Neueste Untersuchungen**

Nach Wegmüller, (2022) ist der wichtigste Aspekt bei der Bildung von Versinterungen der CO<sub>2</sub>-Gehalt von Bergwasser. Dabei ist nicht die CO<sub>2</sub>-Konzentration gemeint, die durch saure Böden und / oder Niederschläge verursacht werden, sondern die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die durch den Zustrom von magmatischem CO<sub>2</sub> zu erklären ist. So verfügt nur das CO<sub>2</sub> über die Kraft den pH-Wert so zu senken, dass Kalkbestandteile aus dem Gestein und / oder Betonverkleidung gelöst und im EWS abgelagert werden. Aufgefahrene Zuflüsse von CO<sub>2</sub>-haltigem Bergwasser aus dem Untergrund (aszendentes Wasser) verursachen Ablagerungen von i. d. R. >2 mm bis 20 cm pro Jahr. Im Vergleich dazu verursachen deszendente Bergwässer (CO<sub>2</sub>-Anreicherung aus der Bodenluft) ein Anwachsen von Versinterungen in der Stärke von <2 mm pro Jahr. Vorgenommene Messungen von CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in unterschiedlichen Tunnelbauwerken decken sich zu 95 % der Fälle mit den vorhandenen Ablagerungen (Tabelle 4).

Tabelle 4. CO<sub>2</sub>-Messungen in Tunnelbauwerken in Anlehnung an Wegmüller, 2022

Tunnel	Standort	CO <sub>2</sub> -Messung [ppm]
Melbourne City Link (AU)	Vereinigungsschacht	> 10 000
Metro Marseille (FR)	Sohldrainage	3 469
A 28 Gotschnatunnel (CH)	Sohldrainage	> 10 000
ÖBB Sieberg Tunnel (AT)	Ulmendrainage, Sohle	4 953 – 5 750
Kaiser-Wilhelm-Tunnel (DE)	Ulmendrainage	1 459

Bisherige Untersuchungen der CO<sub>2</sub>-Gehalte in den Schächten von EWS lassen eine Einteilung des angetroffenen CO<sub>2</sub>-Gehalt und der zu erwarteten Versinterung zu (Tabelle 5). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über 10 000 ppm erfordern Spülungen des EWS in einem Intervall mit einer maximalen Länge von drei Monaten. (Wegmüller, 2022)

Tabelle 5. Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft und der zu erwartenden Versinterung nach Wegmüller, 2022

CO <sub>2</sub> -Gehalt in der Luft [ppm]	zu erwartende Versinterung
< 600	moderate
600 – 2000	mittel – stark
> 2000	nur noch stark

### 2.3 Sekundäres Entwässerungssystem in Straßentunnel

Ab Mitte des 20. Jahrhunderts kam es mit der Weiterentwicklung von Tunnelbaumethoden (z. B. Neue österreichische Tunnelbaumethode – NÖT) und der damit verbundenen Entwicklung und Nutzung neuer Baumaterialien, -stoffe sowie Rezepturen von Spritzbeton, Mörtel etc. unweigerlich auch zu einer Adaptierung des Entwässerungssystems (EWS) von Straßentunneln. Die Auswirkungen, hervorgerufen durch die Interaktion des Bergwassers mit den neuen Baustoffen und Bauausführungen, auf den langen Lebenszyklus des Tunnelbauwerks wurden unterschätzt bzw. der Thematik in der Planungsphase zu wenig Beachtung geschenkt.

Dies spiegelt sich besonders in der Problematik von Versinterungen innerhalb des sekundären EWS in bestehenden Straßentunnel wider. Bei Nichtbehebung dieser kann dies sogar bis zum völligen Zuwachsen der Leitung führen. Durch diese resultierende Querschnittsverminderung kann die vorhandene Menge an Drainagewasser im Leitungssystem nicht drucklos abtransportiert werden. Dies führt unweigerlich zu einem Rückstau des Drainagewassers und Aufbau von stationärem Wasserdruck. Bauwerksschäden können die Folge sein. Eine anschließende Instandsetzung ist äußerst zeit- und kostenintensiv.

Die Zunahme an Betriebskosten durch Wartung und Instandsetzung des sekundären EWS gab Anlass zu investigativen Forschungsarbeiten. Für die Planung und Ausführung von Tunnelentwässerungen in Straßentunnel ausgeführt in offener und / oder geschlossener (bergmännischer) Bauweise entstanden nationale Normen und Richtlinien. Für Deutschland und Österreich kommen unter anderen

- RI-BWD-TU – Richtlinie für Bergwasserdrainagesysteme von Straßen-tunneln, Dezember 2007 - Bundesanstalt für Straßenwesen, Deutschland
- Richtlinie „Tunnelentwässerung“, April 2010, ÖVBB – Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik
- RVS 09.01.23 „Innenausbau“ – Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr

zur Anwendung. Wie bedeutend die Planung und Ausführung der Entwässerungssysteme von Tunnel sind, lässt sich an betriebseigenen Ausführungs- und Qualitätsvorschriften oder Planungshandbücher einzelner Bauherren bzw. Tunnelbetreiber (z. B. ASFINAG, SBB etc.) erkennen.

Ziel ist, durch die teils detaillierten Vorgaben für die Planungs-, Bau- sowie Betriebsphase, die Instandhaltungs- und versinterungsbedingten Wartungskosten der Drainagesysteme zu reduzieren und so für zukünftige Tunnelbauwerke ein funktionssicheres und wartungsarmes Grundsystem als Mindeststandard vorzugeben. (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007)

### **Grundlegende Anforderungen an das sekundäre EWS**

Das EWS ist auf die gesamte Lebensdauer eines Tunnelbauwerks ausgelegt. Dies impliziert die Dauerhaftigkeit verwendeter Materialien und die Funktionsfähigkeit des ausgeführten EWS. Werden diese nicht eingehalten, so kann auf Dauer die Sicherheit des EWS und folglich die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks nicht eingehalten werden. Die Schweizerische Bundesbahnen (SBB) sehen in ihren Qualitätsvorschriften erste Instandsetzungsmaßnahmen am Tunnelentwässerungssystem frühestens nach 50 Jahren vor (Schweizerische Bundesbahnen - SBB, 2010).

Galli (2000) stellt für eine dauerhafte Funktionsfähigkeit des sekundären EWS vereinfacht nachfolgende Kriterien dar:

- Querschnitt: Zutrittsstellen, Austrittsstellen sowie der gesamte Transportweg innerhalb des EWS müssen über den gesamten Querschnitt freigehalten bleiben.
- Gefälle: Ein ungehinderter Wasserabfluss über das gesamte sekundäre EWS muss gewährleistet sein.
- Wartung: Eine regelmäßige Wartung ist über das gesamte sekundäre EWS durchzuführen.
- Beschädigungen: Eine Beschädigung des sekundären EWS ist zu unterlassen.

Gefährdungen dieser Kriterien können einer ungenauen Planung, unsachgemäßer Bauausführung oder nachlässiger Wartung bzw. Instandsetzung entstammen und sind folglich zu vermeiden bzw. zu unterlassen.

Die Richtlinie „Tunnelentwässerung“, ÖBVV (2010) spezifiziert diese Kriterien und führt für die Ausbildung des sekundären EWS nachfolgende Grundsätze an:

- Eine klare und einfache Konzeption, erzielt durch eindeutig definierte und ausgeformte Fließwege des Drainagewassers, ist zu verfolgen. Auf Achssprünge und Querausleitungen ist zu verzichten.
- Die Ableitung des Drainagewassers soll in einem gut gefüllten Rohr mit durchgängigem, gleichgerichtetem und ausreichendem Gefälle ohne Fallstrecken oder Verwirbelungen erfolgen.
- Das Bergwasser soll durch groß dimensionierte Ulmendrainagen abgeleitet werden.
- Bei möglichen interagierenden Bergwässern soll eine getrennte Ableitung überprüft werden.
- Bergwassersammelleitungen sind nur dann anzuordnen, wenn die prognostizierte Bergwassermenge 50% der Abflussleistung der Ulmendrainage überschreitet. Die prognostizierte Bergwassermenge ist während der Bauphase zu überprüfen.
- Leichter Zugang zu den Leitungen soll gewährleistet sein.
- Unverzichtbare Querausleitungen in die Bergwassersammelleitung sollen immer höhenversetzt angeordnet werden, sodass nur bei einem hohen Wasserstand in der Ulmendrainage die Ausleitung ermöglicht wird.

Nach Wegmüller (2001) ist die Ausbildung eines funktionstüchtigen Entwässerungssystems der einfachste und kostengünstigste Weg, um die geforderte Lebensdauer eines Bauwerks ohne Einschränkung zu erreichen.

Dies lässt sich durch richtige Wahl von Form und Werkstoff der jeweiligen Systemelemente des sekundären EWS erzielen. Diese bestehen grundlegend aus in Betonbettungen satt aufliegenden Rohrleitungen (Teilsicker-, Vollsicker- oder Mehrzweckrohre und Vollrohre), Formstücken sowie Kontroll- und Putzschächten.

Mit dem Ziel zukünftig versinterungsarme Entwässerungssysteme zu implementieren, gaben Gamisch, et al., (2007) als Resultat ihrer Forschung eine tabellarische Zusammenfassung wichtigster Gestaltungsmaßnahmen von EWS bezogen auf jeweilige Versinterungsursachen heraus (Tabelle 6). Dabei berücksichtigten sie auch Inspektionen und Wartungen des EWS.

# Theoretische Grundlagen

Tabelle 6. Wichtigste Gestaltungsanforderungen an ein versinterungsarmes EWS sowie deren Leistungsfähigkeit hinsichtlich der wichtigsten Versinterungsursachen in Anlehnung an Gamisch, et al., 2007

Gestaltungsmaßnahmen		Versinterungsursachen		Vermeidung von Ruhewasserstrecken und Senken		optimale Rohrfüllung		Aufstau (Vollanstau) (keine versinterungs-relevanten Baustoffe einstauen!)		Druckhaltung (keine versinterungs-relevanten Baustoffe einstauen!)		Siphonierung		Verhinderung von starken Luftströmungen infolge Verkehr u. natürlicher Druckdifferenzen		Unterbindung des Luftaustauschs zwischen Tunnelndrainage u. Atmosphäre-Drainage		Verhinderung der Untermischung v. Luft durch Vermeidung v. Abstürzen und Diskontinuitäten		Verhinderung der Blasen(keim)bildung		getrennte Ableitung interagierender Wasser		Vermeidung der Erwärmung des Drainagewassers		Verhinderung von Unterdruckstrecken (saugender Abfluss)		biologisch neutrale, gut zu reinigende Rohrmaterialien mit glatter Oberfläche		Vermeidung des Baustoffkontakts (im primären, u. sekundären EWS)																	
flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes											
Ableitung des Drainagewassers		schnell		Reduktion der Verweilzeit des Wassers		Reduktion der Verweilzeit des Wassers		im primären EWS		Reduktion der Verweilzeit des Wassers		Trennung von alkalischen Wässern		Vermeidg. Wasser-Beton-Kontakt		kürzeste optimale Fließstrecke		Getrennthalten interagierender Wasser		definierte Sedimentationspunkte		erkennbare Fließgeschwindigkeit		eventuell geringere Rohrfüllung		keine Sedimentation		keine Sedimentation		keine Sedimentation		keine Sedimentation		keine Sedimentation													
gezielt		kürzeste optimale Fließstrecke		kürzeste optimale Fließstrecke		Trennung von alkalischen Wässern		Vermeidg. Wasser-Beton-Kontakt		kürzeste optimale Fließstrecke		Getrennthalten interagierender Wasser		definierte Sedimentationspunkte		definiertes Fließweg		planmäßig keine Turbulenzen		keine störenden Diskontinuitäten		ungestörte Durchleitung		Unterstützung der Wirkung		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes			
ungestört		max. Verzögerung / keine künstliche Beschleunigung der Einstellung der GGW's (minimale Phasengrenzfläche Wasser-Luft)		minimale Phasengrenzfl. Wasser-Luft		Vermeidung des Kontakts mit störenden Stoffen / Materialien		minimale Phasengrenzfl. Wasser-Luft		Getrennthalten interagierender Wasser		definierte Sedimentationspunkte		planmäßig keine Turbulenzen		keine störenden Diskontinuitäten		ungestörte Durchleitung		Unterstützung der Wirkung		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes							
Vermeidung von Ruhewasserstrecken und Senken		Reduktion der Verweilzeit des Wassers		Reduktion Verweilzeit + Biofilmbildung		Reduktion Verweilzeit + gezielte Ableitung		u. U. Reduktion Verweilzeit am Beton		Reduktion Verweilzeit des Wassers		Verhindg. Eindampfung von Drainagewasser		vollständige Entleerung der Leitungen		Verhindg. Eindampfung von Drainagewasser		fließendes Wasser transportiert den Wirkstoff		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes									
optimale Rohrfüllung		optimierte Phasengrenzfläche durch optimales Wasseroberflächen-Volumen-Verhältnis		optimales Volumen-Umfang-Verhältnis		optimierte Phasengrenzfläche		kein Einstau der Sickeröffnungen, somit kein Rückstau an versinterungsrelevante Baustoffe		optimierte Phasengrenzfläche		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		definierte prüfbare Rohrfüllung		fließendes Wasser transportiert den Wirkstoff		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes											
Aufstau (Vollanstau) (keine versinterungs-relevanten Baustoffe einstauen!)		Verdrängung der Drainageluft		Einstellg. gebirgs-ähnlicher Druckverhältnisse		Verdrängung der Gasphase		<b>Kontraproduktiv bei Rückstau des Wassers an versinterungsrelevante Baustoffe</b>		Verdrängung der Drainageluft		Vermeidg. des Trockenfallen		evtl. Messeinrichtungen notwendig		<b>Kontraproduktiv, da Entleeren der Leitungen notwendig</b>		fließendes Wasser transportiert den Wirkstoff bis an die Sickerschlitz		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes									
Druckhaltung (keine versinterungs-relevanten Baustoffe einstauen!)		Verhindg. Erwärmg. der Drainageluft		Verhindg. Abtransport CO <sub>2</sub> -haltiger Drainageluft		Verhindg. durch Wasserdampfsättigung		<b>Kontraproduktiv durch Rückstau des Wassers an versinterungsrelevante Baustoffe</b>		Verhindg. v. Luftaustausch + Luftzirkulation		Abzug Sedimente im Siphon am Einlauf		<b>Kontraproduktiv, da regelmäßige Inspektion u. Wartung erforderlich; Siphons abnehmbar</b>		Abzug Sedimente im Siphon am Einlauf		fließendes Wasser transportiert den Wirkstoff bis an die Sickerschlitz		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes									
Verhinderung von starken Luftströmungen infolge Verkehr u. natürlicher Druckdifferenzen		Behinderung v. Luftaustausch Tunnelndrainage + Vermeidg. künstl. Vergrößerung d. Phasengrenzfläche		Behindg. Abtransport Wasserdampf		Behindg. CO <sub>2</sub> -Nachschub durch Luft		weitgehend druckluftdichte Abdeckungen des EWS nötig		Verhindg. v. Luftaustausch + Luftzirkulation		Abzug Sedimente im Siphon am Einlauf		<b>Kontraproduktiv, da regelmäßige Inspektion u. Wartung erforderlich; Siphons abnehmbar</b>		Abzug Sedimente im Siphon am Einlauf		fließendes Wasser transportiert den Wirkstoff bis an die Sickerschlitz		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes									
Unterbindung des Luftaustauschs zwischen Tunnelndrainage u. Atmosphäre-Drainage		Verhindg. Erwärmg. der Drainageluft		Verhindg. Abtransport CO <sub>2</sub> -haltiger Drainageluft		Verhindg. durch Wasserdampfsättigung		höherer Aufwand durch hermetischen Abschluss des EWS		Verhindg. v. Luftaustausch + Luftzirkulation		Abzug Sedimente im Siphon am Einlauf		<b>Kontraproduktiv, da regelmäßige Inspektion u. Wartung erforderlich; Siphons abnehmbar</b>		Abzug Sedimente im Siphon am Einlauf		fließendes Wasser transportiert den Wirkstoff bis an die Sickerschlitz		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes									
Verhinderung der Untermischung v. Luft durch Vermeidung v. Abstürzen und Diskontinuitäten		kein künstl. beschleun. Temperaturausgleich		kein künstl. beschleun. Konzentrationsausgleich		kein Eintrag von Blasen (Absorptionskeime)		kein künstl. Sauerstoffeintrag		keine künstl. vergrößerte Phasengrenzfl.		versinterungsneutrale Gerinne anstatt Abstürze auf Betonflächen		kein künstl. beschleunigter CO <sub>2</sub> -Eintrag		weniger Sedimentationsmöglichkeiten		Reduktion lokaler Versinterungsschwerpunkte		geringere Störung der Gleichgewichte		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes							
Verhinderung der Blasen(keim)bildung		keine Vergrößerung d. Phasengrenzfläche		keine künstl. beschleunigt. Blasenbildung		keine künstl. beschleunigt. Blasenbildung		keine künstl. vergrößerte Phasengrenzfl.		keine künstl. vergrößerte Phasengrenzfl.		versinterungsneutrale Gerinne anstatt Abstürze auf Betonflächen		kein künstl. beschleunigter CO <sub>2</sub> -Eintrag		weniger Sedimentationsmöglichkeiten		Reduktion lokaler Versinterungsschwerpunkte		geringere Störung der Gleichgewichte		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes							
getrennte Ableitung interagierender Wasser		Trennung von wärmeren Wässern		u. U. getrennte Abführung unter Vollfüllung		u. U. getrennte Abführung unter Druck		Trennung nährstoffreicher Wasser		u. U. getrennte Abführung unter Vollfüllung		Trennung von alkalischen Wässern / Verhinderung Rückstau durch Querausleitung d. überschüssigen Wassers		Trennung von CO <sub>2</sub> -reichen Wässern		getrennte Fassung und Ableitung		Abtrenng. von Sedimenten		eindeutigere Ergebnisse von Wasserproben		Verhindg. starker Versinterungsschwerpunkte		Verhindg. interaktionsbedingter Ablagerungen		Red. Versinterungsmenge / Individualität des Wassers		flexible Anpassung des Entwässerungsregimes		durch schnelle gezielte Wasserableitung (s. u.)		Trennung von alkalischen Wässern		Verhindg. Intensivierung d. Baustoffkontakts; kein Rückstau		Trennung + individuelle Maßnahmen		Trennung + individuell e Maßnahmen		Vermeidg. Trockenfallen + Sedimentation		temporäre Umleitung des Wassers		Trockenlegen möglich		Anpassung d. Entwässerungsregimes	
Vermeidung der Erwärmung des Drainagewassers		Vermeidg. Abnahme CO <sub>2</sub> -Löslichkeit		Vermeidg. Rückgang GGW-Konstante		Vermeidg. Beschleunigung der Teilchenbewegung		weniger Verdunstungswärme		langsamere Elutionsprozesse im sekund. EWS		langsamere Diffusionsprozesse		Verdunstung ↓ Austrocknung ↓		Vermeidg. lokaler Biofilme		Vermeidg. Ansidlg. kalkstrukturbildender Organism.		leichtere Entfernung von Organismen		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht							
Verhinderung von Unterdruckstrecken (saugender Abfluss)		Reduktion der Absolutdruckabnahme		geringe Reduktion der Verdunstung		Vermeidg. Festsetzen v. Mikroorganismen		Vermeidg. pH-Änderung durch Mikroorganismen		ungestörte Wasserableitung (s. o.)		Vermeidg. Ansidlg. kalkstrukturbildender Organism.		leichtere Entfernung von Organismen		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht							
biologisch neutrale, gut zu reinigende Rohrmaterialien mit glatter Oberfläche		ungestörte Wasserableitung (s. o.)		Vermeidg. Festsetzen v. Mikroorganismen		Vermeidg. pH-Änderung durch Mikroorganismen		ungestörte Wasserableitung (s. o.)		Vermeidg. Ansidlg. kalkstrukturbildender Organism.		leichtere Entfernung von Organismen		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Vermeidg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht							
Vermeidung des Baustoffkontakts (im primären, u. sekundären EWS)		Vermeidg. Carbonatisierung von Portlandit		Vermeidg. Elution v. alkal. Stoffen		Verhindg. Elution löslicher Bestandteile		Verhindg. Anreicherung d. Wasser mit Portlandit		Verhindg. Auftreten portlandit-haltiger, alkal. Wasser		Verhindg. Auftreten portlandit-haltiger, alkal. Wasser		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht		Verhindg. oberfläch. anhaftend. Kalkschicht							

### 2.3.1 Rohrleitungen – Material, Wandung, Form, Dimensionierung

#### Materialien

Die in Tunnelbauwerken eingesetzten Entwässerungsleitungen müssen hinsichtlich ihres Einsatzes entsprechende Eigenschaften (u.a. Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit, Wasserdichtigkeit, geringe Wandrauigkeit etc.) aufweisen.

Für das lagegenaue Verlegen der Leitungen ist eine hohe Formstabilität der Rohre erforderlich. Zusätzlich ist ein hoher Widerstand gegen starke Reinigungsbeanspruchungen durch hydromechanische und mechanische Reinigungsgeräte wie z. B. Ketten- oder Seilschleudern notwendig, weshalb die Rohre aus schlagfestem, nicht sprödem Material bestehen sollen. (Gamisch, et al., 2007)

Auch wegen des geringen Gewichtes, großer Längen und Unempfindlichkeit gegenüber Abwasser und somit guter Handhabung bestehen die Rohrleitungen aus Kunststoffmaterialien. Für Entwässerungsleitungen kommen Materialien aus Polyvinylchlorid ohne Weichmacher (PVC-U), Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) und Polypropylen (PP) zur Anwendung. (Bölke, 2013)

Für drucklose Entwässerungsleitungen in österreichischen Tunnelbauwerken wird die Verwendung von PP als Rohrmaterial gegenüber PE-HD und PVC-U nahegelegt. Druckrohre aus selbigen Rohrmaterialien können bei technischer Gleichwertigkeit ebenfalls eingesetzt werden (Tabelle 7).

Tabelle 7. Geeignete Rohrmaterialien lt. Richtlinie Tunnelentwässerung, 2010

Rohrmaterial	Nenn-Ringsteifigkeitsklasse	zugehörige Norm
PP	SN 8	ÖNORM EN 1852-1
HD-PE	SN 8	ÖNORM EN 12666-1
PVC-U	SN 8*	ÖNORM EN 1401-1

#### Wandung

Für die Instandhaltung des EWS ist auch der Wandungsaufbau der Entwässerungsleitungen entscheidend. Als Abwasserleitungen wurden außen als auch innen gewellte Rohre bzw. innen und außen eben ausgeführte Rohre verwendet. Diese bestehen aus einem homogenen Material. Auch Verbundrohre sind in bestehenden Tunnelbauwerken anzutreffen. Verbundrohre können aus einem glatten Innenrohr und einem quergewellten Außenrohr bestehen. Sie sind nur im Bereich der Wellentäler miteinander verschweißt. Letztere werden aufgrund möglicher Fertigungsschäden (schlechte Verbundwirkung), Anfälligkeit gegenüber hohen Wasserdrücken zufolge Reinigungstätigkeiten und der allgemein geringen Widerstandsfähigkeit des Innenrohrs (Schlagfestigkeit) im Tunnelbau nicht mehr verwendet (Gamisch, et al., 2007).

Nach Gamisch, et al., (2007) sollte aus versinterungstechnischer Sicht die Rohrrinnenseite immer eben und glatt ausgeführt sein und keinesfalls gewellte Innenflächen aufweisen. Letztere erzeugen turbulente Strömungen und beschleunigen somit die Versinterungs-

entstehung. Zusätzlich erschweren die Wellen aufgrund ihrer Geometrie einen effektiven Reinigungsvorgang.

„Mit hydraulischen und hydromechanischen Reinigungsgeräten ist es schwer, mit mechanischen Rohreinigungsgeräten nahezu unmöglich, die Ablagerungen effizient und rohrschonend aus den Wellentälern zu entfernen.“ (Gamisch, et al., 2007)

Nach dem Stand der Technik werden schlagfeste, einschichtige, vollwandige Rohre mit hoher Eigensteifigkeit verwendet.

### **Rohrform**

Eine runder Rohrquerschnitt ist aufgrund der geringeren Phasengrenzfläche zwischen Drainagewasser und Drainageluft einem Hufeisenprofil vorzuziehen. Eine große Wasser-Gasphasengrenzfläche fördert den Ausgleich des Kohlendioxid-Diffusionsgleichgewichtes zwischen Drainagewasser und Drainageluft. Erhebliche Versinterungserscheinungen können dadurch sowohl bei kohlendioxidreichen als auch bei portlandtreichem Drainagewasser erfolgen. Zugleich verstärkt eine große Oberfläche die Verdunstung von Drainagewasser und führt zu dessen Verdickung. Ein Hufeisenprofil verstärkt somit künstlich die Versinterungsgefahr. Die Wartung von Rohren mit Hufeisenprofil im Vergleich zu einem Rundprofil ist auch intensiver. Bestehende Drainagerohre mit Hufeisenprofil sollten daher bei zukünftigen Instandsetzungsmaßnahmen durch Rohre mit einem runden Querschnitt ersetzt werden. (Gamisch, et al., 2007)

Die Wassereintrittsöffnungen von Drainagerohren sollten immer als Schlitz (Sickerschlitz) ausgeführt und im gleichmäßigen Abstand über dem Scheitelbereich der Rohre verteilt sein. Runde Eintrittsöffnungen bergen die Gefahr durch Steine der Sickerpackung teilweise bis ganz verschlossen zu werden. Diese Gefahr ist bei geschlitzter Ausführung wesentlich geringer. Rundum geschlitzte Drainagerohre sind aufgrund des Wiederversickerns für Entwässerungssysteme ungeeignet. (Gamisch, et al., 2007)

Drainagerohre mit *breiten* Sickerschlitz sind wegweisend für die Ausführung von dauerhaft funktionsfähigen und wirtschaftlich instand zu haltenden Tunnelentwässerungssystemen. Bei einem möglichen konstanten Versinterungsaufkommen dauert es länger bis die breiten Schlitz zuwachsen. Aufgrund der geringeren Kapillarwirkung bei breiten Schlitz kann das Wasser schneller abtropfen bzw. abfließen als bei schmalen Schlitz bevor Verdunstungs- und Gasaustauscheffekte zu Versinterungen in den Schlitz führen. Auch das Aufbrechen bestehender Versinterungen während der Drainagespülung ist aufgrund der größeren Oberfläche der breiten Schlitz energetisch günstig. (Gamisch, et al., 2007)

Rohre mit Sickerschlitz bei deren Herstellung das Entgraten der Schnittkanten nicht durchgeführt wurde, ermöglichen eine längere punktuelle Verweildauer des Drainagewassers. Eine Verdunstung mit Ausfällung gelöster Stoffe (Versinterung) an diesen Stellen ist die Folge.

„Im Gotthard-Basistunnel (Eisenbahntunnel, NEAT, Schweiz) kommen HD-PE-Rohre mit 10 mm breiten Sickerschlitzen, die gleichmässig [sic!] über den Scheitelbereich angeordnet sind, zum Einsatz.“ (Gamisch, et al., 2007)

Die Schweizerische Bundesbahnen - SBB (2010) geben in ihren Ausführungs- und Qualitätsvorschriften für die Tunnelentwässerung für Drainagerohre unter anderem eine Mindestschlitzbreite von 8 mm und das Entgraten von Schlitzen und Stößen auf der Innenseite der Rohre vor. Um die Rohrstatik nicht unnötig zu schwächen sind bei Verwendung von HD-PE-Rohren (HighDensity-Polyethylen) die Schlitzöffnungen kerbfrei (gerundet) auszuführen und ein entsprechendes Schlitzbild einzuhalten.

In Österreich ist laut Richtlinie Tunnelentwässerung (2010) die Ausführung der Rohröffnungen geschlitzt (Schlitzbreite: 5 – 10 mm) als auch gebohrt (Bohrdurchmesser: 10 – 15 mm) möglich. Eine geschlitzte Ausführung soll jedoch bevorzugt zur Anwendung kommen. Die Wassereintrittsfläche muss beim Teilsickerrohr (Öffnungswinkel:  $220^\circ$ ) mind.  $200 \text{ cm}^2/\text{m}$  und beim Mehrzweckrohr (Öffnungswinkel:  $120^\circ$ ) mind.  $100 \text{ cm}^2/\text{m}$  betragen.

Mit der ÖNORM B5141:2020 – Sickerleitungsrohre aus Kunststoff für Verkehrswege- und Tiefbau – Anforderungen und Prüfungen wurden die bestehenden Kanalrohrnormen um einen speziellen Anwendungsbereich der Sickerrohre erweitert.

Vollrohr – unperforiertes Rohr (UP), Vollsickerrohr (TP), Teilsickerrohr (LP) und Mehrzweckrohr (MP) werden hinsichtlich ihrer Ausführung und Einsatzbereich klar definiert (Abbildung 2).

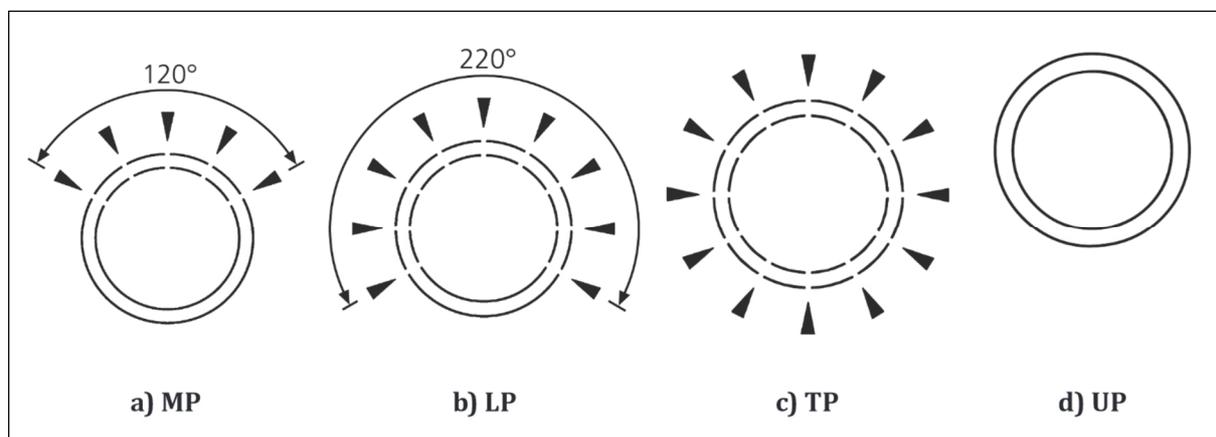


Abbildung 2. Perforationsarten (Wassereintrittsöffnungen); Quelle: ÖNORM B 5141:2020

Schlitzweiten bzw. Lochdurchmesser von Sickerleitungen für das Anwendungsgebiet mit höheren Anforderungen (VTH), wie z. B. Tunnelbau, werden in drei möglichen Größen angegeben (Tabelle 8).

Tabelle 8. Perforationsweiten in Anlehnung an ÖNORM B5141:2020

Schlitzbreite	Lochdurchmesser	Toleranz
mm	mm	mm
1,2 <sup>1</sup>	-	+/-0,4
2,5 <sup>1</sup>	-	+/-0,4
5,0	10,0	+1,0/-0,5
8,0	12,0	+1,0/-0,5
10,0	15,0	+1,0/-0,5

<sup>1</sup> nicht anwendbar im Einsatzbereich VTH

Die Wassereintrittsfläche betreffend ist, neben den aus der Richtlinie Tunnelentwässerung bekannten Werten für Teilsicker- und Mehrzweckrohre, zusätzlich eine Sonderform – Rohre mit Sonderperforation (SP) eingeführt worden. Für spezielle Randbedingungen kann hiermit eine optimale Bemessung der Drainageleitung erfolgen (Tabelle 9).

