

2

Koralmtunnel: Entwässerungssystem für 150 Jahre - Optimierung Bauwerk, Versinterungsentstehung und bedarfsorientiertes Spülen

DI Hanns Wagner & PD Dr. Ronny Boch (Österreich)

2.1 Der Koralmtunnel

2.1.1 Einleitung

Das zweiröhrige jeweils eingleisige Tunnelsystem des Koralmtunnels (KAT) mit 33 km Länge wurde als druckwasserentlastetes Bauwerk ausgeführt. Der Hochpunkt des Tunnels liegt dabei ca. im Bereich der Landesgrenze Steiermark / Kärnten und bedingt, dass die Bergwässer in die jeweilige Vorflut (die Lassnitz in der Steiermark, die Lavant in Kärnten) abgeleitet werden.

Die kontinuierliche Entwässerung über die Nutzungsdauer des Tunnelbauwerks von 150 Jahren stellt ein zentrales Element bei der Planung, bei der Bauausführung und in der Betriebsphase dar. Beim KAT wurde in der Einreichphase entschieden, auf herkömmliche Ulmendrainagen in Form von Teilsickerrohren zu verzichten. Stattdessen wird über ein System von Noppenfolien (siehe Abbildung 1) das zutretende Bergwasser der Sohldrainage zugeführt, welche abgestuft einen Durchmesser von 300 bis 500 mm aufweist. Die Länge der zu spülenden Drainagerohre wird somit von ~200 km auf 66 km (um 2/3!) reduziert.

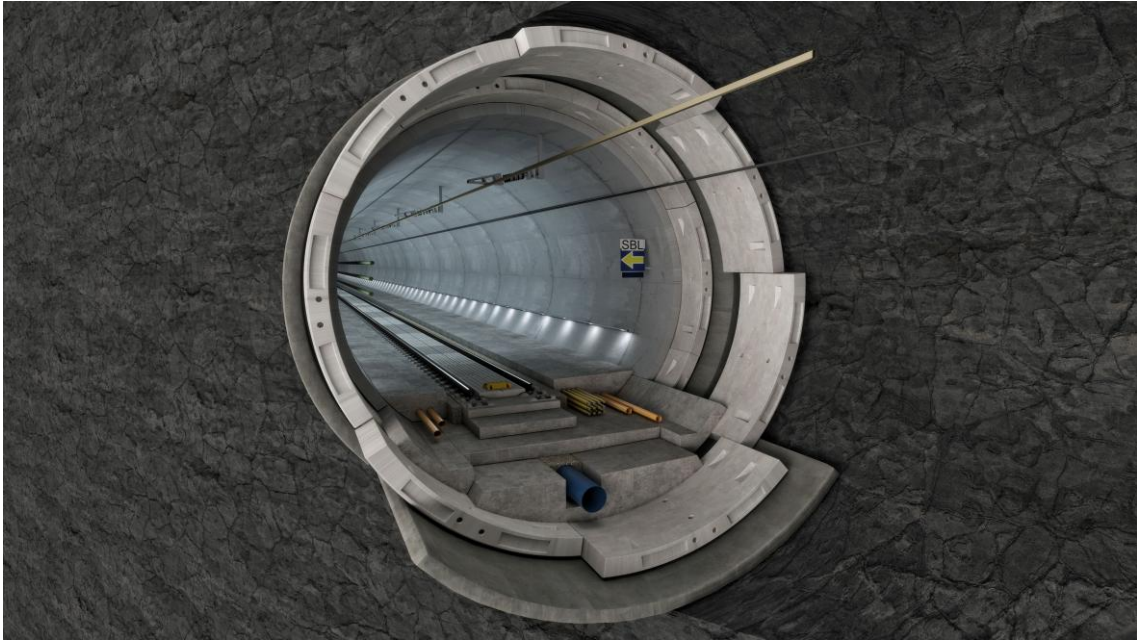


Abbildung 1 Regelquerschnitt KAT für den kontinuierlichen Vortrieb mit Tübbing und Sohl drainage.



Abbildung 2 Längslaufende Noppenfolie als Alternative zu konventionellen Ulmendrainagen, Bauphase zyklischer Vortrieb Gleis 1, Baulos KAT3.