Tabelle 9. Wassereintrittsflächen in Anlehnung an ÖNORM B5141:2020-04

Perforationsart	Wassereintrittsfläche cm <sup>2</sup> /m <sup>1</sup>	
	Einsatzbereich VT	Einsatzbereich VTH
MP	≥ 100	≥ 100
LP	≥ 100	≥ 200
TP	≥ 100	≥ 200
SP	ist zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer zu vereinbaren	

<sup>1</sup> ausgenommen DN/OD 110, DN/OD 125, DN/ID 100, DN/ID 125 mit einer Wassereintrittsfläche von mindestens 50 cm<sup>2</sup>/m

### Dimensionierung

Um eine Versinterungsgefahr in Tunnelentwässerungen zu begrenzen, muss sowohl die Phasengrenzfläche zwischen Drainagewasser und Drainageluft minimiert als auch die Durchmischung des Drainagewassers mit Luft vermieden werden. Die Zugänglichkeit für Rohrreinigungsgeräte, Kanalkamera als auch Instandsetzungsgeräte muss gewährleistet sein. (Gamisch, et al., 2007)

Nach Gamisch, et al., (2007) sollten die Leitungen aufgrund der, während des Vortriebs tatsächlich angetroffenen und gemessenen Bergwassermengen sowie des, aus der geologischen und hydrogeologischen Voruntersuchung bekannten höchstmöglichen Grundwasserstandes hydraulisch vordimensioniert werden. Um Verdunstungs- und Gasaustauscheffekte gering zu halten ist eine Überdimensionierung der Rohrquerschnitte zu vermeiden. Weiters ist zur Erzielung einer optimalen Wartungs- und Instandhaltungsfähigkeit des Tunnelentwässerungssystems ein bestimmter Mindestdurchmesser nicht zu unterschreiten. Entstehende Versinterungen sollen eine gewisse Fläche einnehmen können, ohne den Wasserabfluss und die Wartung der Leitungen innerhalb wirtschaftlicher Instandhaltungsintervalle zu behindern. Auch eine spätere Querschnittsreduktion durch Instandsetzungsmaßnahmen wie z. B. partielle Edelstahl-Inliner ist zu ermöglichen.

Sowohl Chabot, et al., (2000) als auch Gamisch, et al., (2007) geben an, dass Rohre bzw. Ulmendrainagen von Tunnelentwässerungsanlagen einen Nenndurchmesser von DN 200 mm

nicht unterschreiten sollen. Die Richtlinie Tunnelentwässerung (Österreich) gibt für Straßentunnel je nach Zweck und Randbedingung genaue Mindestdurchmesser vor (Tabelle 10).

Tabelle 10. Mindestdurchmesser für Rohre des sekundären Entwässerungssystems in Straßentunnel  
lt. Richtlinie Tunnelentwässerung, 2010

Zweck bzw. Randbedingung	Rohrausführung	Außendurchmesser (DN/OD) mm
Ulmendrainagen (beidseitig)	Teilsickerrohr (Regelfall) Mehrzweckrohr (Sonderfall)	≥ 250
- untergeordneter Zweck; Tunnel oberhalb GW-/Bergwasserspiegel	Teilsickerrohr (Regelfall) Mehrzweckrohr (Sonderfall)	≥ 160
Sohl- Tragschichtdrainage	Teilsickerrohr	≥ 160
Bergwassersammelleitung - kombiniert mit Tragschichtdrainage	Vollrohr Mehrzweckrohr	≥ 315
Sohlentwässerung	Teilsickerrohr Mehrzweckrohr	≥ 315

Die Richtlinie Tunnelentwässerung gibt an, die hydraulische Bemessung von Rohrleitungen nach Prantl-Colebrook durchzuführen, die der statischen nach ÖNORM EN 1295-1.

### Querableitungen

Querableitungen dienen zum Ableiten des Drainagewassers aus den Schächten der Ulmendrainageleitungen in die der Bergwassersammelleitung (ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010).

Nach Gamisch, et al., (2007) können Querausleitungen sehr hilfreich sein, um unterschiedlich mineralisierte, interagierende Wässer voneinander getrennt abzuführen und so die Versinterungsentstehung durch Mischung dieser Wässer verhindern zu können. Die Einleitung des Drainagewassers kann über manuelles Öffnen oder Schließen der Querleitungseinläufe oder durch Überlaufschwellen in den Gerinnen der Schächte der Ulmendrainageleitungen erfolgen. Überlaufschwellen ermöglichen es stets eine bestimmte Rohrfüllung zu halten, bevor es zur Querableitung kommt (Abbildung 3).

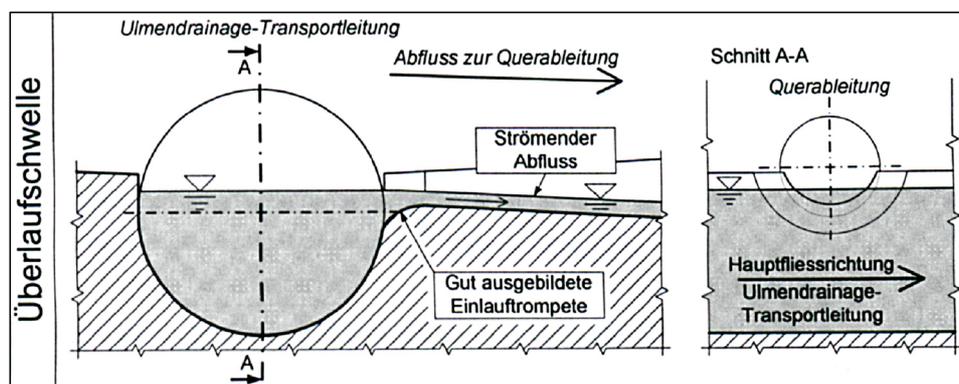


Abbildung 3. Ausführung einer Überlaufschwelle; Quelle: Gamisch, et al., (2007)

### 2.3.2 Kontroll- und Reinigungsschächte

Der Kontakt zwischen Berg- bzw. Drainagewasser und zementgebundenen Baustoffen sollte hinsichtlich Versinterungsentwicklung auf ein absolutes Minimum begrenzt werden. Polymerbeton bietet hierfür eine mögliche Alternative. Werden Systemelemente aus zementgebundenem Beton hergestellt, sollte deren Oberfläche mit einem versinterungsneutralen Überzug versiegelt werden. (Gamisch, et al., 2007)

In Österreich werden die Schachtsohlen im Regelfall aus Betonfertigteilen mit integrierten, abwasserbeständigen Kunststoffeinsätzen hergestellt (Abbildung 4), alternativ auch in Ortbetonweise. Hierbei werden die Rohrstränge durch den Schachtbereich gelegt und nach Fertigstellung des Schachtes aufgeschnitten. Die Übergänge – Schachtkörper und Rohr sind mit dichten Systemrohrverbindungen auszuführen. Mögliche Querausleitungen in Schächten erfolgt über eine Überlaufschwelle. (ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010)

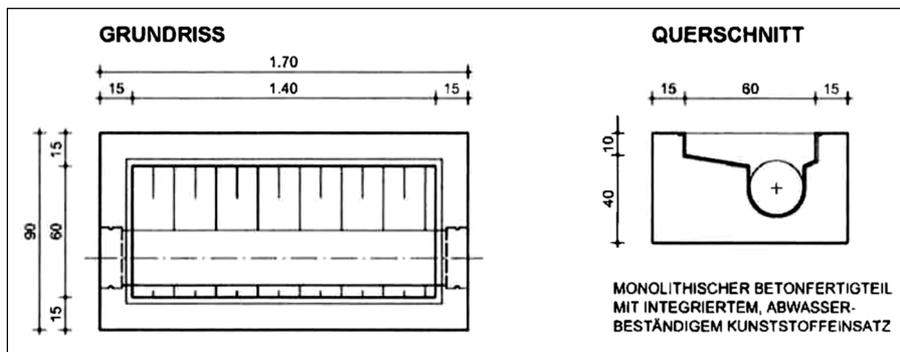


Abbildung 4. Kontroll- und Reinigungsschacht einer Ulmendrainage in Nische;  
Quelle: Richtlinie „Tunnelentwässerung“, 2010

Gamisch, et al., (2007) und die RVS 09.01.23 führen an, dass der Schachtabstand 100 m nicht übersteigen soll.

Laut der Richtlinie Tunnelentwässerung sollen die Schächte der Ulmendrainage in einem konstanten Vielfachen der Blocklänge der Tunnelinnenschale positioniert werden. Ferner sollen die Schächte in nicht befahrbaren Bereich oder in Nischen angeordnet werden (Abbildung 5).

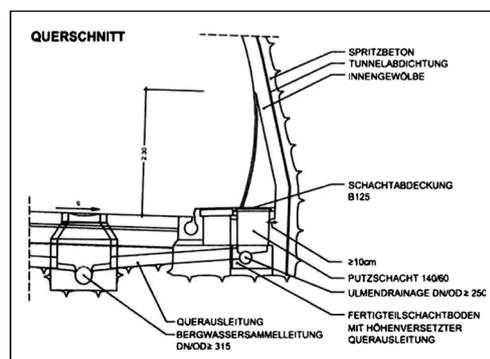


Abbildung 5. Kontroll- und Putzschacht in Nische und Fahrbahn mit Querausleitung,  
Quelle: Richtlinie „Tunnelentwässerung“, 2010

Die Kontroll- und Putzschächte der Ulmendrainagen in Nischen haben je nach Tiefe der Sohle unterschiedliche Abmessungen. Die Schächte der Sohl-/Tragschichtdrainage werden in runder Form ausgeführt (Tabelle 11).

Tabelle 11. Regelabmessungen von Kontroll- und Reinigungsschächten in Straßentunnel  
lt. Richtlinie „Tunnelentwässerung“, 2010

Einsatzbereich	Tiefe cm	Regelabmessung cm
Ulmendrainage	≤ 50	40 x 140 (mind. 100)
	≥ 50	60 x 140 (mind. 100)
Sohl-/Tragschichtdrainage	-	Ø mind. 100 mit Konus 100/60

Nach der Richtlinie Tunnelentwässerung werden die Schächte der Bergwassersammelleitungen in gleichen Abständen wie die der Ulmendrainage angeordnet. Die Ausführung wird, wie bei den Ulmendrainageschächten, aus Betonfertigteilen oder alternativ auch in Ort betonbauweise ausgeführt. Die Schachtsohlen werden, um den Baustoff-Bergwasser-Kontakt zu unterbinden, mit integrierten, abwasserresistenten Kunststoffeinsätzen beschichtet (Abbildung 6).

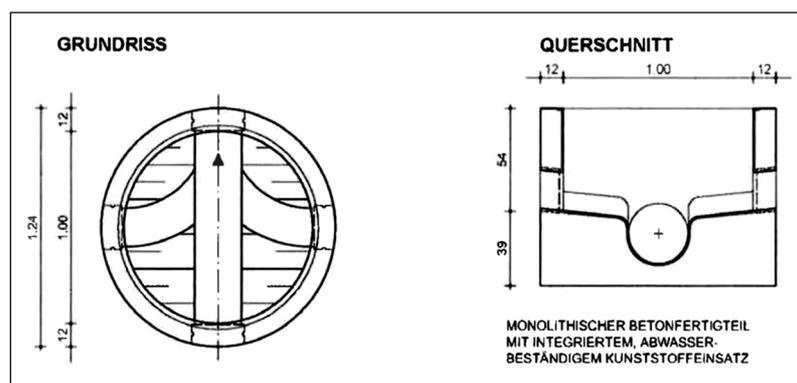


Abbildung 6. Kontroll- und Reinigungsschachtsohle einer Sammelleitung in Fahrbahn;  
Quelle: Richtlinie „Tunnelentwässerung“, 2010

Nach Gamisch, et al., (2007) sollen Schachtabdeckungen luftdicht ausgeführt, sowie leicht und schadfrei zu öffnen und zu schließen sein. Luftdichte Abdeckungen müssen mit einem Verriegelungssystem ausgestattet sein, das bei Luftdruckschwankungen im Tunnel die Dichtigkeit des Schachtdeckels gewährleistet und ein Öffnen bzw. Abheben der Deckel verhindert.

In Straßentunneln werden Schachtabdeckungen aus Gusseisen mit Kugelgraphit gemäß ÖNORM EN 153 eingesetzt. Diese sollen vorzugsweise verriegelbar oder verschraubbar, tagwasserdicht ausgeführt und mit einem hohen Korrosionwiderstand versehen sein. Im befahrbaren Bereichen werden Schachtabdeckungen der Klasse D 400 bzw. B 125 in nicht befahrbaren Bereichen gemäß ÖNORM EN 124-1:2015 eingesetzt. (ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010)

Bei Neubau- und Instandsetzungsmaßnahmen werden Schachtabdeckungen in nicht befahrenen Bereichen wie z. B. Nischen aus nicht rostenden Materialien ausgeführt (Abbildung 7). Im Vergleich zu gusseisernen Schachtabdeckungen ist deren Öffnen und Schließen mit weit weniger physischem Aufwand verbunden. Ein Anrosten der Befestigungsschrauben ist bei dieser Ausführung nicht möglich.

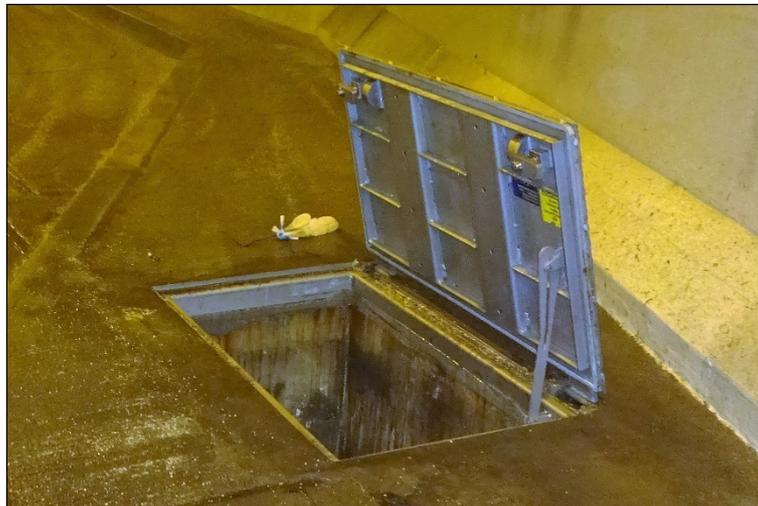


Abbildung 7. Nachgerüstete Schachtabdeckung in nicht rostender Ausführung;  
Grenztunnel Füssen, 2019

## 2.4 Wartungsverfahren am sekundären Entwässerungssystem

In versinterungsgefährdeten Tunnel treten Versinterungen im gesamten Entwässerungssystem auf. Ihr Auftreten lässt sich in unterschiedlicher Menge und Festigkeit voneinander unterscheiden. Deshalb wird immer das gesamte Tunnelentwässerungssystem in regelmäßigen Abständen gereinigt. Ein Unterlassen einer regelmäßigen Reinigung kann die Funktionsweise der Gebirgsdrainage beeinträchtigen. So kann, durch Unterlassen einer regelmäßigen Reinigung, ein Anwachsen der Versinterung bis zum Vollverschluss der Drainageleitung führen. (Gamisch, et al., 2007)

Wird der Bergwasserabfluss durch eine eingeschränkte Entwässerung behindert, baut sich ein Wasserdruck im Gebirge und auf den Tunnel auf. Dieser Wasserdruck bedeutet eine zusätzliche Belastung. Bei frei drainierten Tunnel ist die Tunnelschale i. d. R. nicht auf diese zusätzliche Belastung bemessen. Diese zusätzliche Belastung gefährdet die Standsicherheit des Tunnelbauwerks. Das Freihalten des Entwässerungssystems von Versinterungen ist aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit sowie der Tragsicherheit von immenser Bedeutung. (Gamisch, et al., 2007)

Für die Wartung des sekundären Entwässerungssystems gibt es unterschiedlichste Verfahren, die sich in Hinblick auf die Versinterung in postsedimentäre und präsedimentäre Wartungsverfahren einteilen lassen.

### 2.4.1 Postsedimentäre Wartungsverfahren

Für die Entfernung von Versinterungen werden bekannte Rohrreinigungsverfahren und -geräte aus der Abwassertechnik genutzt. Je nach deren Wirkungsprinzip werden diese in hydraulische, hydromechanische und mechanische Reinigungsverfahren unterteilt. Bei der Wahl eines optimalen Reinigungsverfahrens ist ein zügiges und wirtschaftliches Lösen der Ablagerungen einschließlich einer minimalen Belastung der Rohrwandung ausschlaggebend. Dies ermöglicht eine lang andauernde Funktionsfähigkeit des sekundären Entwässerungssystems. (Gamisch, et al., 2007)

Die Richtlinie „Tunnelentwässerung“ (ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010) hält als Wartungsziel nachfolgendes fest.

- die vollständige Funktionalität der Tunnelentwässerungsanlage
- Rohrwandungen frei von Ablagerungen
- Schächte frei von Ablagerungen
- Schlitzte zu 80 % frei von Ablagerungen

Wobei der Reinigungserfolg unmittelbar mittels mitlaufender Kamerakontrolle zu überprüfen und gegebenenfalls die Reinigung der Haltung bis zum Erreichen des Wartungsziels zu wiederholen ist.

#### **Hochdruckreinigung**

Bei geringen bis mittleren Ablagerungsmengen mit geringen bis mittleren Festigkeiten sowie hohen Ablagerungsmengen mit geringen Festigkeiten kommt die Hochdruckspülung (HD-Spülung) zum Einsatz. (Gamisch, et al., 2007)

Bei der Hochdruckreinigung wird die reinigende Wirkung ausschließlich durch Wasserstrahlen erzielt. Die Wasserstrahlen werden über Düsen mit unterschiedlichen Düsenkörperformen und unterschiedlichen Düseneinsätzen gesteuert.

Bei diesem Spülverfahren werden Drücke von 15 bis 40 MPa an der Pumpe bzw. 10 bis 20 MPa am Spülkopf (Düse) mit Gesamtwassermengen von 300 bis 600 l/min eingesetzt. Höchstdruckreinigung (Düsendrücke über 40 MPa) sind bei der Wartung von Tunnel drainagen nicht einzusetzen, sondern nur bei Instandsetzungsmaßnahmen. Ferner sind, vor dem Einsatz einer Hochdruckspülung sowie bei der Wahl der Werkzeuge, die verwendeten Rohrmaterialien auf ihre Widerstandskraft zu überprüfen. Dies gilt besonders bei der Reinigung von Teilsicker- und Mehrzweckrohren. (ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010)

Die Ausführung der Spülköpfe (Abbildung 8) wird nach ihrer Wirkungsmethode in hydraulische und hydromechanische Ausführung unterteilt. Deren Bezeichnung ist weder genormt noch von den Herstellern einheitlich benannt. Ihr Einsatz ist immer von der Menge

und Festigkeit der Ablagerungen, der Beschaffenheit der Rohre (Material, Form, Art) und der Schächte sowie der Leistungsfähigkeit der Spülgeräte und Pumpen abhängig. Die optimale Reinigungswirkung, sowohl wirtschaftlich als auch funktionell, ist im besonderen Maße von der Erfahrung der ausführenden Fachkraft abhängig. So wird die Wahl des „richtigen“ Werkzeuges zumeist durch eine Probspülung festgelegt. (ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010)

				
Kugeldüse	Zugdüse	Granatdüse	Bombendüse	Torpedodüse
				
Tandemdüse	Stocherdüse	Sohlenreiniger	Lenkdüse	Schiebekameradüse
				
Vibrationsdüse	Rotierdüsen	Vibrationsrotierdüse	Rotationsdüse	Bergedüse
				
Powerrotierdüse	Umlenkgerät - OK	Schlauchumlenkrolle	Umlenkrolle flexibel	Schlauchtreibdüse

Abbildung 8. HD-Reinigungsspülköpfe und Zubehör;  
Quelle: [www.ehele-hd.com/produkt-kategorie/hochdruck-rohrreinigung](http://www.ehele-hd.com/produkt-kategorie/hochdruck-rohrreinigung)

### Mechanische Reinigungsverfahren

Ein Reinigungserfolg von Versinterungen mit hohen bis sehr hohen Festigkeiten und geringen bis mittleren Mächtigkeiten lässt sich nur mit mechanischen Reinigungsverfahren erzielen. Hierfür werden Ketten- bzw. Seilschleuderer verwendet. Die Reinigungswirkung wird durch radial geschleuderte Ketten oder Seile erzielt. Die Schleuderer arbeiten bei einem Druck von bis zu 10 MPa und weisen einen Wasserverbrauch von 100 bis 700 l/min auf. Eingesetzt dürfen Ketten- und Seilschleuderer nur in runden Rohren aus Materialien mit hoher Schlagzähigkeit

und Elastizität werden, andernfalls werden die Rohrwandungen stark geschliffen bzw. spröde Rohre aufgeschlagen. (Gamisch, et al., 2007)

Die Entfernung von massiven, sehr festen Versinterungen ist nur noch mittels Fräsen möglich. Die Reinigungswirkung wird durch radial rotierende Fräsköpfe erzielt. Beim Schlagbohrfräsen sind auf den Fräsköpfen einzeln auswechselbare Fräszähne angeordnet, die mit Diamanten oder Hochleistungsschnellarbeitsstahl besetzt sind (Abbildung 9). Sie arbeiten mit einem Wasserdruck an der Pumpe von 12 bis 15 MPa. Der Einsatz von Fräsköpfen kann nur in Rohrleitungen mit schadensfreien Wandungen und geradlinigen Verläufen eingesetzt werden. Ansonsten ist die Gefahr für das Verlaufen des Bohrkopfes außerhalb der Rohrquerschnitts in die Rohrbettung zu groß. (Gamisch, et al., 2007)

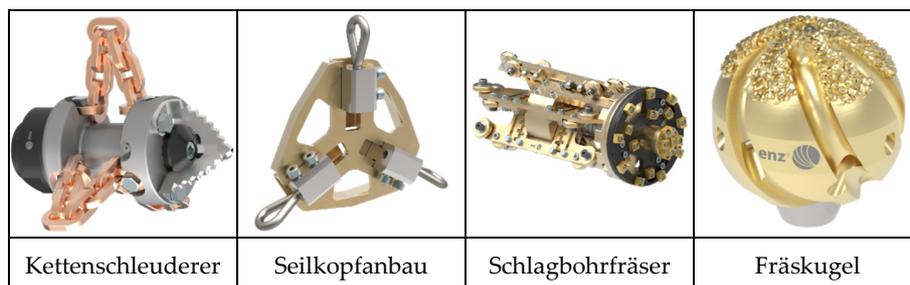


Abbildung 9. Mechanische Reinigungswerkzeuge;  
Quelle: [www.enz.com/de/unsere-produkte/kanalreinigung](http://www.enz.com/de/unsere-produkte/kanalreinigung)

Zusätzlich zu den oben erwähnten Werkzeugen werden für Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten auch Fräsroboter verwendet.

### **Vorgaben für den Einsatz der Reinigungswerkzeuge lt. Richtlinie „Tunnelentwässerung“, (ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010)**

- Die für das Reinigen der Rohrwandungen eingesetzten Spülwerkzeuge müssen auch für das zerstörungsfreie Freilegen der Sickerschlitze auf die komplette Rohrwanddicke geeignet sein (z. B. Flachstrahlspülköpfe).
- Die Vorschubgeschwindigkeit ist zu überwachen – Freiläufe (Druckaufbau durch Zurückhalten des Schlauches und dann plötzliches Freilassen um die Aufprallwucht des Kopfes zu erhöhen) sollen vermieden werden.
- Die fortlaufende Überwachung der Pumpendrucke erlaubt ein Erkennen von Unregelmäßigkeiten – etwa kann ein plötzlicher Druckanstieg auf Rohrverschlüsse hinweisen oder ein geringer Pumpendruck auf abgenutzte oder zu große Düsensätze deuten.
- Der Pumpendruck muss langsam reduziert werden, da bei plötzlichem Druckabfall die – mitunter sehr schweren – Spülköpfe auf die Rohrsohle herabfallen und diese beschädigen können.

- Kettenschleuderköpfe sind in Tunnel drainagen mit Ketten aus flexiblen Rundgliedern zu verwenden.
- Gliederketten dürfen nur mit einer Außenrolle eingesetzt werden, deren Durchmesser die äußersten Kettenglieder überragt, sodass nur die Außenrolle Kontakt mit der Rohrrinnenwandung hat.
- Die Führungsschlitten (Kufenführung, Käfig) von Kettenschleudern ist auf den Rohrdurchmesser einzustellen und die Ketten sollen bündig mit dem Käfig sein.
- Die Beobachtung des Rückspülwassers zeigt, ob und welches Material gelöst wird. Bei Auftauchen von Kies könnten Teile des Drainagekörpers bei einer Beschädigung gelöst worden sein.

In der Regel sind die Hochdruck-Spülungen mit begleitender Kamerakontrolle zur laufenden Kontrolle des erreichten Reinigungserfolges durchzuführen. Spülköpfe mit direkt aufgesetzter Kamera ermöglichen den Verzicht auf einen eigenen Kamerawagen. Es ist jedoch im Einzelfall zu prüfen, ob solche Werkzeuge für die erforderliche Reinigungsmethode robust genug sind.

Die Verwendung eines Spülfahrzeuges mit Recyclingeinrichtung (Spül- und Saugereinrichtung) kann die Mitnahme von zusätzlichen Wassertanks ersparen, es ist jedoch zu prüfen, ob die Menge der zu erwartenden Ablagerungen die Kapazität des Feststofftanks nicht übersteigt.

Beim Spülen mit Recycling-Wasser muss Folgendes beachtet werden:

- es können nur speziell geeignete Spülköpfe mit Keramikdüsen einsetzen verwendet werden
- es müssen Teile des Spülguts durch die Hochdruckanlage gefördert werden und
- es wird die Innenwandung der Rohre aufgeraut.

### 2.4.2 Präsedimentäre Wartungsverfahren

Die Entstehung von Versinterungen kann durch chemische Verfahren beeinflusst werden. Für die präsedimentäre Wartung von Tunnelentwässerungsanlagen werden Kristallisationsinhibitoren, welche die härtebildenden Ionen zwar nicht aus dem Lösungsgleichgewicht entfernen, aber die Kristallbildung unterbinden bzw. hemmen, eingesetzt. Sie wirken bereits in unterstöchiometrischer Konzentration, sodass bereits geringe Mengen dieses Wirkstoffs die Entstehung von Versinterungen stören, hemmen oder verhindern. Darüber hinaus beeinflussen Inhibitoren die Form entstehender Kristalle aktiv und somit ihre Festigkeit. (Gamisch, et al., 2007)

„Zur wirksamen präventiven Beeinflussung der Versinterungsentstehung in Tunnelentwässerungssystemen eignet sich, aufgrund der spezifischen Systemeigenschaften der Entwässerungssysteme und aufgrund der Anforderungen an die Umweltverträglichkeit und die biologische Abbaubarkeit des Wirkstoffs, welche aus der direkten Ableitung des Wassers in die Umwelt resultieren, nach heutigen Erkenntnissen der Inhibitor Polyasparaginsäure (PAsp).“ (Gamisch, et al., 2007)

### **Härtestabilisation des Drainagewassers durch Polyasparaginsäure**

Das Einbringen des Wirkstoffs in das sekundäre Entwässerungssystem (Konditionierung) ist in flüssiger oder fester Form möglich und bedarf einer Bewilligung. Für die Einhaltung umweltrelevanter Anforderungen ist das Wasserrechtsgesetz (WRG 1959) sowie die Allgemeine Abwasseremissionsverordnung (AAEV 1996) einzuhalten.

„Die auftretenden Konzentrationen der Inhaltstoffe im Drainagewasser können über die gegebenen Tunnelparameter (Hydrogeologische Verhältnisse, Wasserchemismus, Bauweise), die geplante Menge an Härtestabilisatoren und der Auflösengeschwindigkeit der Härtestabilisatoren projektspezifisch prognostiziert werden. Die zulässigen Konzentrationen sind auf die Vorflutverhältnisse [sic!] abzustimmen. Bei den eingesetzten Wirkstoffen ist jedoch darauf zu achten, dass die maximale Konzentration, ab der die Bildung von heterotrophen Mikroorganismen durch die Wirkstoffe selbst gefördert wird, nicht überschritten wird.“ Richtlinie „Tunnelentwässerung“, (ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010)

Bei der Verwendung von Härtestabilisatoren mit dem Wirkstoff Polyasparaginsäure ist zu erwarten, dass

- aufgrund von Adsorption der Säure an Kristallen bzw. -keimen und durch Dispergierung von Einzelkristallen, es zu einer Verringerung der Versinterungsmenge kommt.
- zufolge der veränderten Kristallisationsprozesse neu entstandene Versinterungen andere strukturelle und mechanische Eigenschaften aufweisen, als vor dem Einsatz von Härtestabilisatoren.
- angesichts der Adsorption von Polyasparaginsäure und eines oberflächenbegrenzten Säureangriffs auf feste Versinterungen, besonders durch den Einsatz von festen Härtestabilisatoren mit dem Wirkstoff Polysuccinimid, vorhandene Versinterungen partiell an- bzw. aufgelöst werden. (Gamisch, et al., 2007)

Bei der *Flüssigkonditionierung* wird der Wirkstoff mittels Dosierpumpe dem Drainagewasser am Beginn der Entwässerungsstrecke beigegeben. Dieses Konditionierungsverfahren benötigt über das gesamte EWS eine konstante Wassermenge von  $Q \geq 3 \text{ l/s}$  mit einer Mindestfließgeschwindigkeit von  $v \approx 0,3 \text{ m/s}$ . Dies ist der Grund, warum eine reine Flüssigkonditionierung ein gesamtes EWS nicht vollständig behandeln kann. (Gamisch, et al., 2007)

Nach Gamisch, et al., (2007) sind bei dem Einsatz von flüssigen Härtestabilisatoren nachfolgende Punkte zu beachten:

1. Für die Errichtung der Dosieranlage (inkl. Vorratstank) ist nahe der Dosierstelle ein ausreichend großer Raum mit einem Stromanschluss vorzuhalten.
2. Eine durchgängige, ununterbrochene Wasserführung durch die zu konditionierende Entwässerungsstrecke muss gewährleistet sein.
3. Das Mischungsverhältnis von konditioniertem zu unkonditioniertem Wasser darf weder durch planmäßige noch durch unplanmäßige Ableitungen gestört werden. Eine Unter- bzw. Überdosierung ist eine Folge von Schwankungen der Wassermenge bzw. der Mineralisation des Berg- bzw. Sickerwassers. Derzeit besteht kein Dosiersystem, das die Wirkstoffdosierung in Abhängigkeit von der Menge an Drainagewasser und seiner Mineralisation regelt.
4. Die Drainagewassermenge muss jahreszeitlich weitestgehend konstant bleiben.
5. Die Drainagewassermenge an der Dosierstelle von flüssiger, 40%iger Natrium-Polyaspartat-Lösung soll stets mindestens  $3 \text{ l/s}$  und eine Mindestfließgeschwindigkeit von etwa  $0,3 \text{ m/s}$  aufweisen.
6. Die Mineralisation des Bergwassers, auf der zu konditionierenden Entwässerungsstrecke, darf über das Jahr keine großen Schwankungen aufweisen. Zusätzliche, lokal auftretende Versinterungen aufgrund starker Schwankungen der Mineralisation des Bergwassers können durch den Einsatz fester Härtestabilisatoren vermieden werden.
7. Eine Flüssigkeitskonditionierung kann auf starke, lokale Mineralisationsschwankungen nicht reagieren. Mehrere Dosierstellen sind nur bei sehr langen Tunneln wirtschaftlich.

Bei der *Depotsteinkonditionierung* ist der Wirkstoff Polysuccinimid in Tablettenform akkumuliert. Die Depotsteine können in allen zugänglichen Stellen des sekundären EWS eingelegt werden. (Gamisch, et al., 2007)

„Sobald die Polysuccinimid-Depotsteine Kontakt mit dem Drainagewasser haben, reagiert das Polysuccinimid chemisch mit dem Wasser zum Wirkstoff Polyasparaginsäure.“ (Gamisch, et al., 2007)

Die Freisetzung des Wirkstoffs wird überwiegend durch den pH-Wert, der Temperatur sowie durch die Wassermenge des Drainagewassers bestimmt. Zur Abschätzung der Dosierung von Härtestabilisator-Steinen kann die nachfolgende Grafik (Abbildung 10) angewandt werden. (ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010)

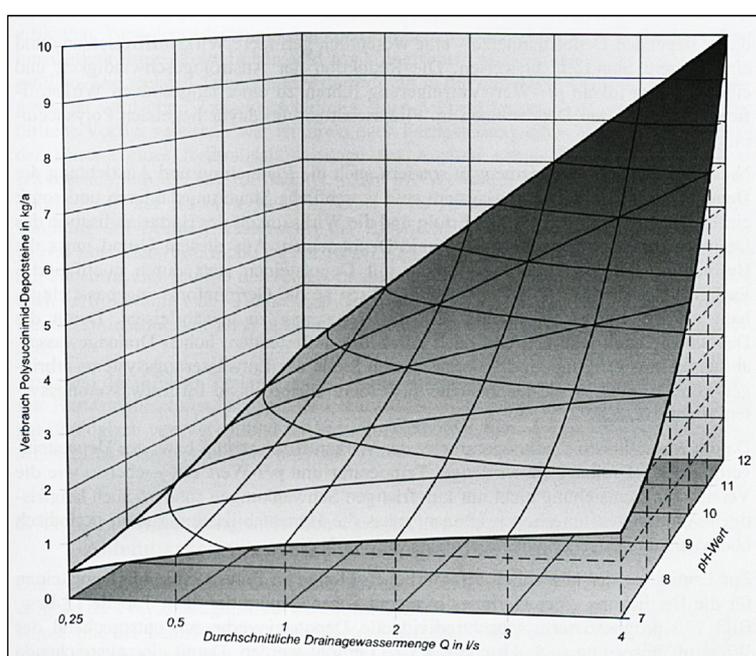


Abbildung 10. Jährlicher Verbrauch an Polysuccinimid-Depotsteinen in einem Fließgerinne in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Drainagemenge und dem pH-Wert des Drainagewassers; Quelle: Gamisch, et al., 2007

Flüssige und feste Konditionierungsmittel haben ihre Vor- und Nachteile (Tabelle 12). Während die Depotsteinkonditionierung bei Bestandstunnel älterer Ausführung jederzeit zur Anwendung kommen kann, ist für die Flüssigkonditionierung entsprechender Raum vorzuhalten. Eine Leitungsverlegung von der Dosierstation hin zur Dosierstelle ist bei Bestandstunnel mit einem zusätzlichen nicht unerheblichen Aufwand verbunden.