Das Entwässerungssystem des KAT mit seiner Kombination aus Noppenfolien (siehe Abbildung 2) und Sohl drainagen ist ein Prototyp. Mit der Entscheidung zum Einbau von Noppenfolien entfällt aber die bei konventionellen Drainagerohren gegebene Zugänglichkeit mittels z.B. Kamerabefahrungen und Drainagespülungen [1].

2.1.2 Tunnelentwässerung

Die Großteils beträchtliche Überlagerung der beiden Tunnelröhren mit Locker- bzw. Festgestein (>50 m bis 1200 m) und somit auch die Lage und hydrostatische Auflast des natürlichen Bergwasserspiegels, erfordern eine druckentlastete Bauweise der Tunnelschale, also eine kontinuierliche Ableitung des Grundwassers über ein Entwässerungssystem in den Tunnelröhren. Diesbezüglich sind die lokal zutretenden Wassermengen im KAT räumlich stark differenziert, d.h. von weiten Tunnelabschnitten mit trockenen bis bergfeuchten Verhältnissen bis zu örtlichen Wasserzutritten von mehreren Sekundenlitern. Letztere sind insbesondere an verkarstungsfähige Marmorbänder des Koralmkristallins, tektonische Strukturen der Lavanttaler Störungszone und an poröse kiesig-sandige Lockersedimente des Tertiärs gebunden. Der Tunnelhohlraum als künstlicher Aufschluss stellt nicht nur mit Blick auf die hydraulischen Verhältnisse des Untergrunds eine Adaption der Umgebungsbedingungen dar, vielmehr werden verschiedene physikochemische Gleichgewichte und Gradienten beeinflusst und neu ausgerichtet. Beispielsweise werden durch Druckentlastung (z.B. CO₂-Partialdruck), Belüftung (Sauerstoffzutritt) oder Baustoffkontakt (Beton, Mörtel) der Berg-/Drainagewässer die Sättigungszustände verschiedener Gas- und Mineralphasen verändert, was zu erhöhten Versinterungs-, Korrosions- oder (mikro)biologischen Potenzialen führen kann [2]. An der Tunnelschale oder im Drainagesystem können daraus unerwünschte mineralische (Kalksinter, Eisenocker) oder biologische (bakterielle Biomasse) Ablagerungen und/oder Materialalteration (Betonangriff, Stahlkorrosion, Kunststoffversprödung) resultieren [3-4]. Auch mit spezifischem Blick auf die häufigen Probleme mit Kalkversinterung kommen grundsätzlich vier verschiedene Versinterungsmechanismen in Frage (CO₂ ausgasend, Baustoff induziert, inkompatible Mischwässer, biologisch induziert), welche in Tunnelbauwerken einzeln oder kombiniert auftreten können und denen tunnel-spezifisch und mitunter abschnittsweise begegnet werden muss. Im KAT sind hier beispielsweise die mineral- und CO₂-reichen Tiefenwässer um den Querschlag (QS) 51 zu nennen, welche zur Ausbildung von krustigem Kalksinter, rotbraunen Eisenausfällungen (Ocker) und bakterieller Biomasse (wuchernde Matten) neigen. Das Entwässerungssystem des KAT erfordert folglich mit Blick auf seine langfristige Funktionalität sowie effiziente Instandhaltung (Spülaufwand, Betriebskosten) eine sorgfältige Evaluierung und Optimierung in der Planungs- und Bauphase und weiters auch in der frühen Betriebsphase [1]. Drainagedesign und Härtestabilisierung sind wesentliche Bestandteile eines erfolgreichen Tunnel Drainage Managements.

2.2 Entwässerungssystem und Härtestabilisierung

2.2.1 Aspekte zum Drainagedesign

Zwecks Vermeidung und nachhaltiger Nutzung eines kontinuierlich wasserableitenden Entwässerungssystems hinsichtlich unerwünschter Ablagerungen (mineralisch, biologisch) stellt eine Optimierung des Drainagedesigns in der Planungs- und Bauphase eine essentielle Verbesserungsmöglichkeit dar. Diesbezüglich ist eine bestmögliche Fassung und Ableitung relevanter Wasserzutritte aus dem Berg ins primäre und sodann sekundäre Drainagesystem wesentlich. Konkret sind die Fließwege und das Fließverhalten der mitunter mineral- und gasreichen Grundwässer zu bedenken, etwa hinsichtlich geometrischer Aspekte (einfache, stufenlose, kurze Strecken) und hydraulisch-hydrochemischer Wechselwirkungen (wenig Turbulenz, hoher Füllstand). Letztere betreffen etwa den häufig wichtigen Gas- bzw. Luftaustausch und hier insbesondere Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Sauerstoff (O_2) zwischen den Grundwässern (im Berg), Drainagewässern und Drainageluft (Entwässerungssystem) und der dynamischen Tunnelatmosphäre (Fahrraum). Mit einer häufig schrittweisen Veränderung der Wasser- und Luftchemie verändern sich auch die Mengen und Konsistenzen der unerwünschten Ablagerungen [3], [5]. Neben dem plötzlichen oder sukzessiven Luftkontakt/-austausch im Zuge der Entwässerung spielt auch der lokale Baustoffkontakt häufig eine entscheidende Rolle, insbesondere bei Veränderung des ursprünglichen Bergwasserchemismus durch (Spritz)Beton, Ankermörtel oder Injektionsmaterial im Verlauf des Fließweges (Durchsickern). Konkret werden dadurch meist der Kalziumgehalt (z.B. aus Portlandit – $\text{Ca}(\text{OH})_2$) und der pH-Wert deutlich erhöht, was die Absorption von CO_2 aus der Umgebungsluft und die Abscheidung von Kalksinter (CaCO_3) stark begünstigt. Ein optimiertes Drainagedesign sollte auch solche Effekte möglichst reduzieren. In diesem Zusammenhang sind auch die Materialauswahl der Drainageverrohrungen sowie assoziierter Baukomponenten (z.B. Sickerpackungen, Noppenfolien) zu bedenken, also ein unerwünschter Baustoffkontakt und mögliches Leaching zu vermeiden. Auch sollten Substrat-effekte hinsichtlich eines variablen Aufwachsens (Mengen, Konsistenz) von mineralischen Präzipitaten (v.a. verschiedene Kalksinter) nicht unterschätzt werden. Beispielsweise haben Labor- und Felduntersuchungen gezeigt, dass unterschiedliche Kunststoffe (Substrate) sehr verschieden hinsichtlich einsetzender Kalkversinterung reagieren [6-7]. Generell werden die in der Bau- oder Betriebsphase häufig unerwünschten Potenziale (Versinterung, Verockerung, Biofouling, Betonangriff, Korrosion) durch vorhandene oder verstärkte Gradienten im Zuge der sich räumlich-zeitlich entwickelnden Tunnelwässer entscheidend bestimmt – und eben hier muss eine datenbasierte Evaluierung und Optimierung des Drainagedesigns und etwaiger Härtestabilisierungsmaßnahmen ansetzen.

Im KAT hat sich auch der Wert eines „Screenings“ und die Bedeutung von Feldversuchen gezeigt. In beiden Fällen geht es um die systematische Lokalisierung und konstruktive Entschärfung von „Schlüsselstellen“ bei der Ableitung von Tunnelwässern. Hinsichtlich Drainagedesign und meist auch lokal positionierter Härtestabilisierungsmaßnahmen (Zudosierung Wirkstoff/Inhibitor mittels Härtestabilisierungsanlagen) erscheint ein vorausgehendes Screening kritischer Berg-/Drainagewässer sinnvoll, insbesondere da hydraulisch-hydrochemisch relevante Wasserzutritte meist ein lokal eingrenzbares Phänomen sind (Schlüsselstellen) und sich weite Tunnelabschnitte oft als problemlos zeigen. Ein solches Screening umfasst im Wesentlichen eine repräsentative Datenaufnahme in regelmäßigen Abständen (z.B. alle 500 m beim KAT) entlang des zugänglichen (sekundären) Entwässerungssystems, wobei in-situ Messungen (pH, elektrische Leitfähigkeit), Dokumentation und punktuelle Probenahmen (Wasser & Ablagerungen, Laboranalysen, Berechnungen/Quantifizierung) durchgeführt werden. Darauf aufbauend kann eine weitere Eingrenzung erfolgen, um eine ausreichende Datenbasis betreffend, z.B. Positionierung und Dosierung einer Flüssigkonditionierung der Drainagewässer sicherzustellen [8].