Tabelle 12. Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der Fest- und Flüssigkonditionierung in Anlehnung an Richtlinie „Tunnelentwässerung“, 2010

Kriterium	Flüssigkeitskonditionierung	Depotsteinkonditionierung
Raumbedarf in Tunnel	für Dosierstation ist Nische oder Raum in Querschlag erforderlich	kein zusätzlicher Platzbedarf im Tunnel erforderlich
Wassermenge	weitgehend konstant über Entwässerungsstrecke und immer wasserführend	keine Einschränkung (Autodosierung), auch bei zeitweisen Trockenfallen der Leitung
Wasserchemismus	weitgehend konstant über Entwässerungsstrecke	prinzipiell keine Einschränkung (Autodosierung), bei erhöhtem pH-Wert geringere Standzeit bei derzeit eingesetzten Produkten
Anzahl der Dosierstellen	möglichst wenig Dosierstellen	individuelle Konditionierung, bei jedem Schacht
Aufwand	zu Beginn hoher Installationsaufwand; geringer Wartungs- u. Betriebsaufwand	periodisch wiederkehrender Aufwand bei der Bestückung mit Depotsteinen; kein Wartungsaufwand
Wirkung und Produkte	zahlreiche Produkte verfügbar, die bei unterschiedlichem Chemismus und Umgebung funktionieren und die auf eine individuelle Tunnelumgebung abstimmbare sind	eingeschränkte Anzahl an Produkten verfügbar, die unter Tunnelbedingungen dauerhaft funktionieren
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anlagekosten + Installation</li> <li>- Härtstabilisationslösung</li> <li>- Stromverbrauch</li> <li>- Anlagenwartung</li> <li>- Kosten steigen mit Anzahl der stationierten Anlagen (i.d.R. weniger stark als mit Deposteinkonditionierung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Härtstabilisator-Steine</li> <li>- Bestückung je Zugabestelle</li> <li>- Die Kosten steigen mit der Anzahl der bestückten Schächte</li> </ul>

### 3 Evaluerte Tunnelbauwerke

Für die Bestandserhebung von Wartungsaufwänden des sekundären EWS wurden drei Tunnelbauwerke ausgewählt (Abbildung 11 bzw. Tabelle 1). Nachfolgende Kapitel beschreiben die jeweiligen Bauwerke nach ihrer Lage, Bauweise, Geologie bzw. Hydrogeologie, dem vorhandenen sekundären EWS sowie den prä- und postsedimentären Wartungsverfahren.

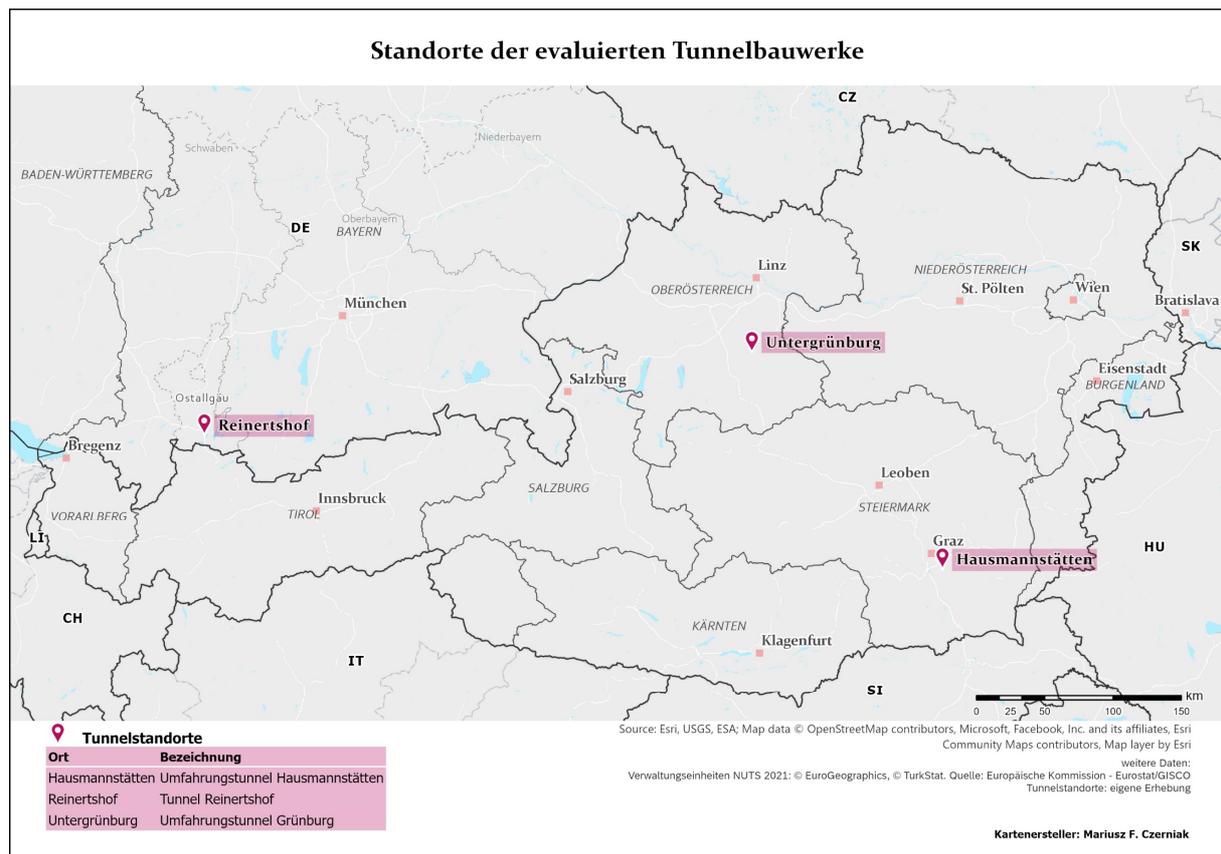


Abbildung 11. Übersicht der evaluierten Tunnelbauwerke und deren geografische Lage

Weiters wird die im sek. EWS herrschende bzw. angetroffene Versinterungsproblematik thematisiert. Um mögliche Zusammenhänge und Gründe der Versinterungsursachen aufzuzeigen bzw. vergleichbar zu machen, wurde der erfasste Wartungsaufwand (Dauer der einzelnen Spülungen des sek. EWS) als Spülgeschwindigkeit von Haltung zu Haltung grafisch dargestellt und soweit es die Datenlage zulässt, der Geologie bzw. Hydrogeologie, der Bautechnik und dem sek. EWS gegenübergestellt. Die Spülgeschwindigkeit [m/min] eines Spülabschnitts errechnet sich aus dem Verhältnis der Länge des durchfahrenen bzw. gespülten Leitungsabschnitts [m] und der gemessenen Spüldauer [min]. Als Spüldauer ist die Zeitspanne ab Einfahren des Spülschlauchs in die Drainageleitung (Beginn des Spülvorgangs) bis zum Eintreten des Spülerfolgs bzw. Herausfahren des Spülschlauchs aus der Drainageleitung (Ende des Spülvorgangs) definiert. Als Ende des Spülvorgangs kann auch ein Spülabbruch gewertet werden. Mit der Gegenüberstellung der Spülgeschwindigkeit wird der Wartungsaufwand an Drainagesystemen zueinander vergleichbar.

### 3.1 Umfahrungstunnel Hausmannstätten

#### Allgemeines

Der Umfahrungstunnel (UT) Hausmannstätten „Tunnel Himmelreich“, ist ein 1045,45 m langer einröhriger zweispuriger Straßentunnel und Teil der Umfahrung der Gemeinde Hausmannstätten, Steiermark (Abbildung 12). Im Westen schließt er an die bestehende Kirchbacher Straße, B 37 Richtung Graz an, unterfährt den Bergrücken Himmelreich und mündet im Osten wieder in die B 37. Im Juli 2012 wurde der Tunnel in Betrieb genommen. Für die Instandhaltung und den Betrieb des Tunnels ist die Straßenmeisterei Graz-Süd zuständig.

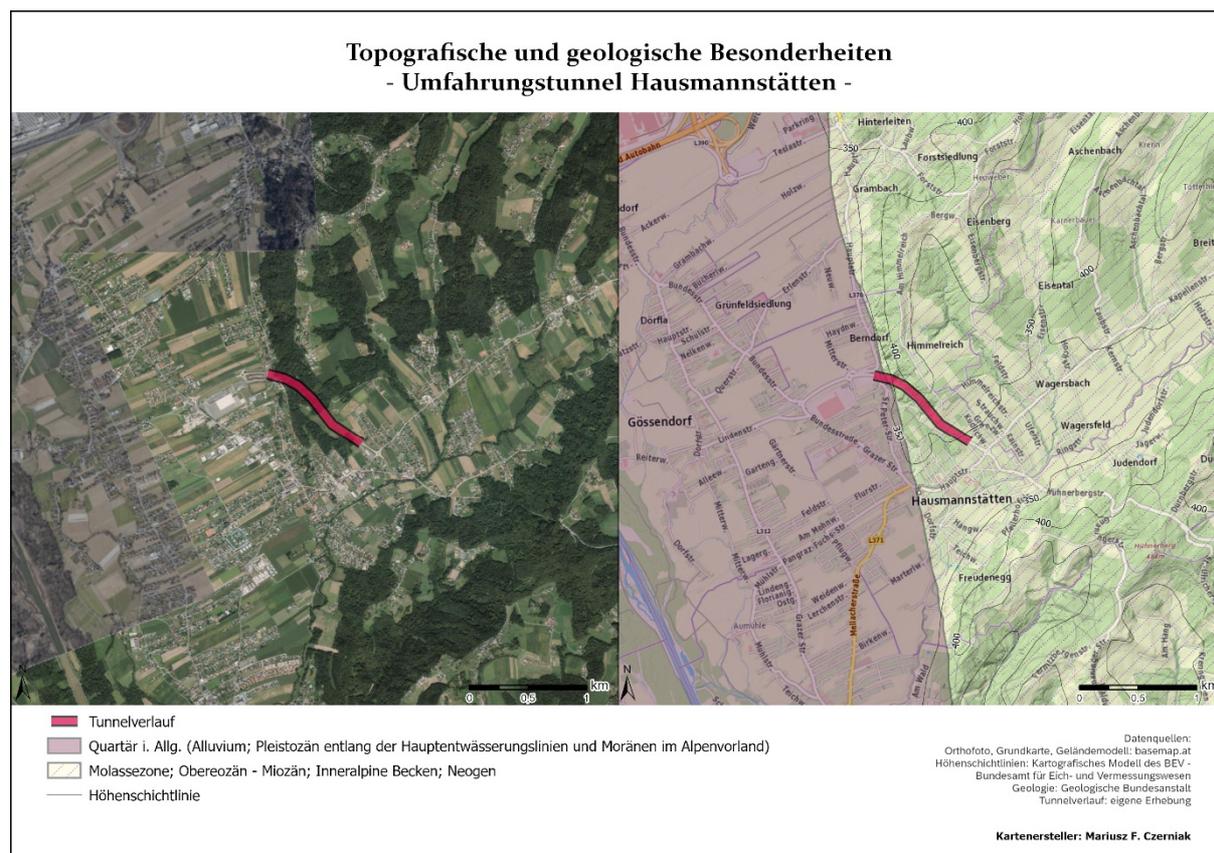


Abbildung 12. Topografische und geologische Besonderheiten; UT Hausmannstätten

#### Bautechnik

Zum Zweck der geologischen und hydrogeologischen Erkundung wurde beginnend am westlichen Portal (KM 10+070 = TM 0) ein etwa 742 m langer Stollen in den Berg vorgetrieben. Dieser wurde bereits 2006 fertiggestellt. In der Bauphase wurde dieser Erkundungstunnel auf den Tunnelvollquerschnitt aufgeweitet. (Reichard, et al., 2011)

996,45 m des 1045,45 m langen Tunnels wurden in bergmännischer Bauweise (TM 0 bis TM 996,45), die verbleibenden 49 m bis zum Ostportal (KM 11+115,45 = TM 1045,45) in offener Bauweise hergestellt (Amt d. stmk. Landesregierung).

Der gesamte bergmännische Abschnitt wurde ab TM 75 vom Westportal in Vortriebsrichtung mit einem Sohlgewölbe aufgefahren, wobei die Sohle aufgrund des Quelldruckes bewehrt

ausgeführt. Der gesamte bergmännische Tunnel wurde mit einer 30 cm starken Betoninnenschale hergestellt. Um die Abluft über den zentral situierten Entlüftungsschacht gemäß Lüftungskonzept abführen zu können, wurde eine Zwischendecke im mittleren Abschnitt des Tunnels eingezogen (TM 240 bis TM 804). Vom Haupttunnel ausgehend wurde bei TM 486 ein etwa 30 m langer Querschlag errichtet, der mit einem Axialventilator und E-Technik-Räumen für Nieder- und Mittelspannung ausgestattet ist. Am Ende dieses Querschlags befindet sich der etwa 46 m hohe Entlüftungsschacht bzw. Fluchtbauwerk. Davon ragen annähernd 18 m über die Geländeoberkante. (Das Land Steiermark, 2012)

### **Geologie und Hydrogeologie**

Der Tunnel durchfährt das steirische Neogen und Quartär und weist im mittleren Bereich (TM 230 bis TM 580) die höchsten Überlagerungen von 30 bis 50 m auf. Von TM 0 bis TM 73 liegen vorwiegend Schluffe, Sande und Kiese in weicher bis steifer Konsistenz bzw. lockerer bis mitteldichter Lagerung vor. Ab TM 73 bis TM 710 sind vorrangig Feinkornablagerungen des Neogen mit mürben bis sehr mürben Schluff-, Ton- und Sandsteinen anzutreffen mit einer steifen bis festen Konsistenz. Verstärkt eingelagerte Grobkornsedimente mit einer mitteldicht bis sehr dichten Lagerung treten auf. Ein Übergangsbereich vom Neogen ins Quartär liegt im Bereich von TM 710 und TM 780 vor. Es treten Fein- und Grobkornablagerungen des Neogen (mürbe bis sehr mürbe Schluffe, Tone, und Sandsteine mit steifer bis fester Konsistenz) sowie Fein- und Grobkornablagerungen des Quartär (Schluffe, Sande und Kiese in überwiegender weicher bis steifer Konsistenz bzw. lockerer bis mitteldichter Lagerung) auf. Von TM 780 bis zum Ostportal treten vorwiegend Fein- und Grobkornablagerungen des Quartär auf. (Amt d. stmk. Landesregierung, 2007)

Von TM 0 bis TM 710 herrschen bergfeuchte bis lokal trockene Gebirgsverhältnissen, abschnittsweise auch tropfende bis schwach rinnende Wasserzutritten. Die Gebirgsdurchlässigkeit ist im Allgemeinen mit der Gesteinsdurchlässigkeit gleichzusetzen. Stärkere Wasserzutritte (kurzfristig 0,1 – 0,2 l/s) sind lokal an Ankerbohrungen bzw. allfällige Spieße gebunden, wobei eine rasche Abnahme auf tropfende bzw. schwach rinnende Wasserzutritte (< 0,5 l/s) zu erwarten ist. Der geologische Übergangsbereich vom Neogen zum Quartär (TM 710 und TM 780) und das Quartär (TM 780 bis TM 1045,45) sind stärker wasserführend. Die Wasserzutritte sind an die feinkornreichen Sand- und Kieshorizonte gebunden. Aus Anker- und Rohrschirmbohrungen bzw. Spießen sind schwach bis stark rinnende Wasserzutritte zu erwarten gewesen. Ein Abnehmen der lokalen Wasserzutritte auf < 0,5 l/s war zu erwarten. Die prognostizierte mittlere Bergwassermenge beträgt nach dem Vortriebsende 2 – 3 l/s (Amt d. stmk. Landesregierung, 2007).

### **Sekundäres Entwässerungssystem**

Die Entwässerung des Tunnels wird als Trennsystem ausgeführt. Die im Tunnel anfallenden Fahrbahnwässer (Tunnelwaschwasser, Löschwasser, Havariewasser etc.) werden über die Fahrbahnentwässerung zu der am Westportal situierten Gewässerschutzanlage abgeleitet und mobil entsorgt. Das Berg- bzw. Sickerwasser wird über die gesamte Tunnellänge beidseitig durch Ulmendrainagen gefasst und entsprechend der Tunnelgradiente zum Weltportal ausgeleitet, wo sie in einem Schacht zusammengeführt werden. Von diesem wird das abgeleitete Wasser über Vollrohre in ein Verrieselungsbecken bei KM 9+900 ausgeleitet. Die Ulmendrainagen sind geschlitzte Teilsickerrohre aus PP mit einem Nenndurchmesser von 250 mm. (Amt d. stmk. Landesregierung)

Im Bereich der offenen Bauweise (Ostportal) liegen die Drainageleitungen außerhalb des Tunnelgewölbes auf einer 5 cm dicken Mörtelbettung und sind mit einer gebundenen Sickerpackung bedeckt (Abbildung 13).

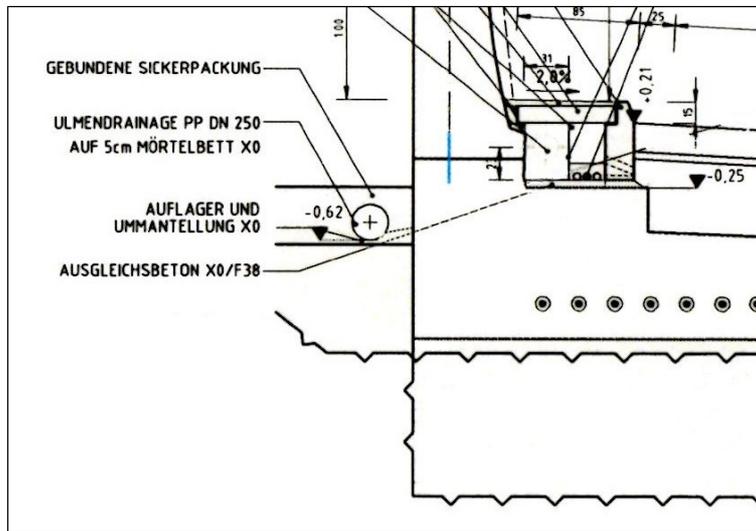


Abbildung 13. Ausführung der Ulmendrainage in offener Bauweise; UT Hausmannstätten;  
Quelle: Straßenmeisterei Graz-Süd

In dem bergmännisch durchfahrenen Bereich wurden die Teilsickerrohre in einem 5 cm Mörtelbett auf dem Ortbetonsohlgewölbe eingebettet und ebenfalls mit einer gebundenen Sickerpackung bedeckt (Abbildung 14).

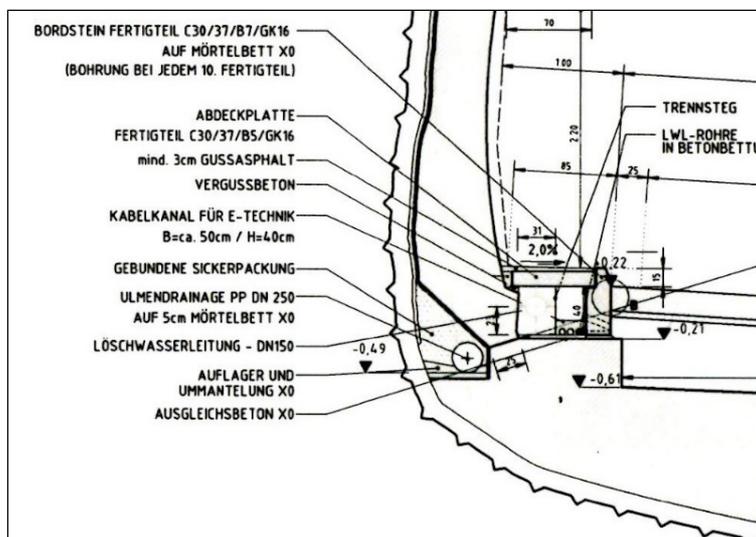


Abbildung 14. Ausführung der Ulmendrainage in bergmännischer Bauweise; UT Hausmannstätten;  
Quelle: Straßenmeisterei Graz-Süd

Auf der Länge des Querschlags wurden beidseits an den Ulmen Teilsickerrohre zur Fassung des Berg- bzw. Sickerwassers verlegt. Diese enden kurz vor dem Entlüftungsschacht in zwei Putzschächten in Ortbetonbauweise. Etwaiges oberflächlich durchsickerndes Bergwasser im Bereich des Entlüftungsschachtes wird über eine quer zum Querschlag verlaufende

Entwässerungsrinne gefasst und über eine kurze Querausleitung in die Ulmendrainage übergeführt (Abbildung 15).



Abbildung 15. Bild 1: Entwässerungsrinne vor dem Entlüftungsschacht; Bild 2: Querausleitung der Entwässerungsrinne in die Ulmendrainage des Querschlag; UT Hausmannstätten

Die Ulmendrainagen im Tunnel sind über Fertigteilschächte, die in Putznischen im Ulmenbereich integriert sind, erreichbar (Abbildung 16). Die Putznischen beginnen beidseits bei TM 69,45 und sind in einem regelmäßigen Abstand von 72 m auf die restliche Tunnellänge verteilt. Lediglich im Bereich der offenen Bauweise (Ostportal) weisen sie einen Abstand von 60 m auf.



Abbildung 16. Putznische mit abgedecktem Fertigteilschacht; UT Hausmannstätten

Die Fahrbahntwässerung beginnt bei TM 987 südlich der Tunnelachse. Es handelt sich hierbei um ein PP-Rohr mit einem Durchmesser von 400 mm. Ihr Verlauf wechselt die Seite entsprechend der Querneigung des Tunnels. Bei TM 955 quert sie die Tunnelachse und verläuft nördlich dieser bis TM 669 wo es wieder zu einem Wechsel der Lage kommt. Die Fahrbahntwässerung verläuft die verbleibende Tunnellänge weiterhin südlich der

Tunnelachse bis sie außerhalb des Westportals in einem Putzschacht mit der Frostkofferdrainageleitung zusammengeführt wird und dann in der Gewässerschutzanlage (GSA) mündet. Die Frostkofferdrainageleitung ist über die gesamte Tunnellänge verlegt. Die Leitung ist aus PP hergestellt und weist einen Durchmesser von 150 mm auf. Sie verläuft parallel und leicht erhöht zur Fahrbahntwässerung. Die Frostkofferdrainage wie auch die Fahrbahntwässerung sind über Putzschächte erreichbar. Diese sind in Fertigteilbauweise ausgeführt. (Amt d. stmk. Landesregierung)

### **Prä- und postsedimentäre Wartung des sekundären EWS**

Die Wartung des Drainagesystems des Umfahrungstunnel Hausmannstätten erfolgt zweimal jährlich im Abstand von sechs Monaten. Die Wartungstätigkeiten werden auf zwei aufeinanderfolgenden Nächten durchgeführt. Hierfür wird der gesamte Tunnel gesperrt. In dieser Zeit wird der aufkommende Verkehr über den Ort Hausmannstätten geleitet. (administratives Personal 1, persönliche Kommunikation, 19. März 2019) Das Wartungspersonal besteht aus drei Personen und einem Spülfahrzeug (Abbildung 17).



Abbildung 17. Spülfahrzeug und Wartungspersonal der Straßenmeisterei Graz-SÜD;  
UT Hausmannstätten

Das Spülfahrzeug wird für den Einsatz in den Zentralwerkstätten der Straßenmeisterei mit Wasser aufgetankt. Jede weitere notwendige Wasseraufnahme im Laufe der Wartung erfolgt an den Hydranten, die in den Feuerlöschnischen des Tunnels installiert sind. Vor der Spülung der Drainageleitung wird eine Reinigung der Putznische mittels Hochdruckreiniger durchgeführt. Nachfolgend wird der Deckel des Schachtes geöffnet. Falls in den Halbschalen des Fertigteilsschachtes Härtestabilisatoren eingebracht sind, werden diese entfernt (Abbildung 18). Danach wird der Spülschlauch mit der Düse in die Drainageleitung gegen die Abflussrichtung eingeführt.



Abbildung 18. Entfernung der abgebauten Härtestabilisatoren; UT Hausmannstätten

Die Spülung des gesamten Drainagesystems erfolgt mit einer Bombendüse mit acht rückwertig symmetrisch angeordneten Düsen (Abbildung 19). Der aufgebrachte Wasserdruck liegt am Spülfahrzeug im Bereich von 130 bis 140 bar. Dies ermöglicht einen entsprechenden Vorschub des Düsenkopfes. Die Geschwindigkeit des Vorschubs wird über eine Bremsenrichtung am Spülfahrzeug gesteuert und beträgt in etwa 1 m/s. Der Vorschub des Spülschlauchs erfolgt 10 m über die nächste Haltung hinaus. Dadurch wird zugleich eine gründliche Reinigung der Schächte ermöglicht. Die Reinigung der Drainageleitung erfolgt über das Einziehen des Spülschlauchs. Die Rückstrahlen der Bombendüse lösen dabei die Verschmutzungen bzw. Ablagerungen von der Rohrwand. Die Einholgeschwindigkeit des Spülschlauchs beträgt in etwa 0,5 m/s, wobei diese immer den gegebenen Vorkommnissen vom Bediener angepasst wird.



Abbildung 19. Bombendüse vor dem Einfahren in die Drainageleitung; UT Hausmannstätten

Nach erfolgter Spülung des jeweiligen Spülabschnittes wird der Fertigteilschacht mit einem Hochdruckreiniger nachgereinigt und sodann verschlossen. Abbildung 20 zeigt das Spülergebnis.



Abbildung 20. Gereinigte Haltung des Drainagesystems; UT Hausmannstätten

Gespült wird von Haltung zu Haltung. Außerhalb des Westportal des Tunnels münden die beidseits verlegten Ulmendrainagen in einen gemeinsamen Schacht. Von diesem aus wird der letzte EWS-Anschnitt des Tunnels gereinigt (Abbildung 21).



Abbildung 21. Zusammenführung der Ulmendrainagen in einen Sammelschacht; UT Hausmannstätten

Von dem unmittelbar anschließendem Putzschacht wird der Sammelschacht der Drainageleitungen gespült. In diesem sammeln sich alle Verunreinigungen bzw. Ablagerungen der gesamten Drainagesystems. Diese werden mit einem am Reinigungsfahrzeugs situierten Absaugschlauch abgesaugt (Abbildung 22).



Abbildung 22. Absaugung der Verunreinigungen aus dem Schlammfang; UT Hausmannstätten

Über die Drainagespülung werden seitens der Straßenmeisterei keine Spülprotokolle angelegt. Die Kontrolle des Spülerfolgs erfolgt optisch aufgrund des sauber abfließenden Spülwassers. Eine Zustandsbeschreibung über die vorkommenden Versinterungen bzw. den Auflösungsgrad der Härtestabilisatoren erfolgte mündlich an das administrative Personal.

In die Gerinne der Haltungen werden feste Härtestabilisatoren (Baypure® DSP Tabs in Netzen zu je 500 g) eingelegt und mit Drähten an der Innenwand befestigt. Das Ausbringen der Härtestabilisatoren wird vom administrative Personal der Betriebsleitung einige Tage nach der durchgeführten Spülung durchgeführt. (administratives Personal 1, persönliche Kommunikation, 19. März 2019) Informationen über Lage und Menge der ausgebrachten Härtestabilisatoren konnten nicht nachweislich übermittelt werden.

Während der Wartungsarbeiten an dem sekundären EWS wird die Dauer der Spülung (auf Minuten gerundet) für jeden Spülabschnitt im Rahmen der Masterarbeit dokumentiert.

### **Versinterungsproblematik des sekundären EWS und deren Zusammenhänge**

Aus Gesprächen mit dem administrativen Personal kommt es in den letzten Jahren zum wiederkehrenden Versinterungsaufkommen vorwiegend in der südseitigen Ulmendrainage des Tunnels im Bereich der Putznischen PN 07 und PN 01 (TM 501,45 bis TM 69,45). Durch regelmäßige Spülungen konnten die Versinterungen nicht gelöst werden. Ein stetiges Anwachsen wurde beobachtet. Durch die Anwendung von festen Härtestabilisatoren (Anordnung im Gerinne der Fertigteilschächte, siehe Abbildung 18) konnte das Anwachsen der Versinterung gestoppt werden. Durch eine wiederholte Überdosierung der festen Härtestabilisatoren konnten die festen, an der Rohrwandung stark anhaftenden Versinterungen so angelöst werden, dass diese durch die Spülwirkung der Wasserstrahlen von der Rohrwandung gänzlich gelöst werden können (vgl. 2.4.2 Präsedimentäre Wartungsverfahren bzw. Abbildung 23). (administratives Personal 1, persönliche Kommunikation, 19. März 2019) Chronologische Aufzeichnungen über Dauer, Lage und Dosierung der festen Härtestabilisatoren in den jeweiligen Haltungen konnten nicht erhalten werden.



Abbildung 23. Abgelöste Versinterungsprobe aus der südlichen Ulmendrainage auf einem 1x1cm Raster; UT Hausmannstätten

Im Zuge der Evaluierung vorgenommene Aufzeichnungen über die Spüldauer der jeweiligen Spülabschnitte wurden im Verhältnis zu diesen gesetzt. Die erhaltenen Spülgeschwindigkeiten [m/min] wurden für jede bergwasserführende Entwässerungsleitung grafisch dargestellt. Diese wurden der Ausführung des sek. EWS, den geologischen bzw. hydrogeologischen Gegebenheiten sowie der Bautechnik, soweit es das Datenmaterial zuließ, gegenübergestellt (Abbildung 24).

Die gleiche Ausführung der beiden Ulmendrainagen hinsichtlich der identischen Anordnung der Putzschächte, Linienführung sowie Dimension u. Material der Entwässerungsleitung lässt einen direkten Vergleich der Spülgeschwindigkeiten zu. Auffälligkeiten sind zwischen im Bereich PN 08 und PN 01 (TM 573,45 bis 69,45) festzustellen. Hier nimmt die Spülgeschwindigkeit der Ulmendrainage Süd im Vergleich zur Ulmendrainage Nord bis PN 05 (TM 357,45) kontinuierlich ab. Der niedrigste Wert von 9,0 m/min besteht im Bereich PN 05 – PN 03. Verglichen mit der Spülgeschwindigkeit von 14,4 m/min liegt dieser deutlich darunter. Im weiteren Verlauf nimmt die Geschwindigkeit über die nächsten Haltungen der Ulmendrainage Süd wieder zu. Aus den zusammengetragenen Daten erscheint der an der Südulme bei TM 486 bestehende Querschlag mit Entlüftungsschacht als markanter Punkt und kann als Ursache für die aufkommenden Versinterungen genannt werden. Während der Bauwerksbegehung konnten über die gesamte Höhe des Entlüftungsschachts Kalkaussinterungen an vielen Stellen der Hohlraumstützung (Ankerpunkte) sowie Leckagestellen in der Spritzbetonwandung beobachtet werden. Der kalkhaltige Ankermörtel kann durch das Sickerwasser im Lauf der Zeit aufgelöst werden und mit diesem am Schacht und Querschlag entlang zu der Ulmendrainage gelangen. Mit den wechselnden physikalischen Bedingungen kommt es in weiterer Folge zu Ausfällungen in der EWS-Leitung.

Ein Unterschied ist auch im Bereich PN 14 bis Ende (offene Bauweise) der beiden Darstellungen festzuhalten (Ulmendrainage Süd: 18,3 m/min; Ulmendrainage Nord: 13,8 m/min). Diese Einzelstelle kann auf das Einarbeiten des Spülpersonals zurückgeführt werden, da nachfolgende Bereiche die gleichen Werte aufweisen.

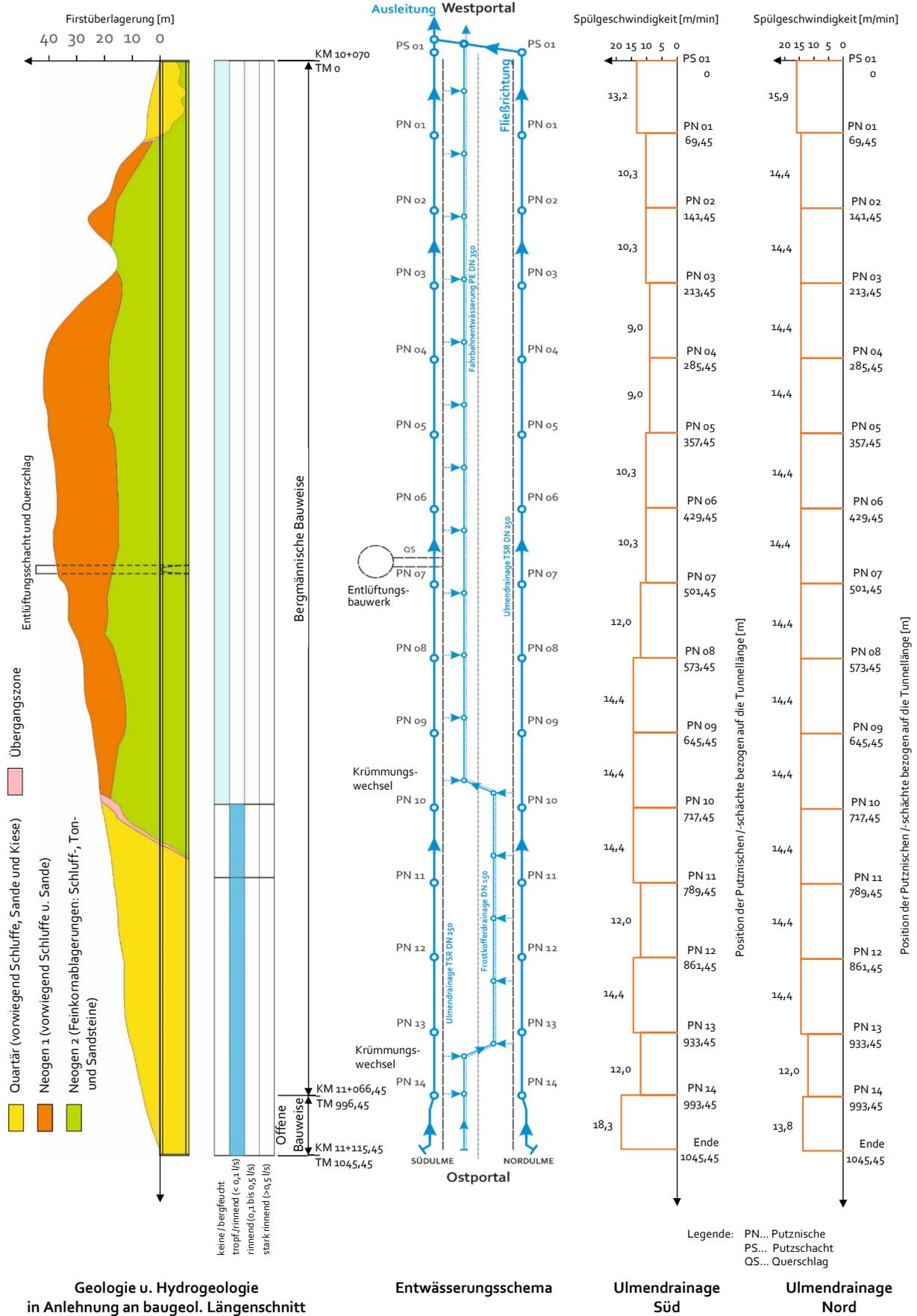


Abbildung 24. Gegenüberstellung von Spülgeschwindigkeiten, sek. EWS, Bautechnik sowie geol. u. hydrogeol. Gegebenheiten; UT Hausmannstätten

### 3.2 Umfahrungstunnel Grünburg

#### Allgemeines

Der Umfahrungstunnel Grünburg ist ein circa 1164 m langer einröhriger zweispuriger Straßentunnel und bildet das Kernstück der Umfahrung der Gemeinde Grünburg, Oberösterreich. Der Tunnel umfährt den Ortskern Untergrünburg im Nordwesten und Westen unter den flach Richtung Westen ansteigenden Talflanken des Steyrtales bzw. alten Terrassenstufen der Steyr (Abbildung 25). (Forstinger, 2008) Er wurde 2008 in Betrieb genommen und wird von der Tunnelbetriebsleitung Gmunden betreut.

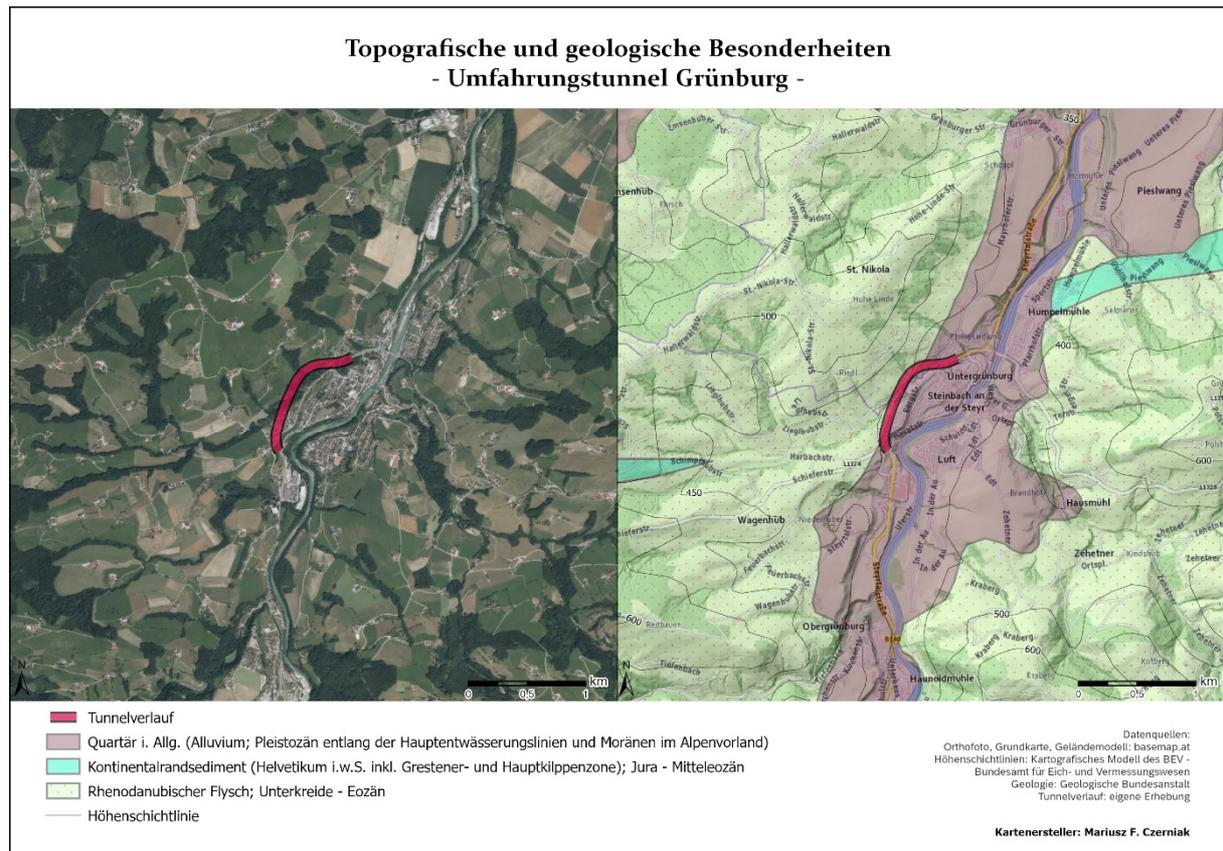


Abbildung 25. Topografische und geologische Besonderheiten; UT Grünburg

#### Bautechnik

Aufgrund der geringen Erfahrung mit dem Flysch als Baugrund für Tunnelbauvorhaben und den im Rahmen der Erkundung festgestellten hohen Anteilen quellfähiger Tonminerale, wurde die Ausführung eines Erkundungsstollen festgelegt. Der ca. 1045 m lange Erkundungsstollen wurde nach der Herstellung der Voreinschnitte im Bereich der beiden Portale im Februar 2002 vom Nordportal aus angeschlagen und im Mai 2003 am Südportal durchgeschlagen. Der Tunnel weist über die gesamte Länge geringe Überlagerungen in einem Bereich von 6 bis 30 m auf. (Stadlmann, 2007)

Das Nordportal (KM 0+556 = TM 0) befindet sich nahe der Straßenkehre der B 140 im nördlichen Ortsgebiet, wo die beiden Gemeinden Waldneukirchen und Grünburg aneinandergrenzen. Das Südportal (TM 1164) liegt im südlichen Ortsgebiet zwischen der

bestehenden B 140 und der Landesstraße nach Oberschlierbach. Die bergmännischen Portale liegen 24 m im Norden (TM 24) bzw. 36 m im Süden (TM 1128) von den späteren Tunnelportalen entfernt. Der bergmännisch nach der NATM aufgefahrene Tunnel hat eine Länge von 1.105 m, die restlichen circa 60 m Tunnel entfallen auf die Luftbogenstrecken an den Portalen bzw. werden in offener Bauweise hergestellt. Der Tunnel weist ein Gefälle von 1,7 % nach Norden auf. Der Querschnitt des Tunnels beträgt in etwa 93 m<sup>2</sup> (Abbildung 26). Vom Nordportal beginnend weist der Tunnel eine westseitige Querneigung auf. Im Bereich von TM 233 wechselt diese und verläuft bis zum Südportal ostseitig. (Stadlmann, 2007)

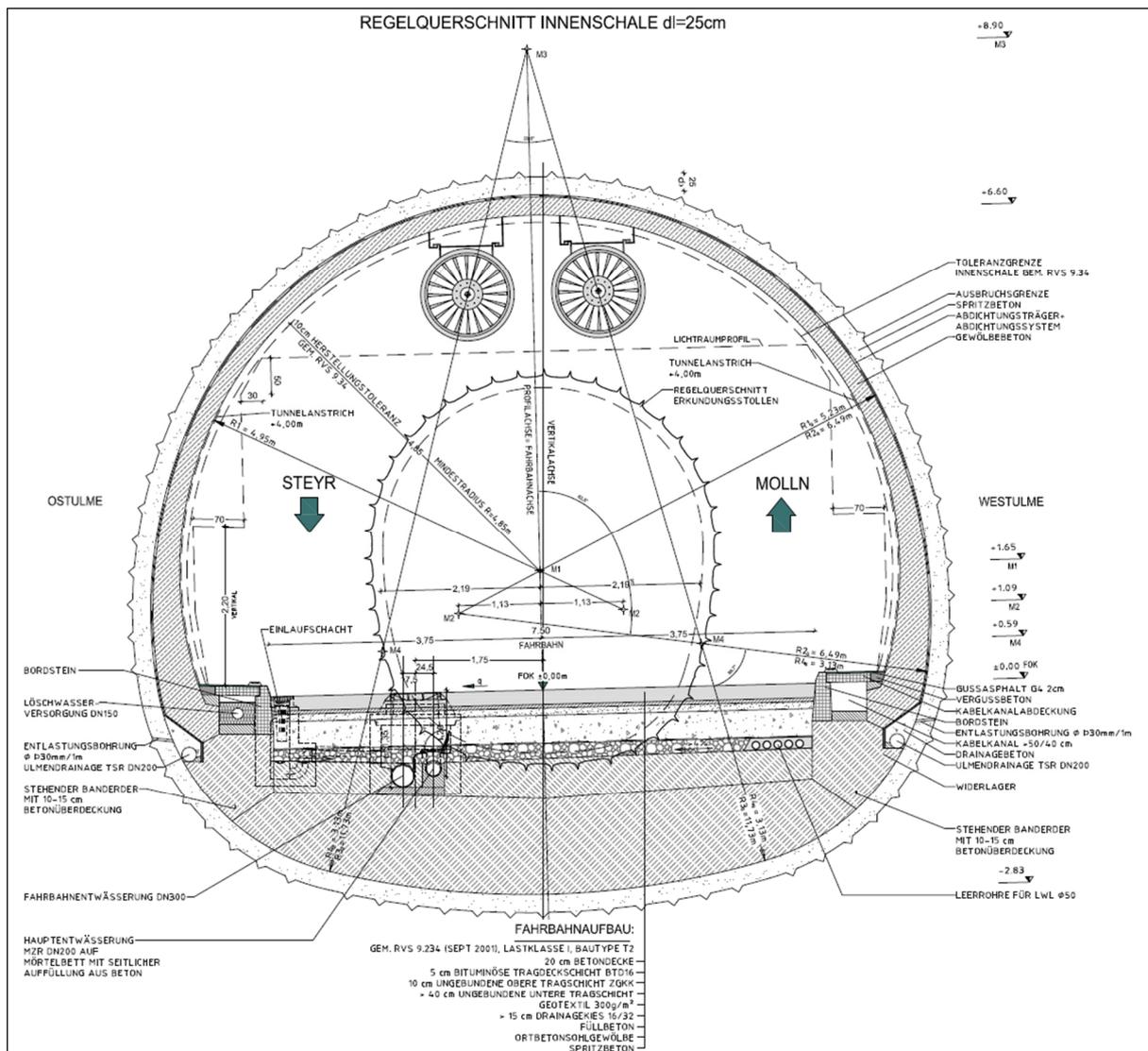


Abbildung 26. Regelquerschnitt mit Blickrichtung von Nord nach Süd; UT Grünburg; Quelle: Tunnelbetriebsleitung Gmunden

Zwischen TM 227 und TM 270 befindet sich die Abstellnische Nord, die den Tunnelquerschnitt südseitig erweitert und insgesamt einen Tunnelquerschnitt von 144 m<sup>2</sup> umfasst. Die Abstellnische Süd liegt zwischen TM 607 und TM 650 auf der Westseite des Tunnels. Von beiden Abstellnischen führt jeweils ein Querschlag zum jeweiligen Fluchtbauwerk. Die Querschläge weisen einen Ausbruchquerschnitt von circa 19,5 m<sup>2</sup>. Im Norden erreicht der Querschlag eine Länge von circa 16 m, im Süden in etwa 36 m. Das

Fluchtbauwerk 1 hat eine Gesamttiefe von etwa 16 m, das zweite erreicht eine Tiefe von 18 m. Über die Schächte, mit einem Durchmesser von jeweils 7,5 m, ist der Tunnel mit der Oberfläche verbunden. Zufahrtswege zu beiden Fluchtbauwerken schließen diese an das öffentliche Verkehrsnetz an. (Stadlmann, 2007)

Im Bereich TM 714 unterfährt der Tunnel den Harbachgraben. Aufgrund der in diesem Bereich prognostizierten grundwasserführenden Lockergesteinsablagerungen wurde eine Grundwasserabsenkung mit insgesamt 13 Absenkbrunnen, meist 2 - 3 m seitlich des Tunnels, durchgeführt. Die Tiefen lagen zwischen 24 und 41 m unter der GOK. Der Absenkbereich erstreckte sich von TM 678 bis TM 968. Der Pumpbetrieb der einzelnen Absenkbrunnen wurde, dem Vortrieb nachfolgend, nach und nach eingestellt. (Forstinger, 2008)

### **Geologie und Hydrogeologie**

Der UT Grünburg befindet sich geologisch betrachtet in der Flyschzone am Nordrand der Ostalpen. Maßgeblich für den Projektbereich sind die Altlenzbacher Schichten (eine Abfolge von zyklischen Wechsellagerungen von Sandstein, Mergelstein, Tonmergel bzw. Tonstein) sowie quartäre Lockergesteinsablagerungen (steinig, sandig-schluffige Kiese sowie Schluffe und Tone). Die Flyschgesteine sind alle mehr oder weniger leicht verwitterbar und daher oberflächennah zu einer mehrere Meter starken Verwitterungsschwarte entfestigt. Aufgrund der geringen Überlagerung des Tunnels reicht die oberflächennahe Auflockerung und Verwitterung des Gebirges teilweise bis in den Ausbruchsquerschnitt. Lediglich unter den Hochflächenbereichen zwischen TM ca. 1080 bis TM 775 und zwischen TM 480 bis TM 285 sind im aufgefahren Gebirge keinerlei Verwitterungserscheinungen erkennbar. (Stadlmann, 2007)

Der Grundwasserspiegel liegt vor Ausbruch des Tunnels und vor Beginn der Absenkung relativ konstant im Bereich der späteren Tunnelfirste bzw. einige Dezimeter darunter. Im Bereich der Lockergesteinsbedeckung am Südportal liegt dieser ca. 12 m über der Tunnelfirste und im Bereich der Harbachquerung (Lockergesteinsüberlagerung) etwa 1,5 bis 2,0 m unterhalb der Firstausbruchsgrenze. In der Lockergesteinsstrecke nahe dem Nordportal liegen vor Beginn des Vortriebes ähnliche Verhältnisse vor. (Stadlmann, 2007)

Aus allen aufgefahrenen Lockergesteinsbereichen kam es beim Vortrieb punktuell zu tropfenden bis schwach rinnenden Wasserzutritten in den Vortrieb (Größenordnung meist < 0,1 l/s Gesamtzutrittsmenge im Ortsbrustbereich, teilweise auch bis zu 0,5 l/s). Im Flysch herrschten über weite Strecken bergfeuchte Verhältnisse bis allenfalls örtlich schwach tropfende Zutritte vor. In Teilbereichen wurden allerdings immer wieder Kluftwässer, die entlang von Trennflächen in den Vortrieb tropfend bis vereinzelt auch stärker rinnend (Einzelzutritte bis ca. 0,3 l/s) zutraten, angefahren. Der stärkste Bergwasserzutritt wurde beim Ankerbohren in der Westulme bei TM 763 m mit kurzfristig 3 l/s festgestellt, der allerdings innerhalb kurzer Zeit stark zurückging. Relativ lange, über Tage und Wochen anhaltende Wasserzutritte, wurden im Bereich der Abstellnische Nord angetroffen, die zeitweise bis zu 2 l/s im unmittelbaren Ortsbrustbereich umfassten. Gleiche Größenordnungen wurden im Querschlag 1 und Fluchtbauwerk 1 festgestellt, wobei eine deutliche Zunahme bei Niederschlägen beobachtet werden konnte. Die Bergwassermenge wurde in diesem Bereich mit hoher Wahrscheinlichkeit durch den nahe gelegenen Harbach unterstützt. Insgesamt kann

eine mittlere Bergwasserführung des Tunnels von ca. 5,0 l/s angenommen werden, die in der Frostperiode allerdings um ca. 30% niedriger liegen dürfte. (Forstinger, 2008)

### Sekundäres Entwässerungssystem

Das sekundäre EWS ist als Trennsystem ausgeführt. Die Fahrbahnwässer gelangen über Einlaufgitter in Fertigteilschächte mit einer Siphonierung und werden über eine Querausleitung (2 % Gefälle) in die Fahrbahntwässerungsleitung (PVC, DN 300) übergeführt (Abbildung 27).

Die Fahrbahntwässerungsleitung verläuft über die gesamte Tunnellänge unter der ostseitigen Fahrbahn und mündet in eine westseitig des Nordportals situierte GSA. Die Einlaufschächte der Fahrbahntwässerung sind vom Südportal aus in Abständen von zumeist etwa 60 m, mancherorts auch geringer, über eine Länge von etwa 880 m ostseitig eingebaut. Mit dem Wechsel der Querneigung im Bereich TM 235 befinden sich diese bis zum Nordportal an der Westseite des Tunnels. (Amt d. o.ö. Landesregierung, 2008)

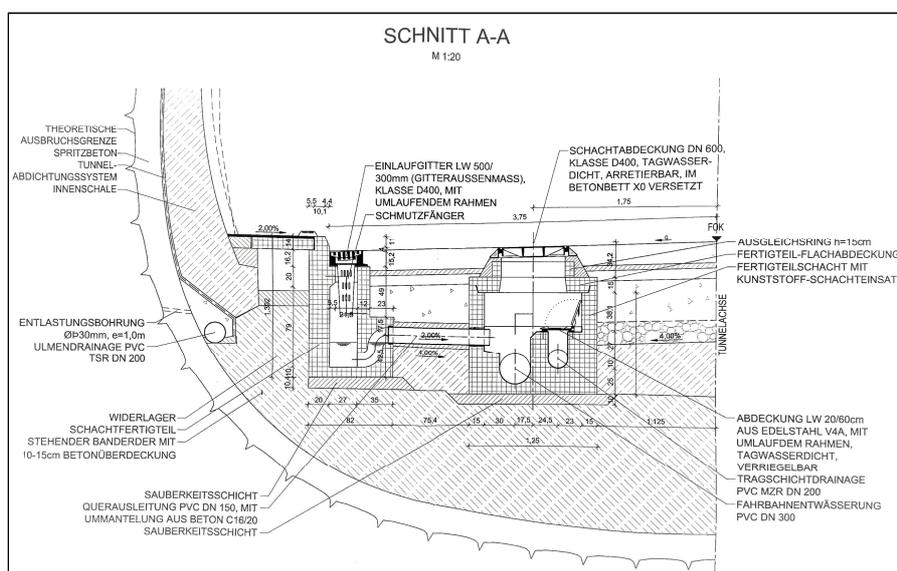


Abbildung 27. Querausleitung der Fahrbahntwässerung; UT Grünburg;  
Quelle: Tunnelbetriebsleitung Gmunden

Auf der Länge des bergmännisch aufgefahrenen Tunnelabschnitts sind an beiden Ulmenseiten im Abstand von einem Meter Entlastungsbohrungen (Durchmesser 30 mm) durchgeführt worden (Abbildung 27). Das Berg- bzw. Sickerwasser wird über die gesamte Tunnellänge (offene und geschlossene Bauweise) beidseits durch Ulmendrainagen gefasst. Die Ulmendrainagen sind aus PVC hergestellte Teilsickerrohre (TSR) mit einem Durchmesser von 200 mm (Abbildung 26 & 27). Die Wassereintrittsflächen sind gebohrt. Die fünf im Scheitelpunkt des Rohres (220°) symmetrisch angeordneten Bohrungen sind in regelmäßigen Abständen über die Rohrlänge angeordnet und liefern so die benötigte Perforation, um die prognostizierten Berg- bzw. Sickerwassermengen zu fassen (Abbildung 28).



Abbildung 28. Standbild aus einer Kamerabefahrung der gereinigten Ulmendrainage; UT Grünburg;  
Quelle: Tunnelbetriebsleitung Gmunden

Im Bereich der offenen Bauweise (Nord- und Südportal) liegen die Drainageleitungen außerhalb des Tunnelgewölbes. Am Südportal weisen sie ein Südgefälle bzw. ein Nordgefälle am Nordportal auf. Diese Berg- bzw. Sickerwasserentwässerung ist nicht an die Ulmendrainageleitungen des bergmännisch aufgefahrenen Tunnelabschnitts angeschlossen. Das im Bereich der offenen Bauweise gefasste Berg- bzw. Sickerwasser wird außerhalb des Südportals beidseits ausgeleitet. Außerhalb des Nordportal kommt es nur auf der Ostseite zu einer separaten Ausleitung. Westseitig wird das gefasste Sickerwasser in einem Sammelschacht mit dem Berg- bzw. Sickerwasser der Tunnelhauptentwässerung vereint und in weiter Folge in die Vorflut geleitet. Die Ulmendrainageleitungen der geschlossenen Bauweise weisen über den gesamten Abschnitt ein Nordgefälle auf. Die ostseitige und westseitige Drainageleitung werden an ihren Enden im Bereich TM 27 über eine Querausleitung (HD-PE, DN 200) mit der Hauptentwässerung verbunden. (Amt d. o.ö. Landesregierung, 2008)

Die Ulmendrainagen sind über Fertigteilschächte zugänglich. Im Gerinne sind diese kunststoffbeschichtet. Die Schachtabdeckungen sind aus nichtrostendem Material hergestellt und tagwasserdicht ausgeführt (Abbildung 29). Über die Länge des Tunnels sind sie in Revisionsnischen angeordnet, deren Abstände 58 bis 62 m betragen. In Portalnähe verkleinern sich die Abstände auf 35 bis 48 m (Amt d. o.ö. Landesregierung, 2008).



Abbildung 29. Ausführung der Fertigteilschächte der Bergwasserentwässerung; UT Grünburg

Die Hauptentwässerung des Tunnels beginnt am Südportal bei TM 1164 und befindet sich östlich der Tunnelachse. Bis TM 220 verläuft diese parallel zu der Fahrbahntwässerung. An dieser Stelle (Wechsel der Tunnelquerneigung) wird sie auf die westliche Seite der Tunnelachse geführt und verläuft bis zum Ende des Nordportals, wo sie westlich des Nordportals im oben erwähnten Sammelschacht einmündet. Die Hauptentwässerung des Grünburgtunnels ist eine Tragschichtdrainage (MZR, DN 200). (Amt d. o.ö. Landesregierung, 2008)

Erreichbar ist Hauptentwässerungsleitung über mit Kunststoff beschichtete Fertigteilschächte (Abbildung 27). Diese sind entlang der Linienführung der Hauptentwässerungsleitung in regelmäßigen Abständen angeordnet.

Die beiden Fluchtbauwerke und die zugehörigen Querschläge wurden druckwasserdicht gebaut. In diesem Bereichen besteht kein Drainagesystem. Für aufkommende Leckagewässer wurden entlang der Schacht- und Querschlagswände Entwässerungsrinnen verbaut (Abbildung 30). Entlang der Aufweitungen wurden ulmenseitig Drainageleitungen (TSR aus PVC, DN 200) verlegt. Über einen Revisionsschacht und einer Querausleitung sind diese mit den jeweiligen Ulmendrainageleitung des Tunnels verbunden. Das in den Entwässerungsrinnen gefasste Leckagewasser wird in den oben erwähnten Schacht geleitet.



Abbildung 30. Lage der Entwässerungsrinnen im Schachtbauwerk 1 und 2; UT Grünburg

### **Prä- und postsedimentäre Wartung des sekundären EWS**

Die Wartungsarbeiten am sekundären EWS finden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen dreimal im Jahr auf statt (Frühling, Sommer und Herbst). Aufgrund des mäßigen durchschnittlichen Verkehrsaufkommens erfolgt die Wartung des Tunnels immer tagsüber. Hierfür wird der gesamte Tunnel gesperrt und der Verkehr über den Ort Grünburg umgeleitet. (administratives Personal 1, persönliches Gespräch, 16. Juli 2019)

Die Wartungsarbeiten am sekundären EWS werden von zwei Spülfahrzeugen, bemannt von jeweils einer Person, durchgeführt. Ein Spülfahrzeug wird von der Straßenmeisterei Gmunden gestellt und bedient, das zweite von einem örtlich ansässigen

Kanalreinigungsunternehmen, dessen Spülfahrzeug im Vergleich über eine Wasserrückgewinnungseinheit verfügt.

Im Zuge der präsedimentären Wartung wird das gesamte sekundäre EWS des Tunnels gespült. Dies umfasst alle Ulmendrainageleitungen, die Tunnelhauptentwässerung (Tragschichtdrainage), die Fahrbahntwässerung, alle Querausleitungen sowie die Entwässerungsrinnen der Fluchtbauwerke. Gespült wird immer gegen die Abflussrichtung von Haltung zu Haltung. Zunächst werden die Wassertanks der Fahrzeuge außerhalb des Tunnels mit Wasser gefüllt. Die Spülung des sekundären EWS beginnt vom Südportal aus und endet am Nordportal. Dabei übernimmt jeweils ein Wartungsteam (Spülfahrzeug incl. Personal) alle angetroffenen Haltungen einer Tunnelseite. Als erstes werden die Entwässerungsleitungen der offenen Bauweise gespült danach die der geschlossenen Bauweise. Mit Beginn der Haltungen der Fahrbahntwässerung bzw. Tunnelhauptentwässerung werden diese mitgespült.

Vor dem Spülvorgang werden die Revisionsnischen mittels Hochdruckreiniger gereinigt. Danach werden die Verschraubungen der Schachtabdeckungen gelöst. Die Fertigteilschächte werden geöffnet und der Düsenkopf mit zugehörigem Schlauch über Umlenkrollen in das Drainagerohr geführt. Um das während der Spülung aufkommende Abwasser zu fassen, wird ein Absaugschlauch in das Gerinne des Schachtes hinuntergelassen (Abbildung 31).



Abbildung 31. Düsenkopf am Wasserschlauch und Absaugschlauch im Schacht der Ulmendrainage; UT Grünburg

Zur Reinigung des sekundären EWS werden unterschiedliche Düsenköpfe verwendet (Abbildung 33). Für die Wartung der Ulmendrainagen wurden Vibrations- und Vibrationsrotierdüsen verwendet. Die Wahl des Werkzeugs obliegt dem Wartungspersonal.

Massive und sehr feste Versinterungen sind in den Entwässerungsrinnen der beiden Fluchtbauwerke anzutreffen. Diese sind in einigen Bereichen bis zu etwa 75% mit Versinterungen belegt. Zu deren Entfernung wird eine Fräskugel verwendet. Ein Lösen der Versinterungen mit dem Fräskopf kann nur langsam erzielt werden und wird aufgrund geringerer Priorität und Zeitmangel nicht vollständig entfernt.



Abbildung 33. Verwendete Düsenköpfe während den Wartungsarbeiten; UT Grünburg

Der Wasserdruck am Spülfahrzeug beträgt 150 bar. Der Vorschub des Spülschlauchs erfolgt über die aus den Düsen mit Hochdruck herauskommenden Wasserstrahlen. Die Geschwindigkeit wird über eine Bremsvorrichtung geregelt. Durch das langsame Einziehen des Spülschlauches erfolgt die Reinigung. Das verbrauchte Wasser und die, von der Rohrinne-Seite der Drainagerohre losgelösten Ablagerungen werden durch den eingehängten Absaugschlauch gefasst und in einen auf dem Spülfahrzeug befindlichen Tank übergeführt. Über optische Kontrolle des Restwassers wird über den Spülerfolg entschieden. Falls nach einmaliger Spülung der Haltung das Abwasser nicht klar abfließt, wird ein weiterer Spülvorgang durchgeführt, solange bis ein Spülerfolg festgestellt wird (Abbildung 32).

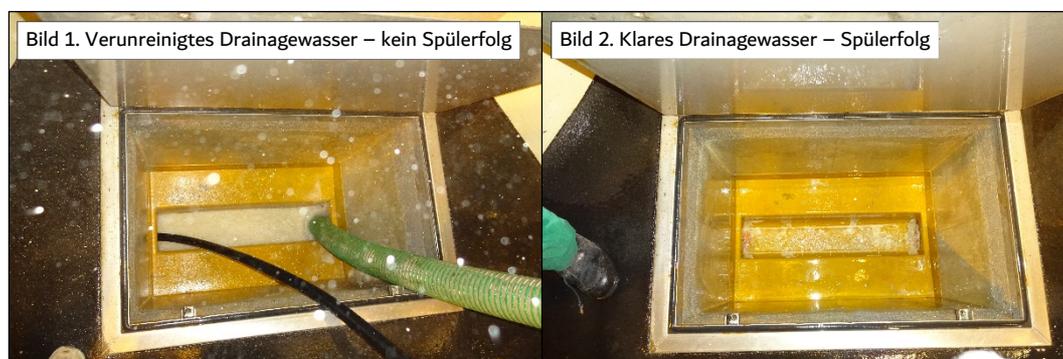


Abbildung 32. Reinigung der Ulmendrainage und der erzielte Spülerfolg; UT Grünburg

Die Spülungen werden aufgrund zwischenzeitlich notwendiger Wasseraufnahme unterbrochen. Das Spülfahrzeug mit Wasserrückgewinnung muss nur einmal während der Schicht nachfüllen, während das der Tunnelbetriebsleitung im Laufe der Arbeitsschicht vier Mal den Wassertank nachfüllt. Der zeitliche Aufwand für das Nachfüllen liegt zwischen 15 und 20 Minuten. Eine Kontrolle des Spülerfolges der gereinigten ulmenseitigen Drainageleitungen erfolgt vom Personal der Tunnelbetriebsleitung Gmunden. Hierfür findet eine Kamerabefahrung statt (Abbildung 34). Die Kabellänge beträgt 60 m, sodass eine reibungslose Kontrolle des gesamten Entwässerungssystems im Tunnel gegeben ist. Beim Antreffen unzureichend gereinigter Leitungsabschnitte werden diese abermals gespült.

Härtstabilisatoren als präsedimentäres Wartungsverfahren werden derzeit nicht verwendet.

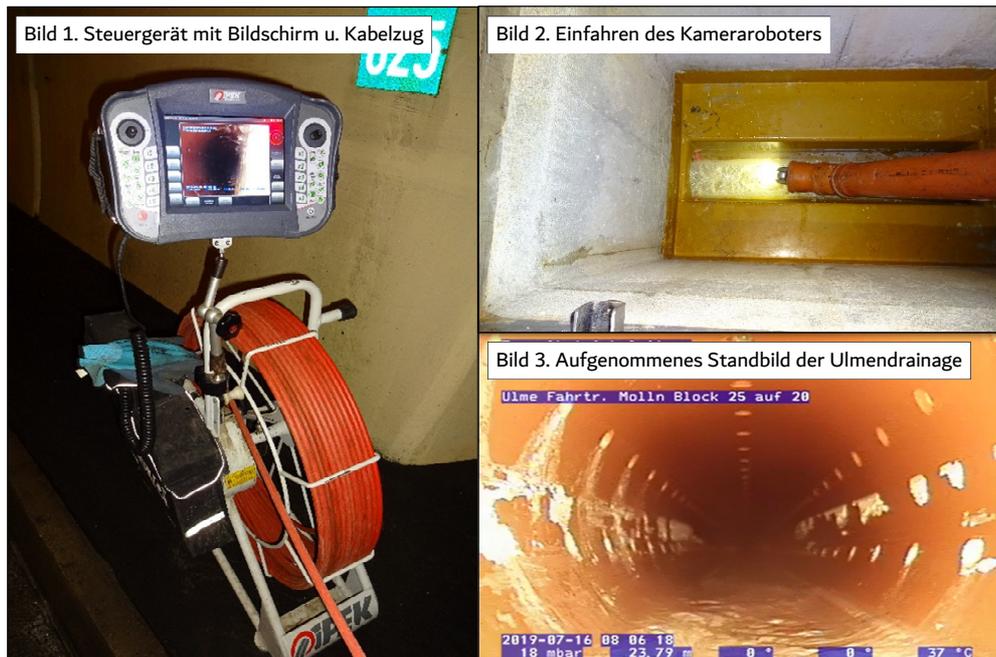


Abbildung 34. Kontrolle des Spülerfolges mittels einer Kamerabefahrung; UT Grünburg

Während der Wartungsarbeiten an dem sekundären EWS wird die Dauer der Spülung (auf Minuten gerundet) für jeden Spülabschnitt im Rahmen der Masterarbeit dokumentiert.

### Versinterungsproblematik des sekundären EWS und deren Zusammenhänge

Nach zwei Jahren Betrieb wurde eine Zunahme von Versinterungen in den Ulmendrainagen festgestellt. Auffallend sind die sich wiederholenden Bereiche, in denen ein Anwachsen der Versinterungen beobachtet wird, die bis heute andauern (Abbildung 35). An der Westulme des Tunnels liegt dieser Bereich zwischen TM 0 und TM 635, an der Ostulme zwischen TM 0 und TM 232. Beide Bereiche verlaufen vom Nordportal beginnend bis zu den jeweiligen Abstellnischen mit den dazugehörigen Querschlägen sowie den beiden Fluchtbauwerken 1 u. 2. (administratives Personal 1, persönliches Gespräch, 16. Juli 2019)



Abbildung 35. Abgelöste Versinterungsprobe aus Ulmendrainage auf einem 1x1cm Raster; UT Grünburg

Aufgrund der festgestellten Zunahme von Versinterungen in den oben erwähnten Bereichen wurden die Ulmendrainagen ab 2010 drei Mal im Jahr gespült. Die bereits vorhandenen festen und an den Rohrwandungen der Drainageleitungen festgesetzten Versinterungen konnten durch diese Maßnahme nicht beseitigt werden. Laut dem administrativen Personal wurde in weiterer Folge ab dem Jahr 2011 der Einsatz von festen Härtestabilisatoren festgelegt. Einbau und Dosierung wurden vom Tunnelbetreiber durchgeführt. In den nachfolgenden Jahren konnte nur noch eine geringe Zunahme von Versinterung beobachtet werden. Eine Loslösung der Versinterungen von der Drainagerohrwandung konnte nicht erreicht werden. Um die Funktionsfähigkeit des sekundären EWS zu gewährleisten wurden im März 2018 Fräsarbeiten in den zuvor beschriebenen Bereichen durchgeführt und die massiven Versinterungen entfernt. (administratives Personal 1, persönliches Gespräch, 16. Juli 2019)

Im Herbst 2018 wurde ein interner Test zur Entscheidungsfindung über den weiteren Einsatz von festen Härtestabilisatoren durchgeführt. Es wurde die Entscheidung getroffen auf den weiteren Einsatz fester Härtestabilisatoren zu verzichten und stattdessen dreimal im Jahr Spülungen des EWS begleitet von einer Kamerabefahrung durchzuführen. (administratives Personal 1, persönliches Gespräch, 16. Juli 2019)

Die Darstellungen der Spülgeschwindigkeit über die gesamte Tunnellänge zeigen einen größeren Wartungsaufwand in den oben erwähnten Bereichen (Abbildung 36). Die Spülgeschwindigkeiten entlang der Ulmendrainage West weisen eine Abnahme der Spülgeschwindigkeit von 10 m/min und mehr ab TM 683,67 bis zum Nordportal (TM 0) auf. Abstellnische Süd mit Querschlag und Schachtbauwerk (Westulme) liegt zwischen TM 607 und TM 650. In diesem Bereich unterfährt der Tunnel den Harbach. Der GW-Spiegel nach dem Abstellen der Absenkbrunnen ist wieder auf das ursprüngliche Niveau gestiegen (Abbildung 36).

Der Kontakt mit kalkhaltigen Baustoffen der Stützmittel des Schachtes (Ankermörtel) kann als Ursache für die Versinterungsentstehung in diesem Bereich angesehen werden. Die Spülgeschwindigkeiten der Ulmendrainage Ost lassen diese Aussage ab der Abstellnische Nord mit dem Querschlag und dem zugehörigen Fluchtbauwerk auch zu. Ab TM 683,67 nimmt die Spülgeschwindigkeit ab und zum TM 390,57 wieder zu. Ein Zusammenhang zwischen EWS, Bautechnik sowie geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten lässt sich in diesem Bereich nicht erkennen.

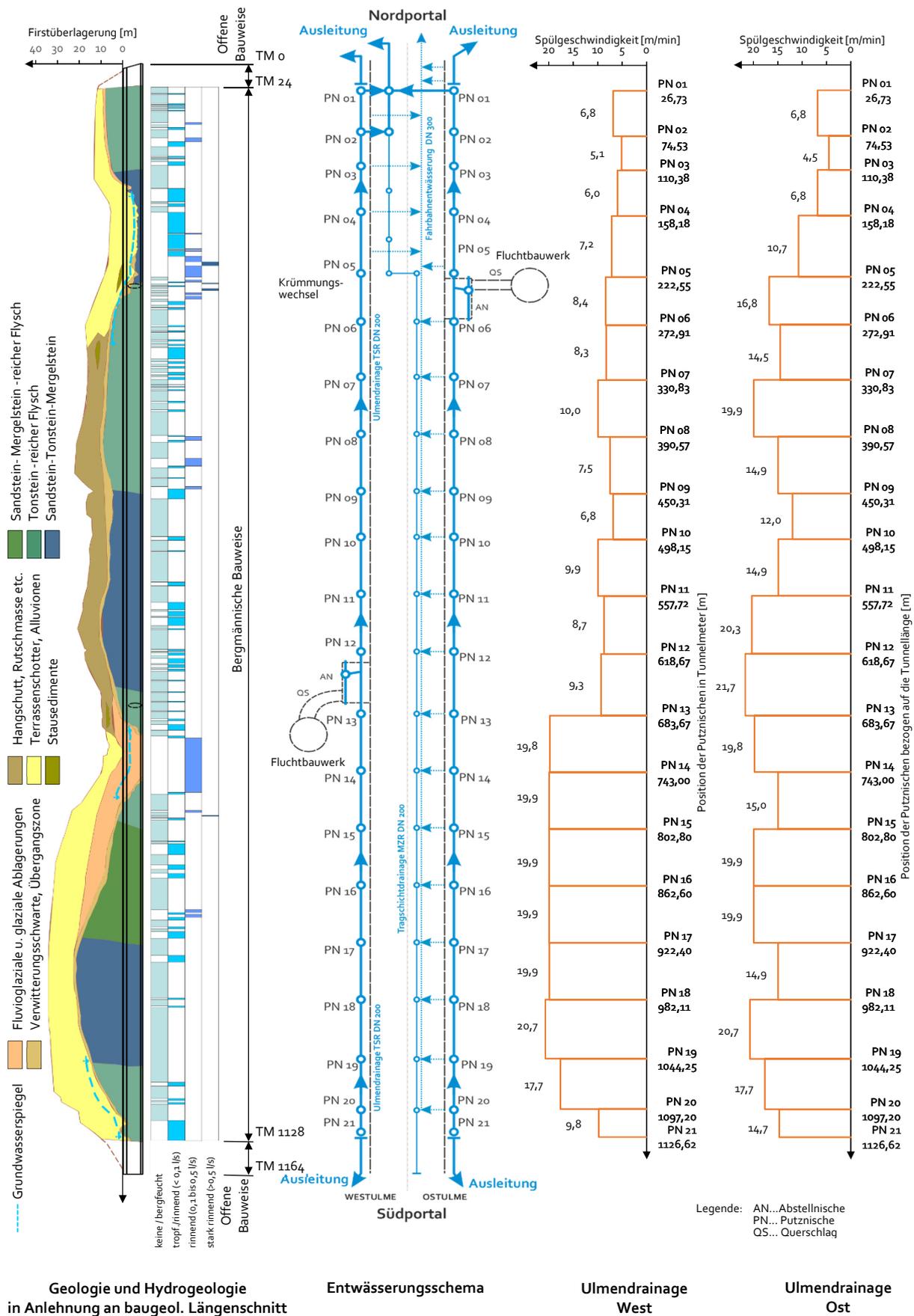


Abbildung 36. Gegenüberstellung von Spülgeschwindigkeiten, sek. EWS, Bautechnik sowie geol. u. hydrogeol. Gegebenheiten; UT Grünburg

### 3.3 Tunnel Reinertshof

#### Allgemeines

Der Tunnel Reinertshof ist ein 645 m langer zweiröhriger zweispuriger Straßentunnel. Das Tunnelbauwerk wurde 2008 fertiggestellt und ist ein Teil des 2009 für den Verkehr freigegebenen rund 15 km langen südlichsten Abschnitts der A7, zwischen Nesselwang und der Anschlussstelle Füssen. Er befindet sich zwischen der Ortschaft Reinertshof und dem östlich gelegenen Hopfensee im Ostallgäu Bayern, Bundesrepublik Deutschland (Abbildung 37). Zuständig für die Instandhaltung des Tunnels ist die Autobahndirektion Sulzberg.

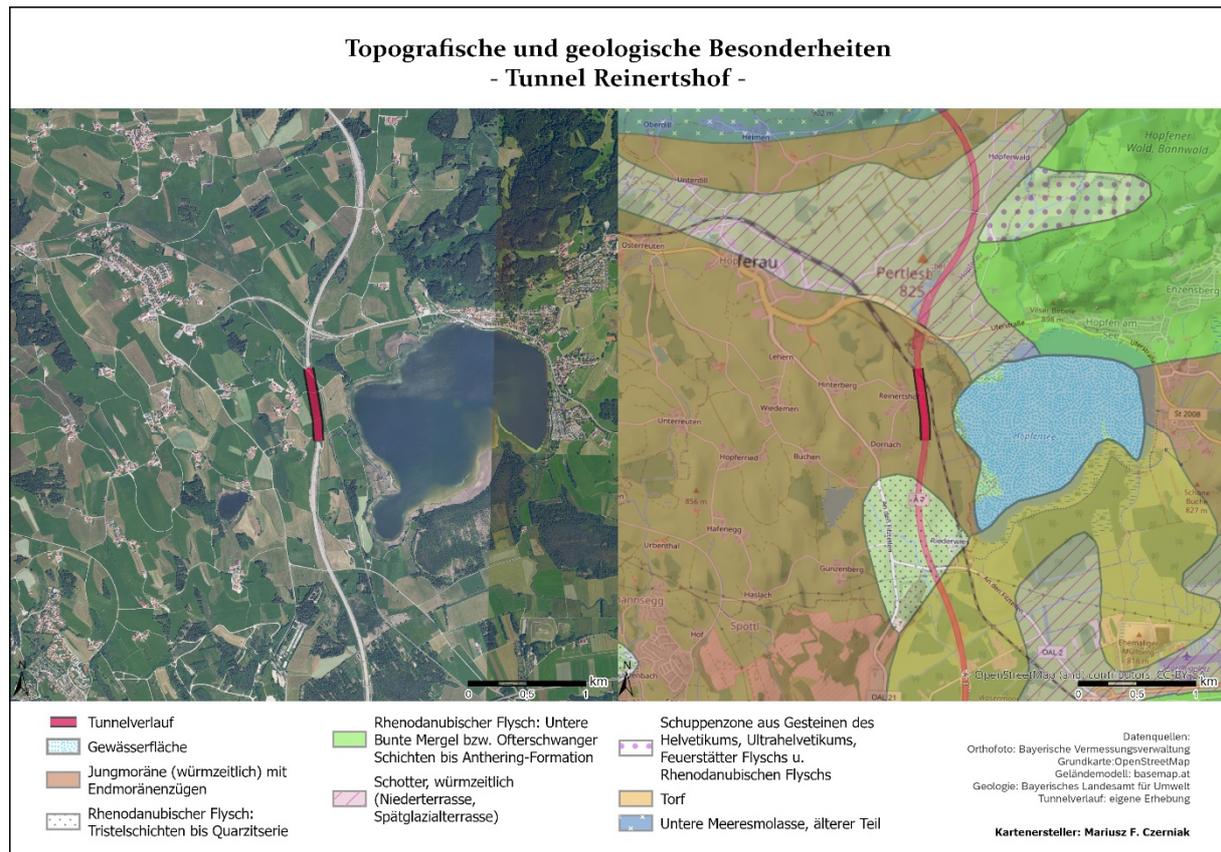


Abbildung 37. Topografische und geologische Besonderheiten; Tunnel Reinertshof

#### Bautechnik

Der Tunnel wurde vollständig in offener Bauweise errichtet. Die beiden Fahrbahnen haben eine ostseitige Querneigung von 2,5%. Das Lichtraumprofil weist bei beiden Röhren einen Querschnitt von 46 m<sup>2</sup> auf (Abbildung 38). Aufgrund der kritischen Untergrundverhältnisse sowie der unmittelbaren Nähe zum Hopfensee wurde das Bauwerk auf Streifenfundamenten schwimmend gegründet (Autobahndirektion Südbayern, 2011).

Für die Regulierung des Grundwasserspiegels und der Vorbeugung gegen ein Aufschwimmen des Bauwerks wurden entlang der beiden Röhren zwei Reihen von jeweils 15 Überlaufbrunnen mit einem Durchmesser von 300 mm in regelmäßigen Abständen von 48 m hergestellt. Auf der Ostseite in Fahrtrichtung Kempten befindet sich die erste Reihe der Brunnen 4,45 m links der Bauwerksachse bzw. auf der Westseite in Fahrtrichtung Füssen 6,75 m rechts der Bauwerksachse. Die ersten beiden Brunnen sind etwa 8 m außerhalb des

Südportals auf gleicher Höhe angeordnet. In Tunnellängsrichtung sind sie zueinander versetzt. In der Oströhre befindet sich der letzte Brunnen etwa 8 m vor dem Nordportal. Westseitig ist der letzte Brunnen circa 25 m vor dem Nordportal positioniert. (Autobahndirektion Südbayern, 2010)

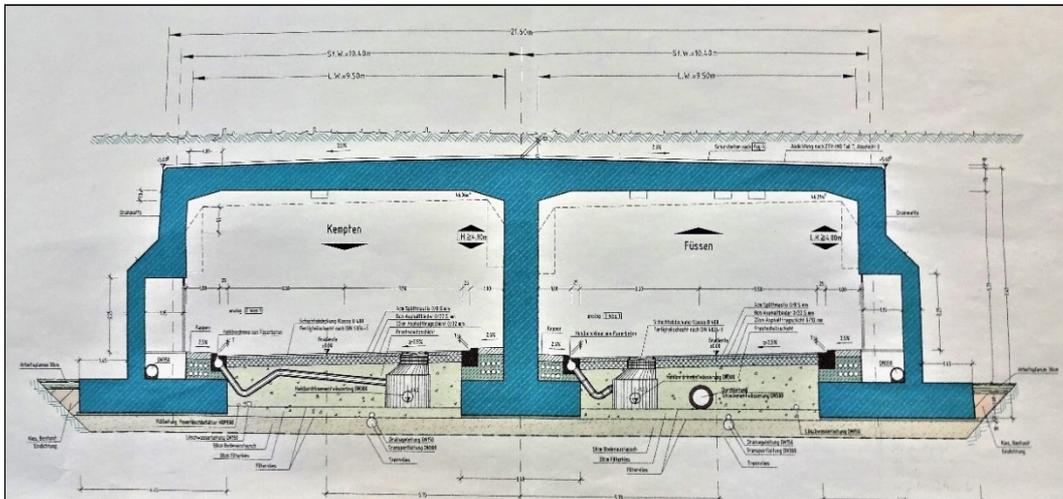


Abbildung 38. Regelquerschnitt des Tunnels Reinertshof bei Füssen, Deutschland;  
Quelle: Betriebsgebäude Tunnel Reinertshof

Angrenzend zur Tunnelausfahrt Nord befindet sich ein Auffangbecken für das Fahrbahnwasser sowie ein Löschwasserbecken. Östlich des Südportals ist das Betriebsgebäude des Tunnels errichtet. Links und rechts säumen unterschiedlich lange Stützmauern die beiden Portale im Winkel von ca. 20° zur Tunnelachse (Abbildung 39). Oberhalb des Bauwerks verläuft im nördlichen Teil eine Bahnstrecke sowie ein Feldweg.



Abbildung 39. Südportal mit anschließendem Betriebsgebäude; Tunnel Reinertshof

### Geologie und Hydrogeologie

Für den Tunnel Reinertshof konnten keine geologischen bzw. hydrogeologischen Baudokumentationen erhalten werden. Zur Beschreibung der herrschenden Geologie und Hydrogeologie im Projektbereich wurden Informationen des bayerischen Landesamtes für Umwelt (<https://www.lfu.bayern.de/index.htm>) herangezogen.

Der Tunnel durchfährt die geologischen Schichten des Quartärs, Pleistozäns und Holozäns. Die Deckschichten im Projektbereich bestehen aus bindigem Lockergestein mit hohem Wasserspeichervermögen jedoch geringen Durchlässigkeiten (Moore). Im nördlichen Tunnelabschnitt ist Anmoor mit teils degradierten Torfanteilen anzutreffen (Quartär und Holozän). Würmzeitliche, vorwiegend tonig-schluffige bzw. kies-sandige, Moränen zum Teil auch kiesig bis blockig (Quartär und Pleistozän) kommen im mittleren Abschnitt des Tunnels vor. Seeablagerungen treten teilweise auf (Schluffe, Tone und Sande).

Aufgrund der zweireihig angeordneten Überlaufbrunnen auf die Gesamtlänge des Tunnels verteilt und der unmittelbaren Lage des Hopfensees ist von drückenden Grundwasser-Verhältnissen auszugehen.

### **Sekundäres Entwässerungssystem**

Das links und rechts des Tunnels anfallende Sickerwasser wird über Teilsickerrohre aus PVC mit einem Durchmesser von 355 mm und einer Schlitzbreite von 1,2 mm gefasst. Die ostseitige Drainageleitung beginnt an der Südseite des Betriebsgebäudes. Sie führt um dieses herum, weiter hinter der Stützmauer und entlang der Außenseite des Tunnels bis zum Ende der nordseitigen Stützmauer. Von dort wird sie zu einem Schacht in der Fahrbahnmitte der Tunnelausfahrt Nord geführt. Die westseitige Drainageleitung beginnt an der Hinterseite der südlichen Stützmauer (Weströhre). Sie verläuft entlang dieser weiter neben der Außenseite der Weströhre und der nordseitigen Stützmauer, wo sie in einen Schacht mündet. Beide Drainageleitungen verlaufen im Gefälle längs der Außenseiten der Bauwerke entlang in Richtung des Nordportals. Die für die Regulierung des Wasserdrucks angelegten Überlaufbrunnen sind über vor Ort geschaltete und ausbetonierte Brunnenschächte von der Fahrbahn aus zugänglich. Über diese sind die Strecken- und Fahrbahntwässerung als auch die Tragschichtdrainage und die Transportleitung erreichbar. Das überlaufende Grundwasser läuft über ein leichtes Gefälle in die aus Steinzeug hergestellten Halbschalen, welche an die Transportleitung im Durchmesser von 300 mm anschließen. Diese Leitung weist eine Wellenprofilierung auf. Gleich oberhalb der Transportleitung befindet sich die geschlitzte Tragschichtdrainage mit einem Durchmesser von 100 mm (Abbildung 40). (Autobahndirektion Südbayern, 2010)



Abbildung 40. Bild 1: Brunnenschacht mit Überlaufbrunnen, Transportleitung und Tragschichtdrainage; Bild 2: oberhalb - Tragschichtdrainage DN 150, unterhalb - Transportleitung DN 300; Tunnel Reinertshof

Die Transport- sowie die Drainageleitung der Tragschicht beginnen auf der Südseite des Tunnels mit dem ersten Brunnenschacht und verlaufen im Gefälle zum Nordportal. Die Ausführung der Schächte und der Leitungen ist in beiden Röhren des Tunnels gleich. In der Weströhre wird zusätzlich die Streckenentwässerung (DN 500 mm) der Autobahn durchgeführt. Die oben erwähnten Entwässerungsleitungen sind über die in Ortbeton ausgeführten Brunnenschächte zugänglich. Etwa 20 m vor dem Nordportal werden alle Stränge, die für das Aufnehmen und Ausleiten des Grund- und Sickerwassers dienen, in Schächte zusammengeführt und in die Vorflut (Altarm des Hopfensees) geleitet.

Die Entwässerung der Fahrbahn erfolgt über Hohlborddrinnen, welche auf der Ostseite der jeweiligen Fahrbahn verlaufen. Sie werden über die gesamte Tunnellänge in regelmäßigen Abständen zu der Hohlborddrinnenentwässerung quer ausgeleitet. Die Leitung ist über Fertigteilschächte erreichbar. Die Schächte befinden sich auf der gleichen Höhe, wie die Querausleitung. Außerhalb des Nordportals wird das Wasser bis zum Auffangbecken weitergeleitet.

### **Prä- und postsedimentäre Wartung des sekundären Entwässerungssystems**

Am Tunnel Reinertshof werden zweimal im Jahr (Mai und September) Wartungstätigkeiten durchgeführt. Innerhalb von zwei Tagen (04:00 bis 20:00 Uhr) werden alle Bereiche (Fahrbahn, Wände, Nischen, elektrische Ausstattung etc.) einschließlich des sekundären EWS gewartet bzw. auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft. Für die Wartungstätigkeiten wird jeweils eine Tunnelröhre im oben erwähnten Zeitraum gesperrt und der Verkehr über die zweite Röhre geführt. (administratives Personal 1, persönliche Kommunikation, 06. Mai 2019)

Am ersten Tag wird die östliche Tunnelröhre (Fahrtrichtung Füssen) gewartet. Die Reinigung des sekundären EWS (Fahrbahn- und Sickerwasserentwässerung) wird von einem Kanalreinigungsunternehmen durchgeführt. Das Wartungspersonal des Unternehmens besteht aus zwei Personen und einem Spülfahrzeug mit Wasserrückgewinnung.

Die Wartungsarbeiten beginnen jeweils am Südportal und enden am Nordportal. Vor dem Beginn der Wartung am sekundären EWS wird die Fahrbahn, die Wände und alle Nischen vom Wartungspersonal der Autobahndirektion Sulzberg gereinigt. Diesen Tätigkeiten nachlaufend werden alle Schachtabdeckungen geöffnet. Angerostete Schachtabdeckungen bzw. Einlaufgitter der Fahrbahnentwässerung werden mit Drahtbürsten von anhaftenden Rost befreit, Schraubgewinde werden gereinigt und vorbeugend eingefettet. Alle in den Haltungen angetroffenen Härtestabilisatoren (Baypure® DSP Tabs in Netzen zu je 500 g) werden entfernt und entsorgt.

Gespült werden alle Entwässerungsleitungen des sekundären EWS. Zuerst wird die Drainageleitungen an den Außenwänden des Tunnels, die über in Putznischen angeordnete Abdeckungen zugänglich sind, gespült. Diese weist nur geringe Verunreinigungen auf, ist frei von Versinterungen und wird nur einmal gespült (Ost- und Weströhre). Danach wird über die Brunnenschächte die oberhalb der Transportleitung liegende Tragschichtdrainageleitung gespült. Diese wird regulär zweimal gespült, nachfolgend die Transportleitung, welche, um einen Spülerfolg zu generieren, bis zu dreimal gespült wird (Abbildung 41). Als Instandhaltungsmaßnahme werden auch die Hohlborddrinnenentwässerung

(Fahrbahntwässerung) und die Streckenentwässerung gespült. Diese werden nur einmal durchfahren. Grundsätzlich wird immer von Haltung zu Haltung und gegen die Fließrichtung gespült.



Abbildung 41. Bild 1: Spülung der Tragschichtdrainageleitung; Bild 2: Spülung der Transportleitung;  
Tunnel Reinertshof

In der Weströhre muss die Wartung der sekundären EWS an unvorhersehbare Erschwernisse adaptiert werden. Zunächst kann die Befüllung des Wassertanks am Spülfahrzeug nicht wie sonst an einem der im Tunnel angeordneten Hydranten durchgeführt werden und muss außerhalb des Tunnels erfolgen. Diesem aufkommenden Zeitverlust wird einerseits mit einer Ausdehnung des Spülabschnitts auf zwei Haltungen sowie dem Aussetzen der Spülung der kaum verunreinigten Tragschichtdrainage begegnet. Die Ausdehnung des Spülabschnitts wird an der Drainageleitung und der Transportleitung angewandt.

Im Abschnitt BS 08 – BS 10 der Transportleitung treten massive Versinterungen auf, begleitet von Steckenbleiben des Spülkopfes und Verstopfung der Transportleitung durch aufgebrochene bzw. losgelöste Versinterungen. Erst nach vier Stunden kann in diesem Abschnitt ein Spülerfolg erzielt werden. Im weiteren Spülfortschritt kommt es zu einem Defekt an der hydraulischen Anlage des Spülfahrzeuges begleitet von starkem Ölverlust. Eine Reparatur kann Vorort nicht durchgeführt werden. Ein Ersatzfahrzeug wäre erst kurz vor dem Aufheben der Tunnelsperre verfügbar, weshalb die Spülung abgebrochen wird.

Zur Spülung der Leitungen wird eine Bombengranatdüse mit acht rückwärtig symmetrisch angeordneten Düsen, in stark versinterten Entwässerungsabschnitten (Teilabschnitte der Transportleitung in der Weströhre) werden Vibrationsrotierdüsen verwendet (Abbildung 42). Über den Werkzeugwechsel (Düsenkopf) bestimmt die Kanalreinigungsfachkraft. Der aufgebrauchte Wasserdruck liegt im Spülfahrzeug im Bereich von 150 bar.

Der Spülablauf umfasst zunächst die Vorreinigung des Schachtes mit einem am Spülfahrzeug angebrachten Hochdruckreinigers. Der Spülkopf mit angebrachter Umlenkrolle wird in die zu spülende Leitung eingeführt. Danach wird der Absaugschlauch des Spülfahrzeuges in den Schacht niedergelassen. Es erfolgt ein rascher Vorschub der Düse bis zur Einmündung in die

nachfolgende Haltung. Dies wird durch Handzeichen der zweiten Fachkraft an den Operator des Spülfahrzeuges mitgeteilt. Durch langsames Einholen des Spülschlauchs und gleichzeitiges Absaugen des Abwassers (Ansaugdruck um die 2,9 bar) wird die Entwässerungsleitung gereinigt. Der Operator beobachtet das aufkommende Abwasser bzw. ob und wieviel Versinterungsmaterial herausgespült wird. Nicht absaugbare Versinterungen werden händisch aus dem Schacht bzw. Rohrrinnen entfernt. Es folgt eine optische Kontrolle des künstlich ausgeleuchteten Entwässerungsrohres. Bei Vorhandensein von Versinterungen wird die Spülung solange wiederholt bis der Spülerfolg eingetreten ist oder ein Spülabbruch seitens der Administration angeordnet wird. Danach wird der Absaug- und Spülschlauch aus dem Schacht herausgefahren. Das Spülfahrzeug wird an der nachfolgenden oder auch der übernächsten Haltung positioniert und der Spülvorgang fortgesetzt.

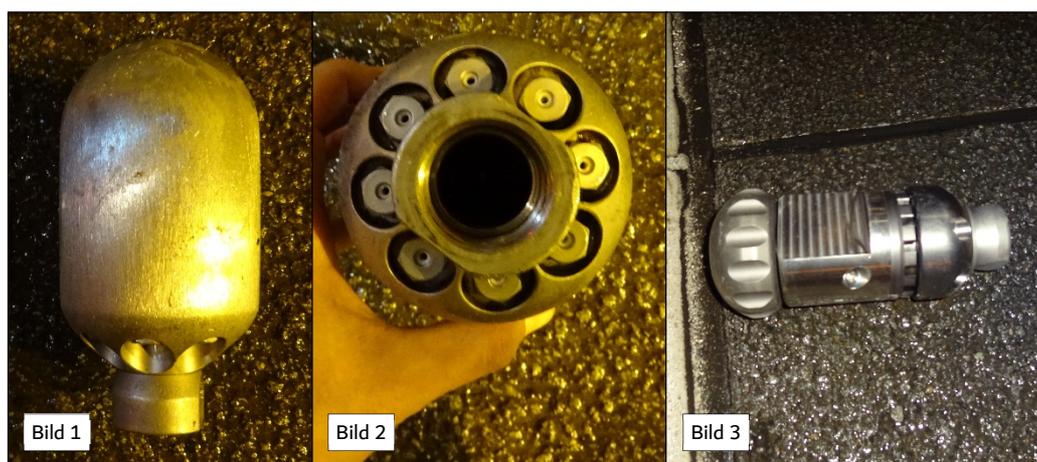


Abbildung 42. Verwendete Spülkopfwerkzeuge; Bild 1: Bombengranatdüse, Seitenansicht; Bild 2: Düsenanordnung der Bombengranatdüse; Bild 3: Vibrationsrotierdüse; Tunnel Reinertshof

Als präsedimentäre Wartungsverfahren werden feste Härtestabilisatoren (Baypure® DSP Tabs in Netzen zu je 500 g bzw. Schlangen zu je 250 g) der Fa. NET GmbH (New Environmental Technology) verwendet. Diese werden sowohl in die Überlaufbrunnen eingehängt als auch in die Transportleitung eingelegt. Die Lagesicherung erfolgt über kunststoffummantelte Drähte (Abbildung 43).

Über die Dosierung der Härtestabilisatoren wird anhand des zu Anfang der Spülung festgestellten Verbrauchs (Auflösungszustand der entfernten Härtestabilisatoren) entschieden. Je nach Auflösungszustand wird die Menge erhöht, beibehalten oder gesenkt. Die eingebrachte Menge wird dokumentiert. Die präsedimentären Wartungstätigkeiten, sowohl Entfernung als auch Neubestückung der Härtestabilisatoren, erfolgt durch einen externen Dienstleister.

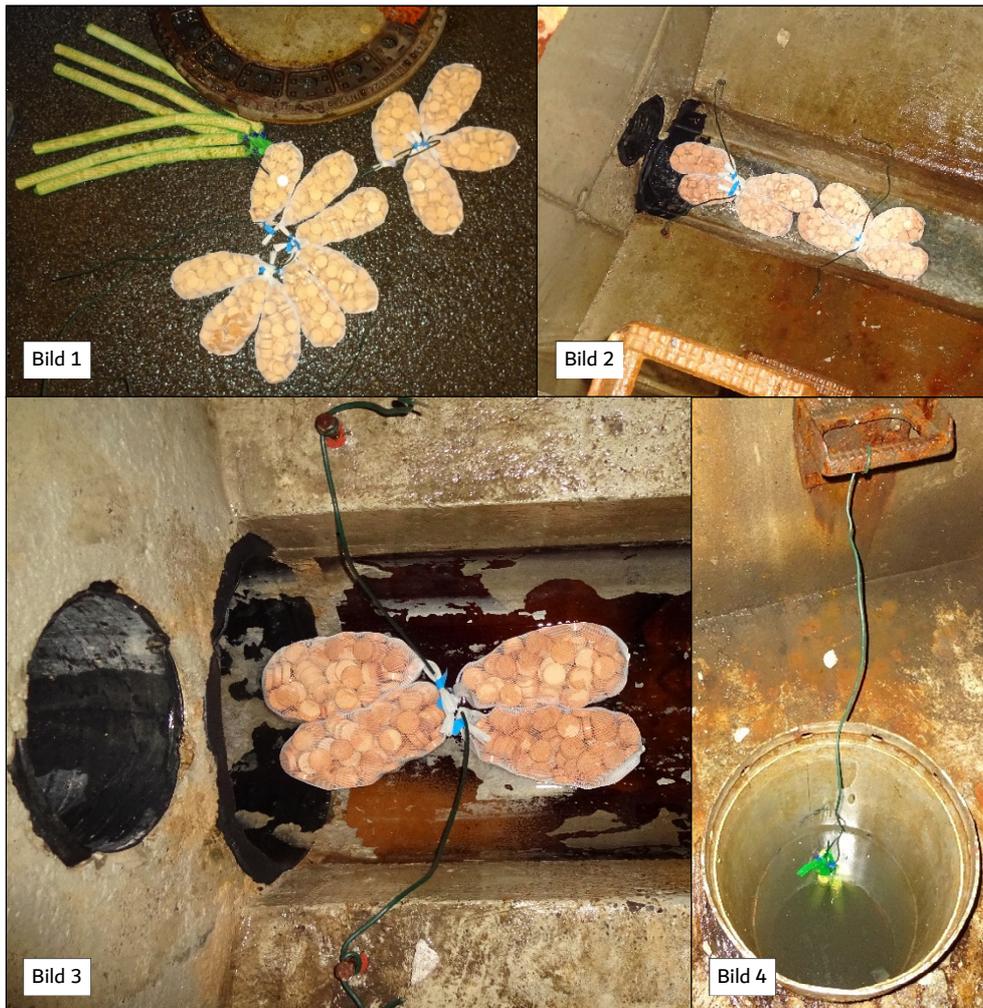


Abbildung 43. Bild 1: vorbereitete feste Härtestabilisatoren zur Bestückung von Überlaufbrunnen und Transportleitungen; Bild 2 & 3: eingebrachte Härtestabilisatoren in Netzen zu je 500 g; Bild 3: eingehängte Härtestabilisatoren in einem Überlaufbrunnen; Tunnel Reinertshof

Während der Wartungsarbeiten an dem sekundären EWS wird die Dauer der Spülung (auf Minuten gerundet) für jeden Spülabschnitt im Rahmen der Masterarbeit dokumentiert.

### **Versinterungsproblematik des sekundären EWS und deren Zusammenhänge**

Die beiden Ulmendrainageleitungen sowie die Tragschichtdrainagen oberhalb der Transportleitung des Tunnels weisen keine Versinterungen auf. Massive feste Versinterungen treten in Bereichen der beiden Transportleitungen (West- u. Oströhre) auf (Abbildung 44).

Aus der Tragschichtdrainage tritt nur in geringsten Mengen Drainagewasser in die Transportleitung ein. Diese kann somit nicht als Versinterungsursache genannt werden. In den Transportleitungen wird vorwiegend das azendente Grundwasser der Überlaufbrunnen ausgeleitet. Dieses drückende Grundwasser durchströmt die schwimmende Gründung (Pfahlgründungen) des Tunnelbauwerks und kann kalkhaltige Baustoffe lösen. Dies kann als Ursache für die massiven Versinterungen genannt werden. Daten zur Anordnung der Pfahlgründungen und den verwendeten Baustoffen und Mengen liegen nicht vor.

Aus Gesprächen mit den zuständigen Wartungspersonal geht hervor, dass seit einigen Jahren feste Härtestabilisatoren zur Anwendung kommen. Diese wurden von Anfang in jeden Überlaufbrunnen und jedes Gerinne der Transportleitung eingehängt (Abbildung 43). Ein Zuwachs an Versinterung konnte so vermieden werden. Nach etwa einem Jahr lösten sich die festen Versinterungen während der Spülungen in einzelnen Abschnitten des EWS. Dies konnte auch während Evaluierung beobachtet werden. Aufgrund des beschränkten Wartungsfensters (halbjährliche Spülung) wird nach und nach die Transportleitung von den Versinterungen befreit. Fräsarbeiten begleitet von tagelangen Sperrungen konnten so vermieden werden. (administratives Personal 1, persönliche Kommunikation, 06. Mai 2019)



Abbildung 44. Bild 1-4: Abgelöste feste Versinterungen aus der Transportleitung; Tunnel Reinertshof

Eine Gegenüberstellung der Spülgeschwindigkeiten einzelner Entwässerungsleitungen zeigt die wartungsintensiven Bereiche des EWS (Abbildung 45). Ein Vergleich zueinander kann aufgrund unterschiedlicher Vorgaben (einmalige Spülung; Auslassen von Haltungen bzw. Leitungen) nicht erfolgen. Geologische und hydrologische Daten waren nicht vorhanden.

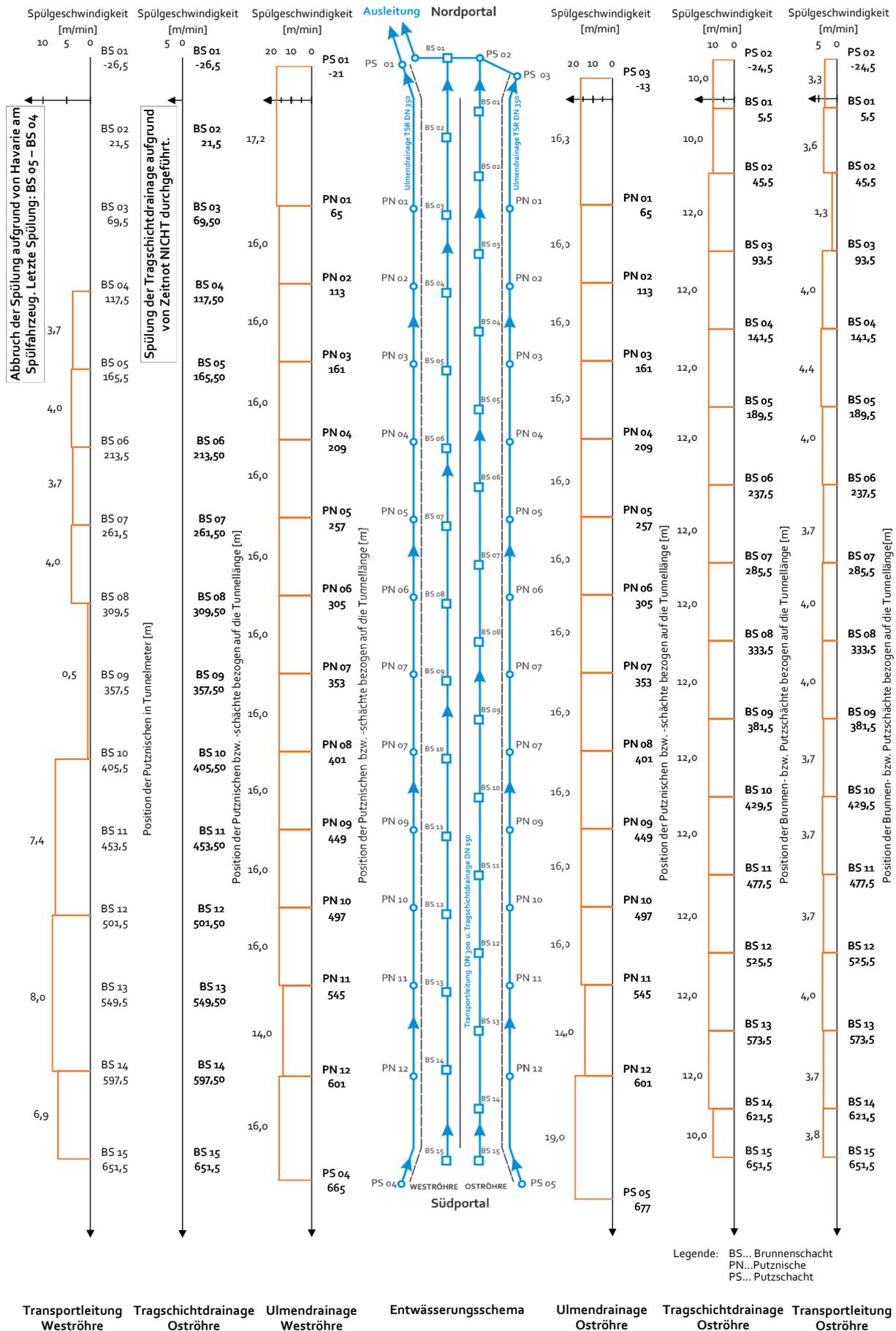


Abbildung 45. Gegenüberstellung von Spülgeschwindigkeiten, sek. EWS; Tunnel Reinertshof

## 4 Langzeitversuch mit festen Härtestabilisatoren

### Allgemein

Resultierend aus den Bestandserhebungen von Wartungsaufwänden am sekundären EWS und der festgestellten, zumeist im Verlauf der ersten Betriebsjahre aufkommenden und anhaltenden Versinterungserscheinungen wird ein IN SITU Langzeitversuch (LZV) durchgeführt. Auf einer Teststrecke werden feste Härtestabilisatoren in das primäre EWS implementiert. Durch definierte Vergleichsstrecken ohne feste Härtestabilisatoren wird die Langzeitentwicklung der Versinterung mit jener ohne präsedimentäre Wartungsverfahren gegenübergestellt. Ein Mess- und Beobachtungsprogramm liefert Ergebnisse zur Veränderung der Wasseranalytik und der Versinterungsentwicklung sowie Aussagen zu zukünftigen Wartungsaufwänden des sekundären EWS. Als Versuchsstandort konnte im Zuge des Rohbaus der Forschungseinrichtung „Zentrum am Berg (Abbildung 46) eine adäquate Teststrecke gewählt werden.

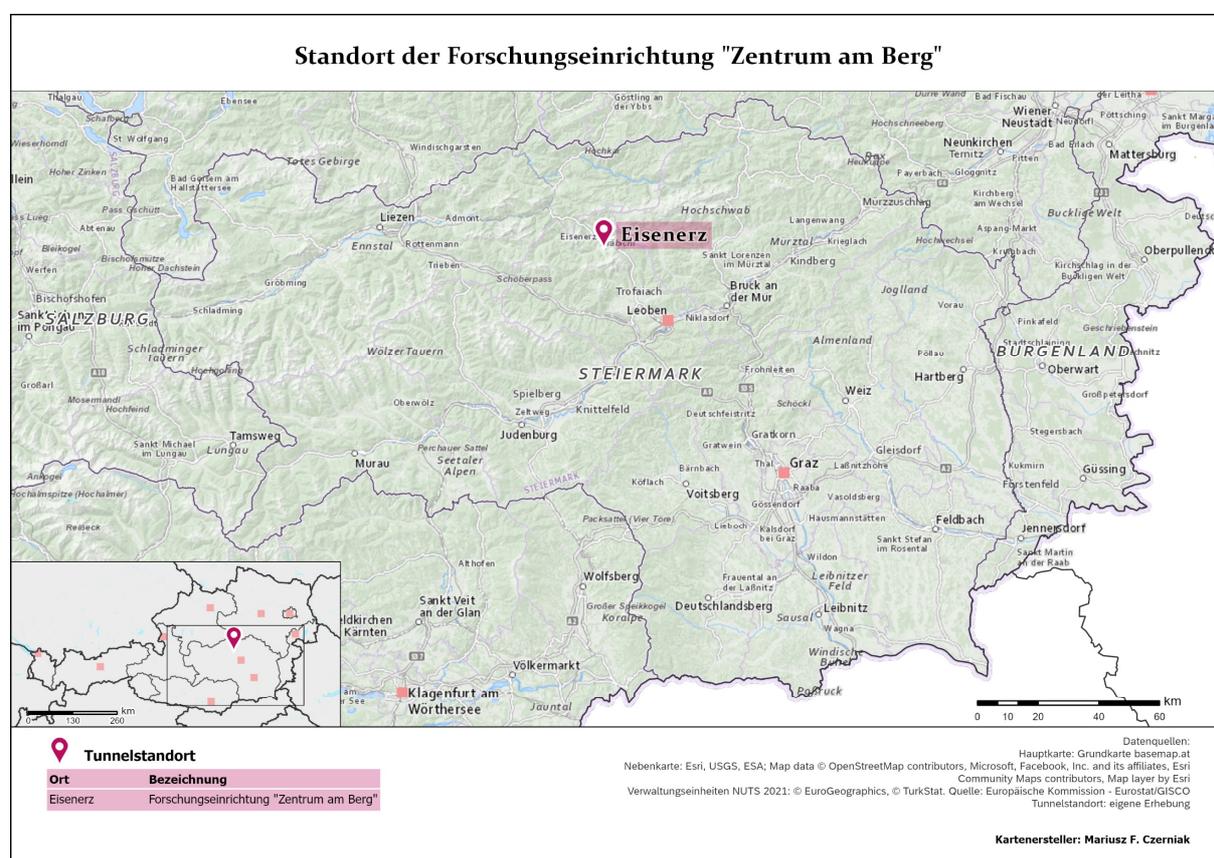


Abbildung 46. Standort der Forschungseinrichtung "Zentrum am Berg"

Beim Zentrum am Berg (ZaB) handelt es sich um ein Forschungs- Trainings- und Schulungszentrum für den Bau und Betrieb von Untertageanlagen. Das Tunnelbauwerk umfasst jeweils ca. 350 m lange parallel verlaufende Straßentunnel (ST) und zwei Eisenbahntunnel (EBT) mit einer Länge von ca. 180 m bzw. ca. 400 m, zwei Querschläge, sowie einen Verbindungstunnel zur Anbindung an das Bestandstollensystem. Die Tunnelbauten befinden sich auf dem Bergbaugelände der VA Erzberg im steirischen Eisenerz (Abbildung 47). (Kendlbacher, et al., 2019)

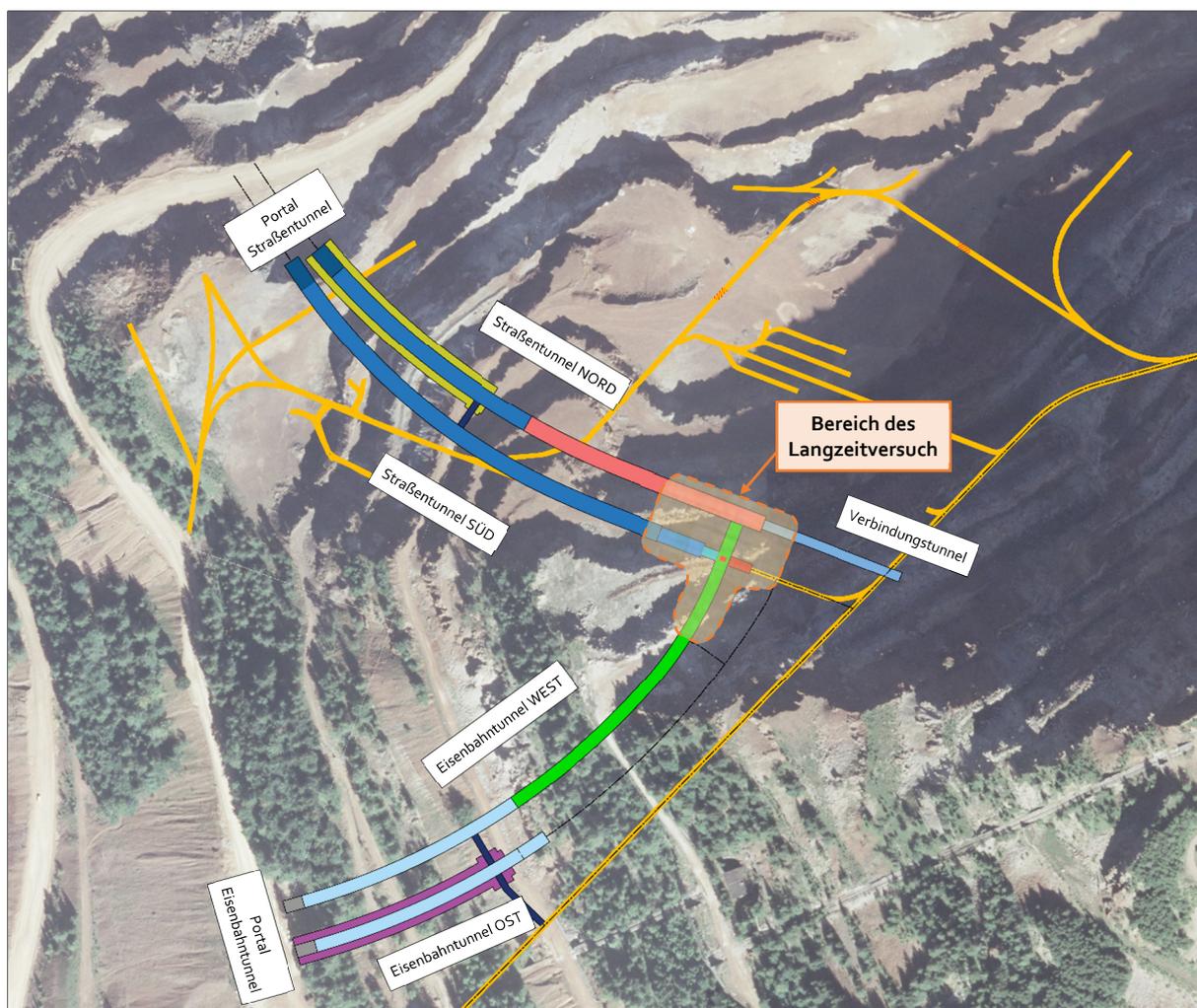


Abbildung 47. Lageplan ZaB und Bereich des Langzeitversuchs – überarbeitet auf Grundlage Übersichtslegeplan Plannummer LP-100\_FC; Quelle: Forschungseinrichtung „Zentrum am Berg“

### Versuchsbereich

Um die Ergebnisse aus der Langzeitbeobachtung qualitativ bestmöglich gegenüberzustellen, wurde bei der Wahl der Streckenabschnitte, soweit es die Trassenführung und der Baubetrieb zuließ, auf gleiche Rahmenbedingungen hinsichtlich geologischer bzw. hydrogeologischer Gegebenheiten, der durchgeführten Bautechnik und der Ausführung des sek. EWS geachtet.

Für die Implementierung der festen Härtestabilisatoren wurde die Weströhre des Eisenbahntunnels gewählt. In der ersten Etappe wurden diese von PS 04 (TM 328) des Straßentunnels Nord (Kreuzungspunkt Straßentunnel Nord und Eisenbahntunnel West) bis PS 07 (TM 378) des Eisenbahntunnels West ausgelegt, in der zweiten Etappe von PS 07 bis PS 08 (TM 302). Zusammen weist die Teststrecke eine Gesamtlänge von 105 m auf. Als Vergleichsstrecken wurden zuströmende Entwässerungsabschnitte zu den Haltungen der Teststrecke gewählt. Hierbei handelt es sich um die Abschnitte PS 02 (TM 252) bis PS 05 (TM 376) der Nordröhre des Straßentunnels und PS 14 (TM 260) bis PS 16 (TM 370) der Südröhre der Straßentunnels (Abbildung 48).

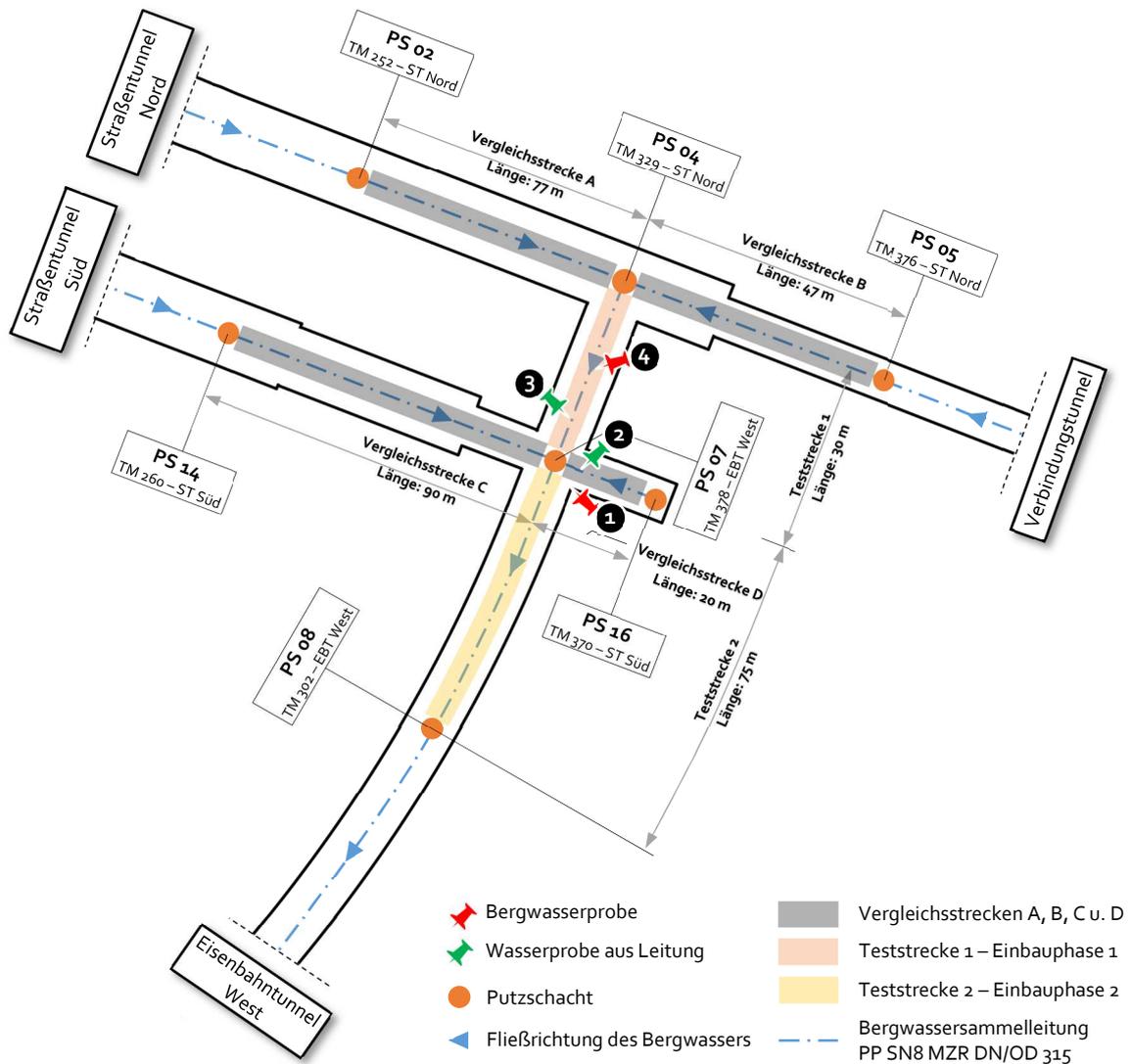


Abbildung 48. Lageplan des Langzeitversuchs; Forschungseinrichtung "Zentrum am Berg"

Im Zuge einer Begehung am 11. September 2018 wurden an vier Stellen Wasserproben gezogen. Zwei Wasserproben aus dem Auslauf der bereits verlegten Sammelleitungen (Probe 2 u. 3), die Probe 1 von einem Bergwasserzutritt an der Ausbruchskante der Tunnellaubung und die Probe 4 am Zulauf zu den Schlitzöffnungen der Sammelleitung (Abbildung 48). Die Proben wurden von der Firma © New Environmental Technology GmbH analysiert (Tabelle 13).

Tabelle 13. Messwerte der Wasserproben

Parameter	Einheit	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4
Temperatur	[°C]	6,1	7,0	7,1	6,2
pH-Wert	[-]	7,61	9,28	12,14	11,97
elektr. Leitfähigkeit	[µS/cm]	392	368	3590	2270
Gesamthärte	[°dH]	8,97	8,15	40,8	20,8
Calcium	[mg/l]	24,9	11,5	284,4	147,8
Magnesium	[mg/l]	23,7	28,3	6,78	1,33

### **Geologie und Hydrogeologie im Einflussbereich des Langzeitversuchs**

Im Straßentunnel Nord von TM 252 bis TM 303 liegt im gesamten Querschnitt vorwiegend Ankerit vor. Dieser weist entlang von Klüften oder Störungen Sideritvererzungen auf. Teilweise treten Übergänge in Kalkstein bzw. Kalkschiefer auf. Ab TM 303 bis TM 330 wurde eine Störungszone mit Schiefen bzw. Phylliten und vorwiegend Kalksteinen bzw. Kalkmarmoren, Kalkschiefern und Kieselschieferlagen (Sauburger Kalke) aufgeföhren. Von TM 330 setzen sich die kieseligen Karbonatgesteine fort. Ab etwa TM 345 wird größtenteils Kalk bis Kalkmarmor angetroffen, welcher im Bereich TM 352 bis 363 zugunsten von hauptsächlich Kieselschiefer in den Hintergrund tritt. Mit TM 363 tritt ein Wechsel der Karbonatgesteine zu quarzitischen Schiefen bis Phylliten und Chlorit-Quarz-Schiefen (Eisenerzer Schichten) auf. Zwischen TM 253 und ca. TM 270 wurden tropfende Bergwasserzutritte aus der Firste bzw. der Ortsbrust dokumentiert, ansonsten war das aufgeföhrene Gebirge trocken bis bergfeucht. Im Bereich TM 300 und TM 345 traten einige tropfende bis schwach rinnende Bergwasserzutritte auf, ansonsten erwies sich das Gebirge trocken bis bergfeucht. Die Gesamtschüttung dieser Wasserzutritte lag bei etwa 0,5 l/s. (Kendlbacher, et al., 2019)

Im Straßentunnel Süd befindet sich ab TM 253 bis TM 300 in wechselnder Zusammensetzung Ankerit und Siderit, bereichsweise Kalkstein. Ab ca. TM 300 liegt im Strossen- und Sohlbereich Blasseneckporphyroid vor. Bei etwa TM 340 herrscht eine Scherzone mit einer Abfolge von Blasseneckporphyroid, Phyllit, vererzten Karbonaten und Kalkschiefer. Ab ca. TM 346 treten im unteren Ortsbrustbereich Phyllit bzw. Schiefer (Eisenerzer Schichten) auf. Im Hangenden wurden bis TM 370 Kalk und Dolomit mit wechselnden Anteilen von Ankerit- bzw. Sideritvererzungen aufgeföhren. Das Gebirge ist im Bereich TM 253 bis TM 300 trocken bis bergfeucht. Bei TM 306 wurde ein tropfender Bergwasserzutritt aus der rechten Ulme verzeichnet und bei TM 311 und TM 323 schwach rinnende Zutritte aus der Ortsbrust bzw. der rechten Laibung festgestellt. Im Verschneidungsbereich mit dem Eisenbahntunnel West (TM 350) betrug der maximale Bergwasserzutritt etwa 0,5 l/s. (Kendlbacher, et al., 2019)

Im Eisenbahntunnel West liegt bis TM 325 Blasseneckporphyroid vor. Danach streicht flach einfallend eine Störungszone, die im Hangenden den Porphyroid gegen phyllonitischen Schiefer bis Phyllit (Eisenerzer Schichten) abgrenzt. Über diesen befindet sich Kalk bis Kalkmarmor bzw. Dolomit bis Dolomitmarmor. Bis TM 325 herrschen trockene bis bergfeuchte Bergwasserverhältnisse. Wasserzutritte wurden während des Vortriebs nicht angetroffen. Zwischen TM 335 und ca. TM 350 wurden häufig rinnende Bergwasserzutritte festgestellt. Die Gesamtmenge dieser Zutritte betrug im Vortriebsbereich maximal ca. 1 l/s. Rinnende Wasserzutritte traten auch bei TM 375 und TM 390 auf. (Kendlbacher, et al., 2019)

### **Bautechnik im Einflussbereich des Langzeitversuchs**

Das Tunnelbauwerk weist im Einflussbereich des Langzeitversuchs im Hinblick auf seine Charakteristik und Zielsetzung unterschiedliche Regelquerschnitte mit entsprechenden Querschnittsflächen auf. Die Überlagerungen im Einflussbereich liegen zwischen 100 m und 180 m.

Im Straßentunnel Nord wurde ein Regelquerschnitt ohne Sohlgewölbe ausgeführt. Für den Ausbruch wurde eine Querschnittsunterteilung in Kalotte und Strosse bewerkstelligt. Die

Gebirgslösung erfolgte im Sprengvortrieb. Die Abschlagslänge variierte aufgrund wechselnden Gebirgsverhaltens im Ausbruchsbereich mehrfach zwischen 1,0 m und 1,7 m. Die Kalotte konnte durchgehend vollflächig vorgetrieben werden. Zur Sicherung des Vortriebsbereichs kamen Spieße im First- und Kämpferbereich zur Anwendung (4 m lange Vollspieße unvermörtelt und IBO) bzw. Spritzbeton als Sofortsicherung der Ortsbrust. Die Strosse wurde im Sprengvortrieb nachgezogen (2-fache Kalottenabschlagslänge). Bei TM 345 erfolgte eine Umstellung auf das kleinere Profil des Verbindungstunnels, welcher vom Straßentunnel zum Bestandstunnelsystem des Bergbaus führt. Dieser wurde durchgehend im Sprengvortrieb aufgefahren. Aufgrund des guten Gebirgsverhaltens konnte durchwegs eine Abschlagslänge von 1,7 m bewerkstelligt werden. Im Vortrieb kamen unvermörtelte Spieße als Vortriebsicherung zum Einsatz. Die Ortsbrust und die Laibung wurden nach dem Schuttern und Ablauten größtenteils mit Spritzbeton vorgespitzt. (Kendlbacher, et al., 2019)

Im Straßentunnel Süd wurde bis TM 273 ein Regelquerschnitt ohne Sohlgewölbe, unterteilt in Kalotte und Strosse, ausgeführt. Danach wurde auf einen kreisrunden Tübbingquerschnitt (TM 273 bis TM 334) umgestellt und in Kalotte, Strosse und Sohle unterteilt. Von TM 334 bis TM 346 (Durchschlag in den EBT West) wurde ein Verbindungstunnelquerschnitt ausgeführt. Dieser Bereich wurde mittels Vollausschlag vorgetrieben (Kalotte u. Strosse). Bei TM 355 erfolgte der Anschlag des E-Raums in Verlängerung der Achse des Straßentunnels Süd. Im Bereich des Langzeitversuchs wurde das Gebirge durchwegs mittels Sprengvortrieb durchörtert, mit Ausnahme des Durchschlagsbereichs zum EBT West und zwischen TM 335 und TM 338. In diesem Bereich wurde mechanisch mit dem Tunnelbagger vorgetrieben. Die Abschlagslängen variierten zwischen 1,3 m und 1,7 m. Die Ortsbrust konnte durchgehend vollflächig geöffnet werden. Zur Vortriebsicherung im First- und Kämpferbereich kamen Spieße zur Anwendung (4 m lange Vollspieße unvermörtelt bzw. IBO). Zur Sofortsicherung der Ortsbrust wurde nach dem Schuttern und Ablauten Spritzbeton verwendet. Der Strossenvortrieb erfolgte mittels Sprengen oder mechanischen Lösens, während im Sohlvortrieb das Gebirge meist mechanisch gelöst wurde. Die Abschlagslängen richteten sich nach jenen in der Kalotte bzw. Strosse. (Kendlbacher, et al., 2019)

Der Eisenbahntunnel West weist im Einflussbereich des Langzeitversuchs einen Regelquerschnitt ohne Sohlgewölbe (Kalotte u. Strosse) auf. Aufgrund der unterschiedlichen Verbandsfestigkeiten variiert die Lösemethode, jedoch überwiegt der Vortrieb mittels Auflockerungsschüssen bzw. Laden und Sprengen von festeren Teilbereichen der Ortsbrust und anschließendem Lösen mit dem Tunnelbagger. Bereichsweise wurde reiner Sprengvortrieb bzw. reiner Baggervortrieb ausgeführt. Die Abschlagslänge betrug meist 1,0 m, in Teilabschnitten 1,3 m. Im Bereich des Langzeitversuchs konnte die Ortsbrust vollflächig geöffnet werden. Zur Vortriebsicherung kamen im First- und Kämpferbereich Spieße zur Anwendung bzw. eine Sofortsicherung der Ortsbrust mittels Spritzbeton. Im Strossenvortrieb erfolgte die Lösung überwiegend rein mechanisch. Teilweise waren Lockerungsschüsse nötig. Die Abschlagslänge richtete sich nach jenen der Kalotte (2-fache Kalottenabschlagslänge). (Kendlbacher, et al., 2019)

Der Ausbau des Tunnelbauwerks im Bereich des Langzeitversuchs erfolgte einschalig. Dabei wurde eine Systemankerung (SN-Anker), berg- und hohlraumseitige Baustahlgittermatten und Gitterträger eingebaut und mit Spritzbeton bedeckt.



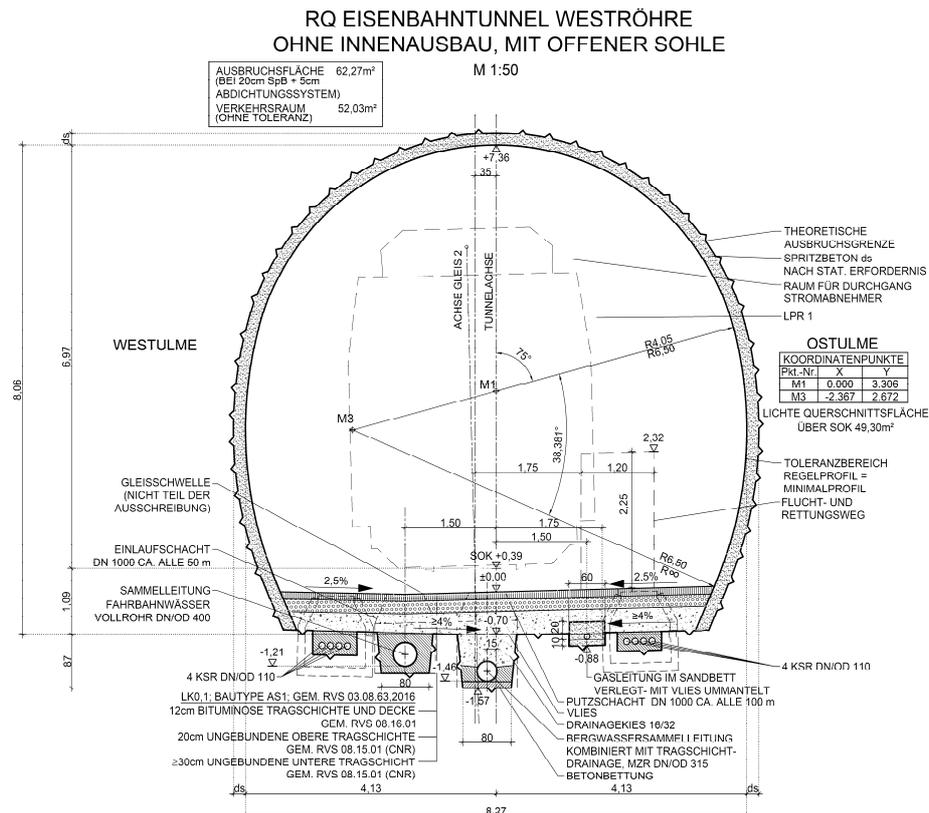


Abbildung 50. Anordnung und Ausführung der Bergwassersammelleitung - RQ EBT West –  
Planausschnitt, Plannr.: RQ-005\_FC; Quelle Forschungseinrichtung "Zentrum am Berg"

### Versuchsaufbau

Da davon auszugehen ist, dass Bergwasserzutritte versiegen bzw. neue Zutritte entstehen und der Weg des Bergwassers auch innerhalb der Drainagekiesschüttung seine Richtung verändern kann, ist der Bereich, an dem das Bergwasser durch die Schlitzöffnungen in die Leitung übergeführt wird, undefiniert. Deshalb wurde auf der Teststrecke eine gleichmäßige Dosierung entlang beider Seiten der eingebetteten Sammelleitung durchgeführt. So ist sichergestellt, dass das zulaufende Bergwasser stets feste Härtestabilisatoren umspült und somit konditioniert wird.

Als feste Härtestabilisatoren wurden Baypure® DSP Tabs 200 – Polysuccinimid-Depotsteine verwendet. In der ersten Einbauphase (25. März 2019) wurden den Schlitzöffnungen der Bergwassersammelleitung entlang, auf einer Länge von 30 m beidseits 50 cm lange 294-g-Schlauchnetze ausgelegt. Diese wurden im Zuge der nächsten Bauphase mit Drainagekies überschüttet. Am 01. April 2019 wurden auf der zweiten Teststrecke (Länge 75 m) lose Polysuccinimid-Depotsteine verwendet. Dabei wurden diese mit dem Drainagekies vermischt und entlang der Schlitzöffnungen ausgebreitet. In weiterer Folge wurde die Leitung mit Drainagekies bedeckt. Pro Laufmeter und Seite wurde eine Menge von 500 g der Polysuccinimid-Depotsteine eingebracht (Abbildung 51 und Tabelle 14).



Abbildung 51. Ausgebrachte Härtestabilisatoren Baypure® DSP Tabs 200 – Polysuccinimid-Deposteine, Bild 1: 50-cm-lange Schlauchnetze á 294 g, Bild 2: lose ausgestreute Deposteine – 2 x 500 g pro Laufmeter; Forschungseinrichtung "Zentrum am Berg"

Tabelle 14. Test- und Vergleichstrecken des Langzeitversuchs

Bereich	Lage	Länge [m]	feste Härtestabilisatoren - Baypure® DSP Tabs 200	ausgebrachte Menge [g/lfm]
Teststrecke 1	EBT-West	30	in Schlauchnetzen	1176
Teststrecke 2	EBT-West	75	lose Deposteine	1000
Vergleichstrecke A	ST-Nord	77	-	-
Vergleichstrecke B	ST-Süd	47	-	-
Vergleichsstrecke C	ST-Süd	90	-	-
Vergleichsstrecke D	ST-Süd	20	-	-

### Mess- und Beobachtungsprogramm

Die Entwicklung der Versinterungsentstehung und anderer Ablagerungen wurde mittels einer Bilddokumentation durchgeführt. Als Beobachtungspunkte wurden die Leitungszugänge in den Putzschächten gewählt. Durch Ausleuchten des Rohres konnten so, je nach Bedingungen, die ersten 3 bis max. 5 m der Leitung dokumentiert werden. Im Bereich des LZV wurden 14 Beobachtungspunkte und 11 Messpunkte definiert (Abbildung 53).

Die Messungen des Bergwassers wurden innerhalb der Putzschächte im Bereich des Schlammfangs im stehenden Bergwasser durchgeführt. Beim Putzschacht PS 07 wurde jeweils eine Wasserprobe von den drei Zuläufen und dem Abfluss gezogen und die Messung außerhalb des Putzschachtes durchgeführt. Es wurde der pH-Wert, die elektr. Leitfähigkeit und die Wassertemperatur des gefassten Bergwassers gemessen. Die Messungen wurden mit einem Taschen-pH-Meter bzw. mit Leitfähigkeits-Messgerät durchgeführt. Vor jeder Messung wurden die Messgeräte kalibriert (Abbildung 52).

Zur Teststrecke zählen die Mess- und Beobachtungspunkte des Putzschachtes PS 08 (MP 11 bzw. BP 14) sowie MP 07 u. MP 09 bzw. BP 10 u. BP 12 des Putzschachtes PS 07. Die Vergleichstrecken beinhalten die Mess- und Beobachtungspunkte der Putzschächte PS 02, 04, 05, 14, 15 und PS 16 sowie MP 06 u. MP 08 bzw. BP 09 u. BP 11 des Putzschachtes PS 07.

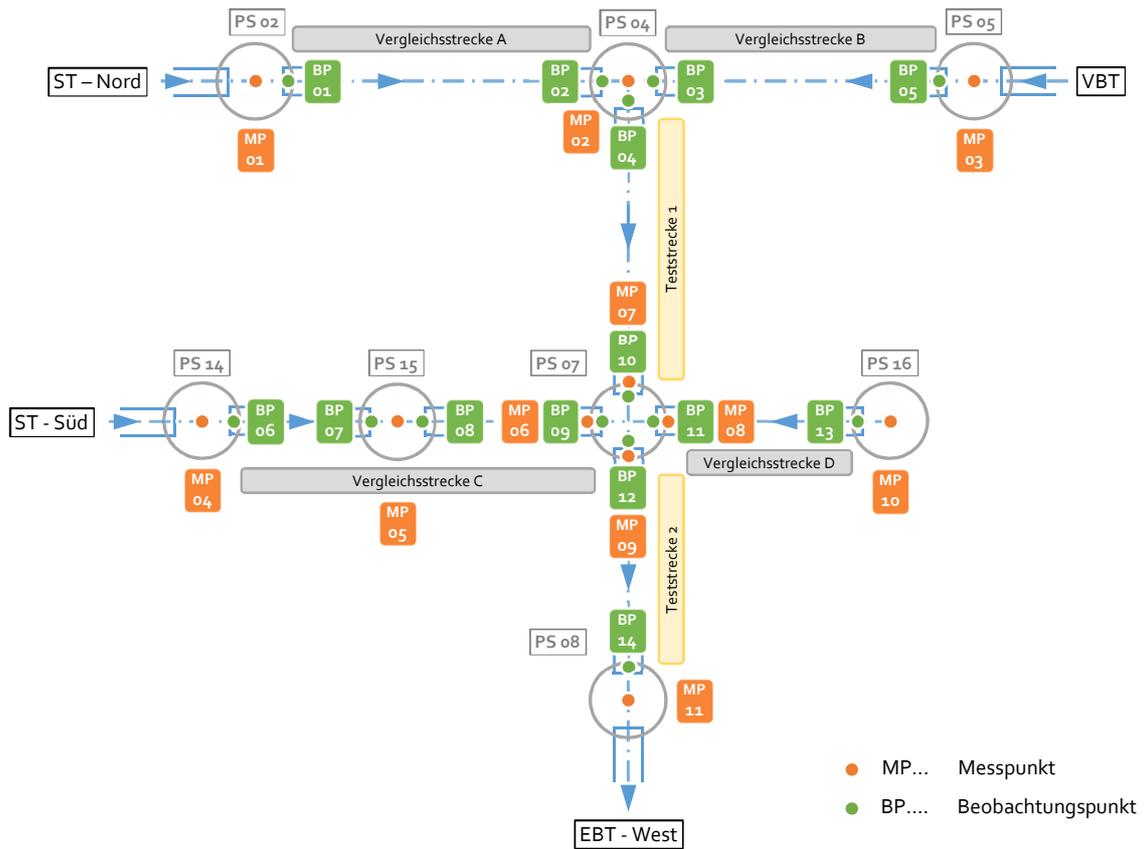


Abbildung 53. Mess- und Beobachtungsschema des Langzeitversuchs



Abbildung 52. Verwendete Messgeräte - Bild 1: Leitfähigkeits-Messgerät Cond 3110 (WTW);  
Bild 2: Taschen-pH-Meter pH 3110 (WTW)

Das Mess- und Beobachtungsprogramm wurde auf sechs Monate ausgelegt und in einem Intervall von einem Monat durchgeführt. Die erste Messung bzw. Beobachtung fand im Juli 2019 statt. Aufgrund einer im Oktober 2020 nicht realisierbaren Inspektion wurde mit der im Januar 2020 stattgefundenen Inspektion das Mess- und Beobachtungsprogramm beendet.

Im September 2022 fand eine Inspektion statt. Aufgrund der Ergebnisse bzw. Beobachtungen aus den ersten sechs Inspektionen wurden nur die Putzschächte PS 07, 04 und PS 05 analysiert und dokumentiert.

### Ergebnisse des Langzeitversuchs

Am 28. Mai 2019 fand eine Spülung des gesamten sek. EWS statt. Der Spülerfolg und der IST-Zustand wurde mittels Kamerabefahrung festgehalten und protokolliert. Am Beobachtungspunkt BP 10 – Teststrecke 1 (PS 07) konnten vor der Spülung größere Mengen an Ablagerungen dokumentiert werden (Abbildung 54). Eine Probe wurde gezogen. Eine flockig-schuppige Struktur und ein brüchiger Zusammenhalt der einzelnen Bestandteile wurden festgehalten. Eine Analyse hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung wurde nicht durchgeführt. Eine Bestandsaufnahme aller Beobachtungspunkte vor der Spülung war nicht Teil dieser Arbeit. Mit Juli 2019 konnte mit der Langzeitbeobachtung begonnen werden. Zu September 2021 fand eine seitens des Betreibers initiierte, örtlich begrenzte Spülung der Haltungen PS 04 u. PS 05 (Vergleichsstrecke B) statt.



Abbildung 54. Bild 1: Ablagerung bzw. Versinterung am BP 11 (PS 07) - 28. Mai 2019;  
Bild 2 u. 3: Versinterungsprobe vom BP 11 - nass bzw. getrocknet

Im Folgenden werden die Ergebnisse an den Beobachtungs- und Messpunkten näher erläutert. Die detaillierten Ergebnisse der Wasseranalytik bzw. die Bilddokumentation der Beobachtungspunkte sind dem Anhang C bzw. D zu entnehmen.

Beim Beobachtungspunkt BP 01 (PS 02) konnte über den gesamten Zeitraum des LZV kein Zulauf von gefasstem Bergwasser beobachtet werden. Die Rohrwandungen waren frei von Versinterungen. Messungen (MP 01) konnten nur von dem im Schlammfang gefassten Bergwasser durchgeführt werden. Der pH-Wert von anfangs 8,75 stieg leicht über 9 und ging auf 8,4 zurück. Die elektr. Leitfähigkeit lag zwischen 538 und 717  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Am Beobachtungspunkt BP 02 waren an den Rohrwandungen ausgehärtete Bereiche von Zementleim zu sehen. Eine Versinterung fand nicht statt. Von Juli bis November 2019 waren an der Wasseroberfläche Ausfällungen zu beobachten. Da kein Zulauf aus Richtung des ST Nord festgestellt wurde, resultieren diese aus dem stetigen Zulauf des Verbindungstunnels (BP 03). BP 03 u. BP 04 (Beginn der Teststrecke 1) wies von Juli bis November 2019 ein weißlich trübes Bergwasser auf. Auf der Oberfläche bestand eine durchgehende dünne weiße Schicht von Ausfällungen. Ein pH-Wert im Bereich von 12 wurde bis Dezember 2019 gemessen und nahm mit der Zeit des LZV ab. Zu September 2022 lag dieser bei 7,43. Die elektr. Leitfähigkeit von über 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bei der Erstmessung ging innerhalb eines Monats auf 1760  $\mu\text{S}/\text{cm}$  stark zurück und betrug im September 2022 494  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Geringes Versinterungswachstum bei BP 03

u. BP 04 konnte an der Rohrsohle von November bis Januar 2019 beobachtet werden. Zu September 2022 war diese nicht mehr vorhanden.

Am Beobachtungspunkt BP 05 bzw. Messpunkt MP 03 (PS 05 des VBT) wurden über die Zeit größere Zuwächse oberflächlicher Ausfällungen geringer Festigkeit beobachtet, deren Dicke mit der Zeit zunahm. Zu September 2022 waren Spuren unterschiedlich hoher Wasserstände an den Rohrwandungen mit verkrusteten bzw. ausgetrockneten Überresten der Ausfällungen (Versinterungen) vorhanden. Von Juli bis Januar wurden pH-Werte von über 12 gemessen. Zu September 2022 lag dieser bei 7,85. Die bei der Erstmessung aufgenommene hohe elektr. Leitfähigkeit von 5560  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ging stetig zurück. Zu Januar 2019 lag diese bei 2830  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und zu September 2022 bei 869  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Im Putzschaft PS 14 mit dem Mess- bzw. Beobachtungspunkt MP 04 bzw. BP 06 gab es keinen Zulauf bzw. Ablauf von Bergwasser. Die Rohrrinnenseiten waren frei von Versinterungen, überwiegend trocken bzw. mit Kondensationswasser benetzt und zeigten geringste sedimentäre Ablagerungen. Die Wasseranalytik konnte nur an dem im Schlammfang des Schachtes stehenden Wasser durchgeführt werden. Die pH-Werte lagen zwischen 8,14 u. 8,80, die Messungen der elektr. Leitfähigkeit zwischen 608 u. 754  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

An den Beobachtungspunkten BP 07 u. BP 08 (PS 15 des ST Süd) lag der Wasserstand stets etwa in der Mitte des Entwässerungsrohres. Der Rohrboden war mit Feinanteilen belegt und locker gelagert. An Bereichen der Rohrwandungen konnten sich diese festsetzen. Eine Versinterungsentstehung konnte nicht festgestellt werden. Der pH-Wert des Bergwassers lag im Bereich 7,78 u. 8,21, die Werte der elektr. Leitfähigkeit zwischen 443 u. 697  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (MP 05).

Am Beobachtungspunkt BP 09 (PS 07 - Richtung ST Süd) wies die Leitung stets einen geringen Wasserstand auf. Das Wasser war stets stehend und stammte von den anderen Zuläufen (BP 10 u. BP 11). Während des LZV sedimentierten locker gelagerte Feinanteile auf der Rohrsohle. Eine Versinterung fand nicht statt. Die pH-Werte lagen zwischen 7,75 u. 8,43. Die elektr. Leitfähigkeit lag im Bereich von 693 bis 441  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Am Beobachtungspunkt BP 10 (PS 07 – Richtung ST Nord), Ende der Teststrecke 1, waren zu Anfang harte Ablagerungen an der Rohrsohle vorhanden. Bis Januar 2020 nahmen diese am Volumen und Bedeckung zu. Mit September 2019 wurden an den Schlitzöffnungen weiße Ausblühungen bzw. Versinterungen aufgrund des einlaufenden Bergwassers festgestellt. Eine Zunahme konnte bis Januar 2020 beobachtet werden. Zu September 2022 waren diese Versinterungen ihrer Größe nach unverändert. Die Rohrsohle war annähernd frei von Ablagerungen. Am Messpunkt MP 07 ging der pH-Wert von 8,06 im Juli 2019 auf 7,64 im Januar 2020 zurück. Zu September 2022 lag dieser bei 7,32. Die elektr. Leitfähigkeit schwankte zwischen 605 u. 899  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Am Messpunkt MP 08 bzw. Beobachtungspunkt BP 11 herrschte ein stetiger Bergwasserzulauf. Die Rohrsohle war schon zu Anfang des LZV teilweise mit harten Ablagerungen (Zementleim und Versinterung) bedeckt. Im Betrachtungszeitraum nahm die Ablagerung auf der Rohrsohle zu. Ab September 2019 konnten Ausblühungen an den Schlitzöffnungen des Entwässerungsrohres festgestellt werden, deren Wachstum gering

zunahm. Zu September 2022 war die Rohrsohle annähernd frei von Ablagerungen. Die pH-Werte schwankten zwischen 7,52 u. 8,74. Die elektr. Leitfähigkeit lag im Bereich von 391 u. 635  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Am Beobachtungspunkt BP 12 des Putzschachtes PS 07 (Auslauf) konnten an der Rohrsohle von Juli bis November 2019 biologische Ablagerungen beobachtet werden. Ab Dezember 2019 waren diese nicht mehr vorhanden. Zu dieser Zeit wurden leichte Ausblühungen unterhalb einiger Schlitzöffnungen festgestellt, die bis Januar 2020 zunahmen. Zu September 2022 war die Rohrsohle frei und die Versinterungen an den Schlitzöffnungen in gleicher Weise vorhanden. Die Messergebnisse von MP 09 im Betrachtungszeitraum liegen in etwa im gleichen Bereich, wie die des Messpunkts MP 08 (pH-Werte: 7,55 - 8,51; elektr. Leitfähigkeit: 460 – 730  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

Am Beobachtungspunkt BP 13, Beginn der Teststrecke 2, sind zu Juli 2019 Ausblühungen an den Schlitzöffnungen festgestellt worden. Bis Januar 2020 wurden weitere Bereiche von Schlitzöffnungen mit Versinterungen dokumentiert. Die Rohrsohle war über den gesamten Betrachtungszeitraum frei von Versinterungen. Am Messpunkt MP 10 wurden im Betrachtungszeitraum pH-Werte im Bereich von 7,45 bis 8,75 gemessen. Die Messergebnisse der elektr. Leitfähigkeit wiesen Werte zwischen 390 u. 479 auf.

Der Beobachtungspunkt BP 14, Ende der Teststrecke 2, zeigte keine Versinterungsentstehung. Die Rohrsohle bzw. -wandung weist über den Betrachtungszeitraum hinweg die gleichen Vorkommnisse auf. Die Messungen ergaben einen schwankenden pH-Wert von 8,70 bis 7,79. Die elektr. Leitfähigkeit lag im Bereich 431 u. 523  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Abbildung 55 gibt die Veränderung der durchgeführten Wasseranalytik im Laufe des Langzeitversuchs an den einzelnen Messpunkten wieder. Wesentliche Veränderungen und Unterschiede zu den restlichen Ergebnissen weisen die Messpunkte MP 02 u. MP 03 der Vergleichstrecke B auf. So ist die Abnahme des pH-Wertes von über 12 (Jul. 2019) auf unter 8 (Sept. 2022) festzuhalten. Große Veränderungen zeigen sich auch in der elektr. Leitfähigkeit. Werte von über 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Jul. 2019) gingen auf unter 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  zurück und erreichten den Wertebereich der anderen Messpunkte. Die Messpunkte MP 07, MP 09 u. MP 11 der Teststrecken 1 u. 2 weisen geringe Veränderungen der pH-Werte und der elektr. Leitfähigkeit auf, die den Messwerten der Vergleichstrecke (MP 05, MP06, MP 08 u. MP 10) über den Betrachtungszeitraum ähneln. Die Werte der elektr. Leitfähigkeit lagen alle im gleichen Bereich.

Die Vergleichsstrecke B (BP 03, 04 u. BP 05) zeigte im Betrachtungszeitraum ein stetiges, jedoch geringes Wachstum an Versinterungen bzw. Ausfällungen an der Wasseroberfläche bzw. Rohrsohle und den Schlitzöffnungen der Entwässerungsrohre. Zu Januar 2020 konnte im Vergleich zu Dezember 2019 kein Zuwachs an Versinterung festgestellt werden. Die Anfangstendenz zur Versinterungsbildung wird auch über die Wasseranalytik wiedergegeben. Auf der Vergleichsstrecke D wies der Beobachtungspunkt BP 11 von Juli bis Dezember 2019 geringes Versinterungswachstum an den Schlitzöffnungen der Rohrwandungen auf. Zu Januar 2020 wurde kein Zuwachs festgestellt. Eine im September

## Langzeitversuch mit festen Härtestabilisatoren

---

2022 durchgeführte Inspektion zeigte kein Anwachsen an Versinterung im Vergleich zu Januar 2019.

Auf der Teststrecke 1 zeigte sich am Beobachtungspunkt BP 10 ein geringes und stetiges Versinterungswachstum, deren Ausmaß dem BP 11 ähnelt. Betroffen waren Schlitzöffnungen und im geringen Ausmaß die Rohrsohle. Zu Januar 2019 wurde kein weiterer Zuwachs festgestellt werden. Im September 2022 war der Versinterungsgrad der Leitung unverändert zu Januar 2019. Die Teststrecke 2 (BP 12 u. BP 14) zeigte über den gesamten Betrachtungszeitraum keine Versinterungsentstehung.

Unter der derzeitigen Datenlage und der beobachteten Versinterungsentstehung kann nicht eindeutig geklärt werden, ob die Implementierung fester Härtestabilisatoren im primären EWS (siehe Versuchsaufbau) einen maßgeblichen Einfluss auf zukünftige Wartungsmaßnahmen hat. Die über 2,5 Jahre festgestellte Versinterungsentwicklung auf der Teststrecke 1 und der Vergleichstrecke D weist annähernd gleiche Grade auf. Auch während der ersten Monate der Betriebsphase, in denen von vermehrten Versinterungen auszugehen war, wies annähernd gleiches bzw. geringes Versinterungswachstum auf.

Nach dem derzeitigen Stand ist im Bereich des Langzeitversuchs von einem zukünftig geringen Wartungsaufwand auszugehen. Hinsichtlich der Wartung ist die Einhaltung der Richtlinie „Tunnelentwässerung“ zu empfehlen.

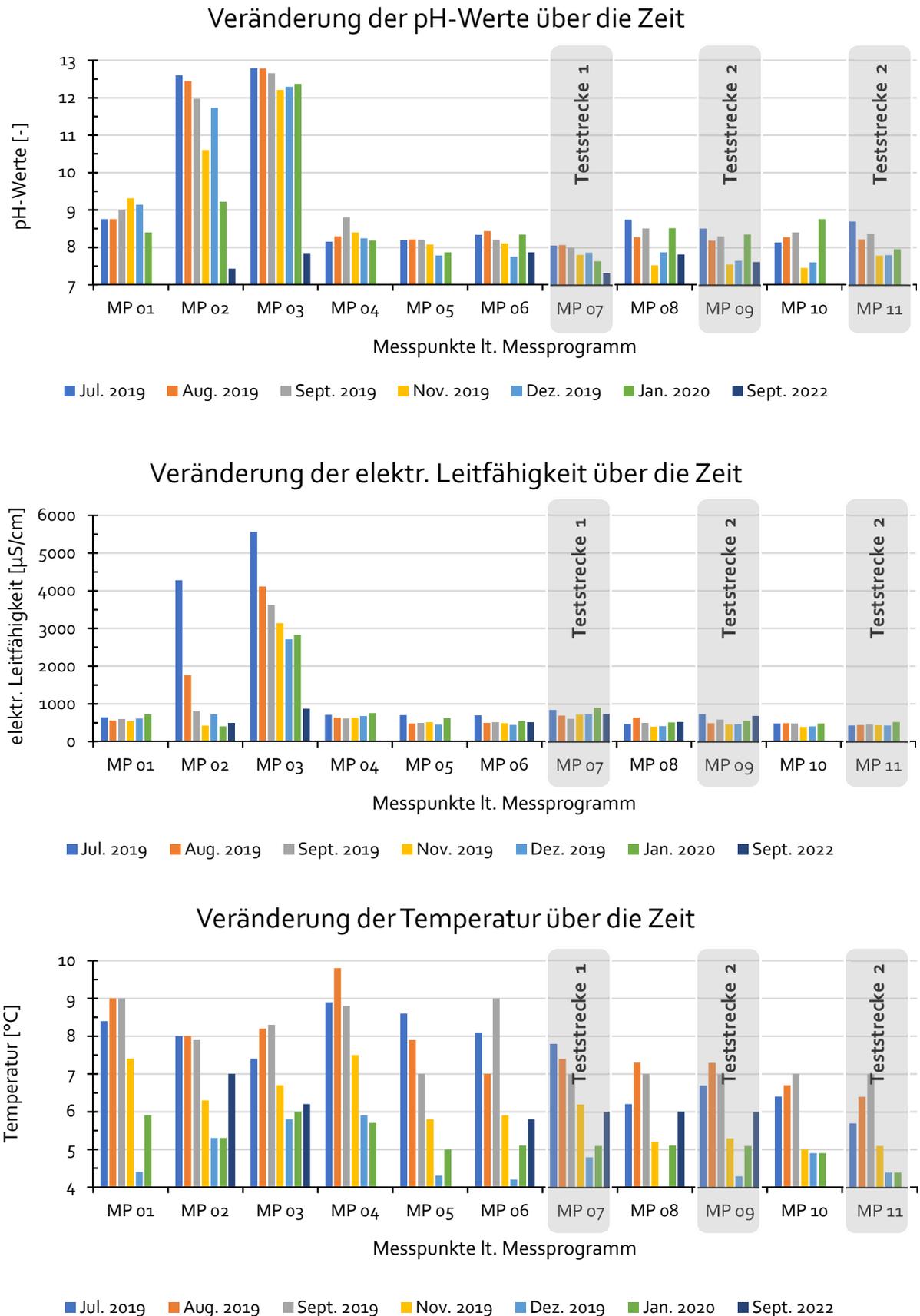


Abbildung 55. Ergebnisse der Wasseranalytik; Langzeitversuch "Zentrum am Berg"

## 5 Zusammenfassung und Diskussion

### 5.1 Evaluierte Tunnelbauwerke

Die Evaluierung der Tunnelbauwerke zeigte unterschiedliche Detaillierungsgrade hinsichtlich der erhobenen Daten. Allgemeine Bauwerksdaten konnten infolge der Recherche hinreichend erhoben werden. Pläne bzw. geologische und hydrologische Dokumentationen in ausreichender Form konnten nur für den Umfahrungstunnel „Grünburg“ gewonnen werden. Wartungsberichte bzw. Auszüge aus dem Wartungshandbuch konnten von keinem Tunnelbauwerk erhalten werden. Reine Erfahrungsberichte konnten die herrschende Versinterungsproblematik wiedergeben. Dokumentationen der Wartungsarbeiten bzw. bestehender Versinterungen konnten genau abgebildet werden (Tabelle 15).

Tabelle 15. Detaillierungsgrad erhobener Daten von evaluierten Tunnelbauwerken

Daten	Umfahrungstunnel „Hausmannstätten“	Umfahrungstunnel „Grünburg“	Tunnel „Reinertshof“
allg. Bauwerksdaten	ausreichend	ausreichend	ausreichend
Geologie & Hydrogeologie	gering	ausreichend	unzureichend
Planunterlagen	gering	ausreichend	gering
Wartungsprotokolle	unzureichend	unzureichend	unzureichend
Erfahrungsberichte	ausreichend	ausreichend	ausreichend
Dokumentation v. Wartungsarbeiten	vollständig	vollständig	vollständig
Dokumentation v. Versinterungen	vollständig	vollständig	vollständig

Bei allen evaluierten Tunnelbauwerken wurden die Wartungsarbeiten an den Drainageleitungen an jeweils zwei aufeinanderfolgenden Arbeitsschichten durchgeführt. Ein Spülerfolg am gesamten sek. EWS zur Fassung und Ausleitung von Berg- und Sickerwasser konnte in den Tunnelbauwerken UT Hausmannstätten und UT Grünburg erzielt werden. Die Wartungsarbeiten am sek. EWS des Tunnels Reinertshof konnten nicht vollends abgeschlossen werden. Mangels Zeit wurde der Leitungsstrang der Tragschichtdrainage (Oströhre) nicht gespült zusätzlich musste aufgrund einer Havarie am Spülfahrzeug die Spülung an der Transportleitung (Oströhre – BS 04) angebrochen werden.

Der Spülerfolg wird bei allen evaluierten Tunnelbauwerken durch optische Kontrolle des Spülwassers festgestellt. Bei klarem abfließendem Spülwasser wird davon ausgegangen, dass der gespülte Spülabschnitt frei von Versinterungen ist. Bei den Wartungsarbeiten im UT Grünburg findet seitens des Tunnelbetreibers zusätzlich eine eigenständige Kamerabefahrung der Entwässerungsleitungen statt. Dadurch kann der Spülerfolg mit Gewissheit bestimmt werden und falsch klassifizierte Spülabschnitte können während desselben Wartungszyklus abermals gereinigt werden. Zugleich erhält der Tunnelbetreiber durch die Auswertung der Aufnahmen genaue Informationen über den Ist-Zustand der Entwässerungsleitungen (Deformationen, schadhafte Stellen etc.) und kann zeitnah zukünftige Instandhaltungsmaßnahmen planen.

Aus der Gegenüberstellung von Geologie u. Hydrogeologie, dem sek. EWS und den errechneten Spülgeschwindigkeiten innerhalb der jeweiligen Spülabschnitte ist bei den beiden Umfahrungstunnel „Hausmannstätten“ u. „Grünburg“ zu bemerken, dass unmittelbar vor bzw. in Höhe der Schachtbauwerke die Spülgeschwindigkeiten beginnen auffallend abzunehmen. Diese niedrigen Spülgeschwindigkeiten setzen sich bis zum Ende der jeweiligen Ulmendrainage fort. Es ist festzuhalten, dass es sich hierbei um Momentaufnahmen der einzelnen Tunnelreinigung handelt. So korreliert die Abnahme der Spülgeschwindigkeit ab bzw. kurz vor dem Fluchtbauwerk mit dessen Dasein. D.h. die Spülgeschwindigkeiten sinken mit dem Einmünden der Bergwässer aus den Fluchtbauwerken. In der Masterarbeit wurden von insgesamt vier Tunnelbauwerken zwei Tunnel mit Schachtbauwerken in Einzelaufnahmen untersucht. Deswegen kann nicht bestätigt werden, ob es sich um einen kausalen Zusammenhang handelt. Hierfür müssten vollständige Aufzeichnungen zu den Schachtbauwerken bestehen. So würden Informationen über Art und Menge der vorgenommenen Stützmaßnahmen vom Schachtbauwerk sowie Tunnel, Fließrichtung des Sickerwassers um das Bauwerk den Erkenntnisstand erhöhen und die auffälligen Versinterungsbereiche ausführlicher erklären. Aufnahmen von Spülgeschwindigkeiten bei jeder Wartung bzw. Spülung des sek. EWS würden die Treffsicherheit von Aussagen über kausale Zusammenhänge erhöhen.

Der in offener Bauweise errichtete Tunnel „Reinertshof“ stellt in der Gegenüberstellung (nur Spülgeschwindigkeiten u. sek. EWS) die Wartungsaufwände deutlich dar. Anhand der zum Teil wechselnden Spülgeschwindigkeiten lassen sich hier Bereiche mit und ohne Versinterung erkennen. Als Versinterungsursache kann hier nur das aus den Überlaufbrunnen ausfließende Grundwasser angenommen werden. Daten hinsichtlich Gründungsmaßnahmen, der Wasserchemie/-analytik sowie genauere Informationen zu Geologie und vor allem der Hydrologie könnten diese Aussage untermauern oder wenigstens weiter eingrenzen.

## 5.2 Langzeitversuch mit festen Härtestabilisatoren

Die erhobenen Bauwerksdaten der Forschungseinrichtung „Zentrum am Berg“ weisen einen hohen Detaillierungsgrad auf. Trotz aufgestellter Rahmenbedingungen für die Wahl der Test- und Vergleichsstrecken zeigte sich, dass die Vergleichsstrecken A u. C bzw. deren Mess- und Beobachtungspunkte aufgrund geringen bis kaum vorhandenen Bergwasserandrangs für die Gegenüberstellung nicht herangezogen werden können. Anders die Vergleichsstrecken B u. D sowie die Teststrecken 1 u. 2, wo ein kontinuierlicher Fluss von Bergwasser an jedem Beobachtungszeitpunkt stattfand.

Nach 2,5 Jahren Betrieb ist der Versinterungsgrad des sek. EWS im Bereich des LZV als kaum bis gering zu benennen. Geringes Versinterungswachstum ist an den Vergleichsstrecken B und D sowie auf der Teststrecke 1 von Juli 2019 bis Dezember 2019 festgestellt worden. Betroffen davon sind vor allem die Perforationsöffnungen der Rohre und im sehr geringen Maß die Rohrsohle. Auf der Vergleichsstrecke B (BP 03 und BP 05) waren über den gesamten Zeitraum des LZV Ausfällungen an der Wasseroberfläche vorhanden. Ein geringer Zuwachs über die Zeit konnte beobachtet werden. Die Teststrecke 2 wies keine Versinterungen im Bereich der Rohrsohle auf. Punktuell geringe Versinterungen waren an den Schlitzöffnungen der Rohre zu erkennen, die über die Zeit nicht anwuchsen. Ab Januar 2020 konnte kein Zuwachs an den

Betrachtungspunkten des LZV festgestellt werden. Eine zu September 2022 durchgeführte Inspektion zeigte weiterhin keinen Zuwachs an Versinterungen. Die pH-Werte liegen im Bereich von 8 bzw. unter 8. Die elektr. Leitfähigkeit liegt unter 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Das Versinterungspotential ist als gering zu bewerten. Zukünftige Wartungsaufwände sind aufgrund der derzeitigen Datenlage als gering zu erachten.

Die Beobachtungspunkte der Teststrecke 1 und Vergleichsstrecke D zeigten Parallelen hinsichtlich zeitlicher und räumlicher Versinterungsentstehung. Versinterungen traten an den Schlitzöffnungen der Entwässerungsrohre auf. Aufgrund des geringen Versinterungsgrades ist eine rein optische bzw. fotografische Gegenüberstellung der jeweiligen Beobachtungspunkte (mit u. ohne Härtestabilisatoren) nicht aussagekräftig genug. Ratsam wäre eine begleitende Kamerabefahrung bei jeder Inspektion, da so die gesamten Strecken abgelichtet und die Unterschiede genauer abgebildet werden würden. Durch Messungen der Wirkstoffkonzentration des konditionierten Bergwassers beginnend mit dem Einbau der Härtestabilisatoren bis zum Ende des LZV könnte die Wirkungsdauer der Härtestabilisatoren aufgezeigt und so genauere Aussagen aus der Gegenüberstellung der Strecken erlauben. Um die Wirkung der verbauten Härtestabilisatoren auch bei geringem Versinterungspotential aufzuzeigen und die jeweiligen Strecken detaillierter zu beschreiben, könnte ein Flussschema mit Mengenströmen implementiert werden, welches durch umfassende Wasseranalytik und Messungen der Bergwassermengen an Zu- und Ablaufstellen gespeist wird.

## 6 Begriffsbestimmungen

### **Interagierende Wässer**

Alle Wässer, die bei gegenseitiger Mischung ihre chemischen Gleichgewichte derart verändern bzw. stören, dass Versinterungen entstehen können (Gamisch, et al., 2007).

Nachfolgende Begriffsbestimmungen wurden aus der Richtlinie „Tunnelentwässerung“, ÖVBB – Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010 entnommen.

### **Bergwassersammelleitung:**

Geschlossene Ableitung der Bergwässer aus Ulmendrainagen bzw. Sohl-/Tragschichtdrainagen bis zur Vorflut.

### **Flächendrainageelemente:**

Flächige Elemente, die das zusickernde Bergwasser in der Firste, den Kämpfern, den Ulmen und der Sohle fassen und den Drainagen zuführen.

### **Haltung:**

Bereich einer Drainage- oder Sammelleitung zwischen zwei Schächten inklusive dazwischenliegender Anschlüsse und eventueller Kontrollschächte (ÖNORM B 2503).

### **Mehrzweckrohr:**

Rohre, bei denen nur der Rohrscheitelbereich mit Schlitzen mit einem Öffnungswinkel von höchstens 120° und einer Wassereintrittsfläche von mindestens 100 cm<sup>2</sup>/m versehen ist. Der übrige Teil der Wandungen und die Ablaufsohle sind dicht. Beim Mehrzweckrohr ist die Funktion der Ableitung und die des Sickerleitungsrohrs in einem Rohr vereint.

### **primäres Entwässerungssystem:**

Die Systemelemente der nicht zugänglichen Bergwasserfassung, wie z.B. Flächendrainageelemente und Sickerpackungen (Drainagekörper) um das Drainagerohr.

### **Querausleitung:**

Rohrleitung zur Ausleitung der Bergwässer aus den Schächten der Ulmendrainagen in die Schächte der Bergwassersammelleitung (Tunnelhauptentwässerung) bzw. zur Ableitung der Fahrbahn- oder Fahrraumwässer aus Schlitzrinnen bzw. Einlaufschächten in die Schächte der Fahrbahn- oder Fahrraumsammelleitung.

### **sekundäres Entwässerungssystem:**

Die Systemelemente der für die Instandhaltung zugänglichen Rohre und Schächte der Bergwasserableitung.

### **Sohlentwässerung (Sohlmittenentwässerung):**

Drainage- und Sammelleitungen in der Sohle zur Ableitung der Bergwässer aus Firste, Kämpfer, den Ulmen und dem Sohlbereich.

**Sohl-/Tragschichtdrainage:**

Sammelleitung unterhalb der Tragschichten oder unterhalb von Sohlplatten zur Sammlung und Ableitung von Bergwässern.

**Teilsickerrohr:**

Drainagerohr mit Schlitz mit einem Öffnungswinkel von  $220^\circ$  und einer Wassereintrittsfläche von  $200 \text{ cm}^2/\text{m}$  mit geschlossener Sohle.

**Ulmendrainage:**

Drainage- und Sammelleitungen entlang der Ulmenfüße zur Ableitung der Bergwässer aus Firste, Kämpfer und Ulmen.

**Wartung:**

Maßnahmen zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes (Sollzustand), die keine Instandsetzungsmaßnahmen sind.

Nachfolgende Begriffsbestimmungen wurden der ÖNORM EN 13306:2018 entnommen.

**Instandhaltung:**

Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objektes, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung seines funktionsfähigen Zustands dient, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann.

**Instandsetzung:**

Physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion eines fehlerhaften Objekts wiederherzustellen.

### 7 Abkürzungen

ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
BP	Beobachtungspunkt
DN	Nennweite, lt. ÖNORM B5141:2020-04
DN/ID	auf den Innendurchmesser bezogene Nennweite, lt. ÖNORM B5141:2020-04
DN/OD	auf den Außendurchmesser bezogene Nennweite, lt. ÖNORM B5141:2020-04
EBT	Eisenbahntunnel
EWS	Entwässerungssystem
GSA	Gewässerschutzanlage
KKG	Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht
LP	Teilsickerrohr, lt. ÖNORM B5141:2020-04
LZV	Langzeitversuch
MP	Mehrzweckrohr, lt. ÖNORM B5141:2020-04
MP	Messpunkt
ÖGG	Österreichische Gesellschaft für Geomechanik
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PS	Putzschant
PVC	Polyvinylchlorid
RL	Richtlinie
RN	Revisionsnischen
RQ	Regelquerschnitt
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SN	Nenn-Ringsteifigkeitsklasse, lt. ÖNORM B5141:2020-04
SP	Rohre mit Sonderperforation, lt. ÖNORM B5141:2020-04

## Abkürzungen

---

ST	Straßentunnel
TM	Tunnelmeter
TP	Vollsickerrohr, lt. ÖNORM B5141:2020-04
UP	unperforiertes Rohr, ÖNORM B5141:2020-04
UT	Umfahrungstunnel
VT	Anwendungsgebiet für Verkehrswege- und Tiefbau (ausgenommen Tunnel- und Deponiebau)
VTH	Anwendungsgebiet mit höheren Anforderungen (z.B. Tunnelbau, Bahnanlagenbau), lt. ÖNORM B5141:2020-04
WDI	Wasserundurchlässige Innenschale
ZaB	Zentrum am Berg

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Die verschiedenen Stufen der Kalkauflösung; Quelle: Wegmüller, 2001 .....	14
Abbildung 2. Perforationsarten (Wassereintrittsöffnungen); Quelle: ÖNORM B 5141:2020 ..	24
Abbildung 3. Ausführung einer Überlaufschwelle; Quelle: Gamisch, et al., (2007) .....	26
Abbildung 4. Kontroll- und Reinigungsschacht einer Ulmendrainage in Nische; Quelle: Richtlinie „Tunnelentwässerung“, 2010.....	27
Abbildung 5. Kontroll- und Putzschacht in Nische und Fahrbahn mit Querausleitung, Quelle: Richtlinie „Tunnelentwässerung“, 2010 .....	27
Abbildung 6. Kontroll- und Reinigungsschachtsohle einer Sammelleitung in Fahrbahn; Quelle: Richtlinie „Tunnelentwässerung“, 2010 .....	28
Abbildung 7. Nachgerüstete Schachtabdeckung in nicht rostender Ausführung; .....	29
Abbildung 8. HD-Reinigungsspülköpfe und Zubehör; Quelle: <a href="http://www.ehele-hd.com/produkt-kategorie/hochdruck-rohrreinigung">www.ehele-hd.com/produkt-kategorie/hochdruck-rohrreinigung</a> .....	31
Abbildung 9. Mechanische Reinigungswerkzeuge; Quelle: <a href="http://www.enz.com/de/unsere-produkte/kanalreinigung">www.enz.com/de/unsere-produkte/kanalreinigung</a> .....	32
Abbildung 10. Jährlicher Verbrauch an Polysuccinimid-Depotsteinen in einem Fließgerinne in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Drainagewassermenge und dem pH-Wert des Drainagewassers; Quelle: Gamisch, et al., 2007 .....	36
Abbildung 11. Übersicht der evaluierten Tunnelbauwerke und deren geografische Lage.....	38
Abbildung 12. Topografische und geologische Besonderheiten; UT Hausmannstätten .....	39
Abbildung 13. Ausführung der Ulmendrainage in offener Bauweise; UT Hausmannstätten; Quelle: Straßenmeisterei Graz-Süd.....	41
Abbildung 14. Ausführung der Ulmendrainage in bergmännischer Bauweise; UT Hausmannstätten; Quelle: Straßenmeisterei Graz-Süd .....	41
Abbildung 15. Bild 1: Entwässerungsrinne vor dem Entlüftungsschacht; Bild 2: Querausleitung der Entwässerungsrinne in die Ulmendrainage des Querschlag; UT Hausmannstätten .....	42
Abbildung 16. Putznische mit abgedecktem Fertigteilschacht; UT Hausmannstätten .....	42
Abbildung 17. Spülfahrzeug und Wartungspersonal der Straßenmeisterei Graz-SÜD; UT Hausmannstätten .....	43
Abbildung 18. Entfernung der abgebauten Härtestabilisatoren; UT Hausmannstätten.....	44

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 19. Bombendüse vor dem Einfahren in die Drainageleitung; UT Hausmannstätten .....	44
Abbildung 20. Gereinigte Haltung des Drainagesystems; UT Hausmannstätten .....	45
Abbildung 21. Zusammenführung der Ulmendrainagen in einen Sammelschacht; UT Hausmannstätten .....	45
Abbildung 22. Absaugung der Verunreinigungen aus dem Schlammfang; UT Hausmannstätten .....	46
Abbildung 23. Abgelöste Versinterungsprobe aus der südlichen Ulmendrainage auf einem 1x1cm Raster; UT Hausmannstätten .....	47
Abbildung 24. Gegenüberstellung von Spülgeschwindigkeiten, sek. EWS, Bautechnik sowie geol. u. hydrogeol. Gegebenheiten; UT Hausmannstätten .....	48
Abbildung 25. Topografische und geologische Besonderheiten; UT Grünburg .....	49
Abbildung 26. Regelquerschnitt mit Blickrichtung von Nord nach Süd; UT Grünburg; Quelle: Tunnelbetriebsleitung Gmunden.....	50
Abbildung 27. Querausleitung der Fahrbahntwässerung; UT Grünburg; Quelle: Tunnelbetriebsleitung Gmunden.....	52
Abbildung 28. Standbild aus einer Kamerabefahrung der gereinigten Ulmendrainage; UT Grünburg; Quelle: Tunnelbetriebsleitung Gmunden.....	53
Abbildung 29. Ausführung der Fertigteilschächte der Bergwasserentwässerung; UT Grünburg .....	53
Abbildung 30. Lage der Entwässerungsrinnen im Schachtbauwerk 1 und 2; UT Grünburg .	54
Abbildung 31. Düsenkopf am Wasserschlauch und Absaugschlauch im Schacht der Ulmendrainage; UT Grünburg .....	55
Abbildung 32. Verwendete Düsenköpfe während den Wartungsarbeiten; UT Grünburg .....	56
Abbildung 33. Reinigung der Ulmendrainage und der erzielte Spülerfolg; UT Grünburg .....	56
Abbildung 34. Kontrolle des Spülerfolges mittels einer Kamerabefahrung; UT Grünburg.....	57
Abbildung 35. Abgelöste Versinterungsprobe aus Ulmendrainage auf einem 1x1cm Raster; UT Grünburg.....	57
Abbildung 36. Gegenüberstellung von Spülgeschwindigkeiten, sek. EWS, Bautechnik sowie geol. u. hydrogeol. Gegebenheiten; UT Grünburg .....	59
Abbildung 37. Topografische und geologische Besonderheiten; Tunnel Reinertshof .....	60

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 38. Regelquerschnitt des Tunnels Reinertshof bei Füssen, Deutschland; Quelle: Betriebsgebäude Tunnel Reinertshof.....	61
Abbildung 39. Südportal mit anschließendem Betriebsgebäude; Tunnel Reinertshof .....	61
Abbildung 40. Bild 1: Brunnenschacht mit Überlaufbrunnen, Transportleitung und Tragschichtdrainage; Bild 2: oberhalb - Tragschichtdrainage DN 150, unterhalb - Transportleitung DN 300; Tunnel Reinertshof.....	62
Abbildung 41. Bild 1: Spülung der Tragschichtdrainageleitung; Bild 2: Spülung der Transportleitung; Tunnel Reinertshof .....	64
Abbildung 42. Verwendete Spülkopfwerkzeuge; Bild 1: Bombengranatdüse, Seitenansicht; Bild 2: Düsenanordnung der Bombengranatdüse; Bild 3: Vibrationsrotierdüse; Tunnel Reinertshof.....	65
Abbildung 43. Bild 1: vorbereitete feste Härtestabilisatoren zur Bestückung von Überlaufbrunnen und Transportleitungen; Bild 2 & 3: eingebrachte Härtestabilisatoren in Netzen zu je 500 g; Bild 3: eingehängte Härtestabilisatoren in einem Überlaufbrunnen; Tunnel Reinertshof.....	66
Abbildung 44. Bild 1-4: Abgelöste feste Versinterungen aus der Transportleitung; Tunnel Reinertshof .....	67
Abbildung 45. Gegenüberstellung von Spülgeschwindigkeiten, sek. EWS; Tunnel Reinertshof .....	68
Abbildung 46. Standort der Forschungseinrichtung "Zentrum am Berg" .....	69
Abbildung 47. Lageplan ZaB und Bereich des Langzeitversuchs – überarbeitet auf Grundlage Übersichtslegeplan Plannummer LP-100_FC; Quelle: Forschungseinrichtung „Zentrum am Berg“ .....	70
Abbildung 48. Lageplan des Langzeitversuchs; Forschungseinrichtung "Zentrum am Berg"71	
Abbildung 49. Ausführung des primären Entwässerungssystems im Bereich von Bergwasserzutritten - Planausschnitt, Plannr.: DE-067_F0; Quelle: Forschungseinrichtung "Zentrum am Berg".....	74
Abbildung 50. Anordnung und Ausführung der Bergwassersammelleitung - RQ EBT West – Planausschnitt, Plannr.: RQ-005_FC; Quelle Forschungseinrichtung "Zentrum am Berg" .....	75
Abbildung 51. Ausgebrachte Härtestabilisatoren Baypure® DSP Tabs 200 – Polysuccinimid-Depotsteine, Bild 1: 50-cm-lange Schlauchnetze á 294 g, Bild 2: lose ausgestreute Deposteine – 2 x 500 g pro Laufmeter; Forschungseinrichtung "Zentrum am Berg" .....	76
Abbildung 52. Mess- und Beobachtungsschema des Langzeitversuchs .....	77

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 53. Verwendete Messgeräte - Bild 1: Leitfähigkeits-Messgerät Cond 3110 (WTW); Bild 2: Taschen-pH-Meter pH 3110 (WTW).....	77
Abbildung 54. Bild 1: Ablagerung bzw. Versinterung am BP 11 (PS 07) - 28. Mai 2019; Bild 2 u. 3: Versinterungsprobe vom BP 11 - nass bzw. getrocknet.....	78
Abbildung 55. Ergebnisse der Wasseranalytik; Langzeitversuch "Zentrum am Berg" .....	82

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Evaluierte Tunnelbauwerke.....	7
Tabelle 2. Wichtigste mineralische Ablagerungen in wasserführenden Systemen und deren Entstehungsursachen in Anlehnung an Gamisch, et al., 2007 .....	13
Tabelle 3. Löslichkeit von CO <sub>2</sub> in Wasser (p = 1,013 bar) in Anlehnung an Benedix, 2008.....	14
Tabelle 4. CO <sub>2</sub> -Messungen in Tunnelbauwerken in Anlehnung an Wegmüller, 2022.....	18
Tabelle 5. Zusammenhang zwischen CO <sub>2</sub> -Gehalt der Luft und der zu erwartenden Versinterung nach Wegmüller, 2022 .....	18
Tabelle 6. Wichtigste Gestaltungsanforderungen an ein versinterungsarmes EWS sowie deren Leistungs-fähigkeit hinsichtlich der wichtigsten Versinterungsursachen in Anlehnung an Gamisch, et al., 2007.....	21
Tabelle 7. Geeignete Rohrmaterialien lt. Richtlinie Tunnelentwässerung, 2010.....	22
Tabelle 8. Perforationsweiten in Anlehnung an ÖNORM B5141:2020 .....	25
Tabelle 9. Wassereintrittsflächen in Anlehnung an ÖNORM B5141:2020-04 .....	25
Tabelle 10. Mindestdurchmesser für Rohre des sekundären Entwässerungssystems in Straßentunnel lt. Richtlinie Tunnelentwässerung, 2010 .....	26
Tabelle 11. Regelabmessungen von Kontroll- und Reinigungsschächten in Straßentunnel lt. Richtlinie „Tunnelentwässerung“, 2010.....	28
Tabelle 12. Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der Fest- und Flüssigkonditionierung in Anlehnung an Richtlinie „Tunnelentwässerung“, 2010.....	37
Tabelle 13. Messwerte der Wasserproben.....	71
Tabelle 14. Test- und Vergleichstrecken des Langzeitversuchs.....	76
Tabelle 15. Detailierungsgrad erhobener Daten von evaluierten Tunnelbauwerken .....	83

## 10 Literaturverzeichnis

**Amt d. o.ö. Landesregierung, Abteilung Brücken- und Tunnelbau. 2008.** Tunnel Grünburg - Bestandsplanung 2008. *Übersicht bauliche Anlagen, Entwässerung, Löschwasserversorgung.* 2008.

**Amt d. stmk. Landesregierung, FA 18A - Gesamtverkehr und Projektierung. 2007.** Geologisch-geotechnischer Längenschnitt. *OUF Hausmannstätten.* Plannr.: P-100-204, 2007.

—. 2007. Landesstraße B 73 Kirchbacher Straße, Abschnitt „OUF Hausmannstätten“. Umweltverträglichkeitsprüfung - Bescheid. [Online] 08. Mai 2007. [Zitat vom: 22. Januar 2022.] <http://www.umwelt.steiermark/cms/beitrag/11530250/9176022>.

**Amt d. stmk. Landesregierung, FA 18B - Straßeninfrastruktur Bau.** Bautechnischer Längenschnitt. *OUF Hausmannstätten - Bestandsplanung.* Plannr.: 42\_1\_4\_2\_BP0302\_0.

—. Entwässerungsschema. *OUF Hausmannstätten - Bestandsplanung.* Plannr.: 42\_1\_4\_2\_BP0305\_0.

**Arbeiter, Florian, et al. 2021.** Maßgeschneiderte Sanierungsverfahren für die Tunnelentwässerung - DrainRepair. *BHM - Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Band 166, Heft 12.* 2021, S. 583-588.

**Autobahndirektion Südbayern. 2011.** [www.docplayer.org](http://www.docplayer.org). [Online] Februar 2011. [Zitat vom: 17. November 2020.] <https://docplayer.org/109729522-Informationen-zu-kuerzlich-fertiggestellten-massnahmen.html>.

**Autobahndirektion Südbayern, Dienststelle Kempten. 2010.** Neubau im Abschnitt Nesselwang - Füssen, Tunnel Reinertshof. *Bestandsplanung.* 2010.

**Benedix, Roland. 2008.** *Bauchemie - Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten, 4. Auflage.* Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008.

**Bölke, Klaus-Peter. 2013.** *Kanalinspektion - Zustände erkennen und dokumentieren (4. Aufl.).* Heidelberg : Springer Vieweg, 2013.

**Bundesanstalt für Straßenwesen. 2007.** *RI-BWD-TU - Richtlinie für Bergwasserdrainagesysteme für Straßentunnel.* Deutschland : Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007.

**Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie - BMVIT. 2014.** *Leitlinie UVP-Verfahren und Wasserrecht für Straßenbauverfahren.* Wien : Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie - BMVIT, 2014.

**Chabot, Jan Dirk und Rehbock-Sander, Michael. 2000.** Entwässerung bergmännischer Tunnel - neue Tendenzen. *Schweizer Ingenieur und Architekt, Band 118, Heft 12.* 2000, S. 244-249.

**Das Land Steiermark. 2012.** [www.verkehr.steiermark.at](http://www.verkehr.steiermark.at). [Online] 3. Juli 2012. [Zitat vom: 20. 09 2022.] <https://www.verkehr.steiermark.at/cms/beitrag/11678468/11163634/>.

**Dietzel, M, et al. 2008.** Ursachen und Mechanismen der Versinterung von Tunnel drainagen. *BHM - Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Band 153, Heft 10.* 2008, S. 369-372.

**Domberger, Gunnar und Reichl, Peter. 2008.** Hydrologische Nutzungsmöglichkeiten und wasserwirtschaftliche Bedeutung von Tunnelwasser. *BHM - Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Band 153, Heft 10.* 2008, S. 373-379.

**Forstinger, Gerhard. 2008.** *Tunnel Grünburg - Hydrogeologische Beweissicherung - Schlussbericht.* Anif: Forstinger + Stadlmann ZT-OEG - Ingenieurkonsulenten für Erdwissenschaften (Geologie), 2008.

**Galli, Marco. 2000.** Härtestabilisierung in kalkführenden Entwässerungen: Verhinderung von Kalkablagerungen. *Schweizer Ingenieur und Architekt, Band 118, Heft 12.* 2000, S. 249-253.

**Gamisch, Tobias und Girmscheid, Gerhard. 2007.** *Versinterungsprobleme in Bauwerksentwässerungen.* Berlin: Bauwerk, 2007.

**Girmscheid, Gerhard und Gamisch, Tobias. 2005.** Bauwerksentwässerung vor dem Hintergrund der Versinterung. *Baublatt, Band 116, Heft 15.* 2005, S. 22-24.

**Kendlbacher, Daniel und Stadlmann, Thomas. 2019.** *Zentrum am Berg - Geologische Dokumentation - Schlussbericht.* Anif: Forstinger + Stadlmann ZT-OEG - Ingenieurkonsulenten für Erdwissenschaften (Geologie), 2019.

**ÖVBB - Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik. 2012.** *Richtlinie Tunnelabdichtung.* Wien: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2012.

—. **2010.** *Richtlinie Tunnelentwässerung.* Wien: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010.

**PIARC - World Road Association. 1999.** *Reduction of Operational Cost of Road Tunnels - Report and Recommendation.* La Défense cedex (FRA): World Road Association, 1999.

**Reichard, Norbert, Voring, Jürgen und Rappold, Michael. 2011.** Ortsumfahrung Hausmannstätten Tunnel Himmelreich - Vom Erkundungsstollen zum Vollausbau. *Geomechanics and Tunneling 4, No. 5.* 2011.

**Reichl, Peter und Domberger, Gunnar. 2008.** Hydrogeologische Untersuchungen und Prognoseerstellung beim Projekt S6-Semmering-Schnellstraße Tunnel Semmering, Tunnel Steinhaus und Tunnel Spital. *BHM - Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Band 153, Heft 10.* 2008, S. 386-390.

**Schweizerische Bundesbahnen - SBB. 2010.** Ausführungs- und Qualitätsvorschriften für die Tunnelentwässerung. Bern : Schweizerische Bundesbahnen - SBB, 2010.

**Stadlmann, Thomas. 2007.** *Tunnel Grünburg - Baugeologische Dokumentation - Schlussbericht.* Anif : Forstinger + Stadlmann ZT-OEG - Ingenieurkonsulenten für Erdwissenschaften (Geologie), 2007.

**Wegmüller, Marcel Christian. 2022.** Die Hauptursache von Versinterungen. *Tunnel, Heft 1.* 2022, S. 14-27.

— . 2001. *Einflüsse des Bergwassers auf Tiefbau/Tunnelbau.* Zürich : Stäubli, 2001.





Anhang C: Ergebnisse der Wasseranalytik

Messung	Datum	Wasseranalytik	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	MP 06	MP 07	MP 08	MP 09	MP 10	MP 11
			PS 02	PS 04	PS 05	PS 14	PS 15	PS 07	PS 07	PS 07	PS 07	PS 16	PS 08
1	17.07.2019	pH-Wert [-]	8,75	12,60	12,79	8,15	8,19	8,33	8,06	8,74	8,51	8,13	8,70
		elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	642	4280	5560	706	696	693	841	465	730	475	434
		Temperatur [°C]	8,4	8,0	7,4	8,9	8,6	8,1	7,8	6,2	6,7	6,4	5,7
2	14.08.2019	pH-Wert [-]	8,75	12,44	12,78	8,29	8,21	8,43	8,07	8,27	8,19	8,27	8,22
		elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	553	1760	4110	633	475	489	691	635	488	483	448
		Temperatur [°C]	9,0	8,0	8,2	9,8	7,9	7,0	7,4	7,3	7,3	6,7	6,4
3	11.09.2019	pH-Wert [-]	9,00	11,97	12,65	8,80	8,20	8,20	8,00	8,50	8,30	8,40	8,37
		elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	592	817	3620	608	489	510	605	490	590	481	459
		Temperatur [°C]	9,0	7,9	8,3	10,0	7,0	9,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
4	14.11.2019	pH-Wert [-]	9,31	10,60	12,21	8,40	8,08	8,10	7,81	7,52	7,55	7,45	7,79
		elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	538	417	3140	635	508	486	716	391	460	390	439
		Temperatur [°C]	7,4	6,3	6,7	7,5	5,8	5,9	6,2	5,2	5,3	5,0	5,1
5	13.12.2019	pH-Wert [-]	9,14	11,73	12,29	8,24	7,78	7,75	7,87	7,87	7,65	7,60	7,80
		elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	605	719	2710	670	443	441	728	407	465	403	431
		Temperatur [°C]	4,4	5,3	5,8	5,9	4,3	4,2	4,8	4,0	4,3	4,9	4,4
6	28.01.2019	pH-Wert [-]	8,40	9,22	12,37	8,18	7,87	8,34	7,64	8,51	8,35	8,75	7,96
		elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	717	403	2830	754	616	544	899	507	557	479	523
		Temperatur [°C]	5,9	5,3	6,0	5,7	5,0	5,1	5,1	5,1	5,1	4,9	4,4
7	27.09.2022	pH-Wert [-]	-	7,43	7,85	-	-	7,87	7,32	7,81	7,62	-	-
		elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	-	494	869	-	-	509	740	515	685	-	-
		Temperatur [°C]	-	7,0	6,2	-	-	5,8	6,0	6,0	6,0	-	-

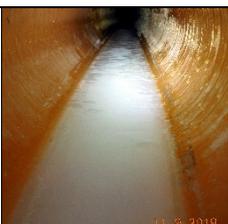


Vergleichsstrecke

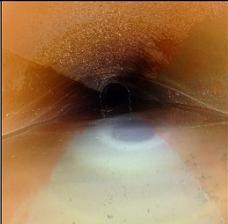
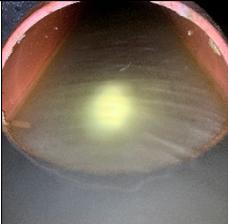
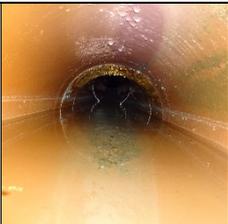
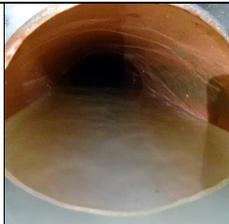
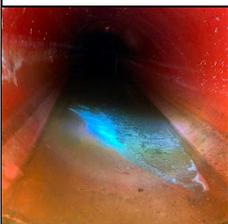


Teststrecke

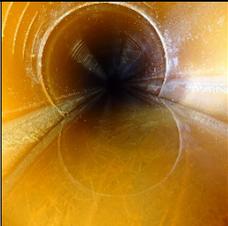
Anhang D: Bilddokumentation der Beobachtungspunkte

BP 01		keine Bilddaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 02					
	Dez. 2019	Jan. 2020			
BP 02		keine Bilddaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 04					
	Dez. 2019	Jan. 2020	Sept. 2022		
BP 03		keine Bilddaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 04					
	Dez. 2019	Jan. 2020	Sept. 2022		

BP 04		keine Bildaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 04					
	Dez. 2019	Jan. 2020	Sept. 2022		
BP 05		keine Bildaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 05					
	Dez. 2019	Jan. 2020	Sept. 2022		
BP 06		keine Bildaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 14					
	Dez. 2019	Jan. 2020			

BP 07		keine Bildaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 15					
	Dez. 2019	Jan. 2020			
BP 08		keine Bildaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 15					
	Dez. 2019	Jan. 2020			
BP 09		keine Bildaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 07					
	Dez. 2019	Jan. 2020	Sept. 2022		

BP 10				keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019		Okt. 2019
PS 07					
	Dez. 2019	Jan. 2020	Sept. 2022		
BP 11				keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019		Okt. 2019
PS 07					
	Dez. 2019	Jan. 2020	Sept. 2022		
BP 12				keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019		Okt. 2019
PS 07					
	Dez. 2019	Jan. 2020	Sept. 2022		

BP 13		keine Bildaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 16					
	Dez. 2019	Jan. 2020			
BP 14		keine Bildaufnahme		keine Inspektion	
	Jul. 2019	Aug. 2019	Sept. 2019	Okt. 2019	Nov. 2019
PS 08					
	Dez. 2019	Jan. 2020			