Betreffend Feldversuche wurde im KAT das spezifische Verhalten von mineral- und CO₂-reichen Bergwässern in Wechselwirkung mit Kunststoffdrainageverrohrungen, sowie bestimmten Baukomponenten und Materialien untersucht. Während der Bauphase ab 01/2018 war im QS 51 die „Sinterteststrecke“ für eine Dauer von etwa 10 Monaten positioniert (Abbildung 3A). Dieses temporär eingerichtete Untertagelabor bestand im Wesentlichen aus vier separaten Drainageverrohrungen, welche hinsichtlich Durchflussmenge und Fließgeschwindigkeit, Turbulenz, Belüftung und künstlichen Substraten variiert werden konnten und an mehreren Stellen mit kontinuierlich datenaufzeichnenden Sensoren und Kameras bestückt waren [7]. Die vier Teststrecken wurden aus einem gemeinsamen Wasservorratstank gespeist, welcher besonders kritisches Bergwasser (Kalksinter, Eisenocker, bakterielle Biomasse, Korrosion) aus einem starken Wasserzutritt (Bohrung, ~5 L/s) eines nahegelegenen Marmorbandes zuführte. Die in-situ Beobachtungen zeigten einen reproduzierbaren Ablauf aus fünf Phasen, während dem sich sukzessive Biomasse, Eisenocker und Kalksinter als Ablagerungen bildeten und sich die maßgeblichen Parameter und Kontrollfaktoren hinsichtlich Wasser- und Feststoffmengen, wie auch die resultierenden Materialkonsistenzen der Sinter systematisch und datenbasiert eingrenzen ließen. Zu einem bautechnisch noch spezifischeren Prozessverständnis trugen weiters auch drei „Testfelder Querausleitungen“ im Nahbereich des QS 51 bei, welche dort ab 11/2020 für eine Dauer von sechs Monaten installiert waren (Abbildung 3B & 3C). In diese drei Testfelder wurden hydrochemisch differenzierte aber durchwegs kritische Berg-/Drainagewässer kontinuierlich eingeleitet und das Verhalten unterschiedlicher Bauvarianten und -komponenten, Materialien und Fließwege (z.B. Sickerpackung, Noppenfolie, Siphon, Abschlachtung, Abdeckung) wurde hinsichtlich unerwünschter Präzipitate (Kalk, Ocker), bakterieller Biomasse

und Luftaustausch untersucht [9]. Entlang der einzelnen Testfelder waren kontinuierlich aufzeichnende Sensoren installiert (Wasser- und Luftparameter) und es konnten entlang des Fließwegs punktuell Proben entnommen werden (verschiebbare Ableitungen). Ganz wesentlich für diesen Feldversuch war auch eine zweimalige Destruktion („forensische Begutachtung“) der Testfelder (ca. zur Hälfte und am Ende des Feldversuchs), wobei insbesondere die vorhandenen Ablagerungen und die Beeinträchtigung bestimmter Baukomponenten evaluiert wurden [9]. Basierend auf diesen Testfeldern zur Querausleitung (von Wässern und Begleitgasen) konnten der optionale Einbau von Sickerpackungen und Siphons verworfen (rasche Zusetzung) und die maßgeblichen Prozesse und möglichen Gegenmaßnahmen hinsichtlich Wasserableitung mit langfristiger Funktionalität weiter eingegrenzt werden.

Bautechnisch konkret wurde hinsichtlich einer optimierten Ableitung sinterkritischer Bergwässer in beiden Tunnelröhren des KAT (Gleise 1 & 2) im Bereich um QS 51 ein „Sonder-spülsystem“ ausgeführt, welches aus insgesamt 148 „direkten Querausleitungen“ in einem etwa 275 m langen Tunnelabschnitt besteht (Abbildung 3D). Das Prinzip dieser Sonderausführung gründet wesentlich auf den Erkenntnissen aus den Monitoringmaßnahmen und Feldversuchen im betreffenden Tunnelabschnitt. Im Konkreten werden die zu mineralischen und biologischen Ablagerungen neigenden Bergwasserzutritte möglichst direkt und ohne Luftaustausch mit der Tunnelatmosphäre gefasst und auf kurzer Fließstrecke mit einfacher Fließgeometrie (ohne Turbulenz) und mit hoher Fließrate in die Sammeldrainage eingeleitet [9]. Außerdem kann jede der direkten Querausleitungen über einen luftdicht verschlossenen Rohrabschluss gereinigt werden. Ein bisher zweimalig durchgeführtes Screening dieses Sonderspülsystems zeigt, dass einige der direkten Querausleitungen stark wasserführend und andere gänzlich trocken sind. Weiters wurden nur geringe Mengen weicher Ablagerungen (v.a. Biomasse mit Eisenocker) festgestellt.

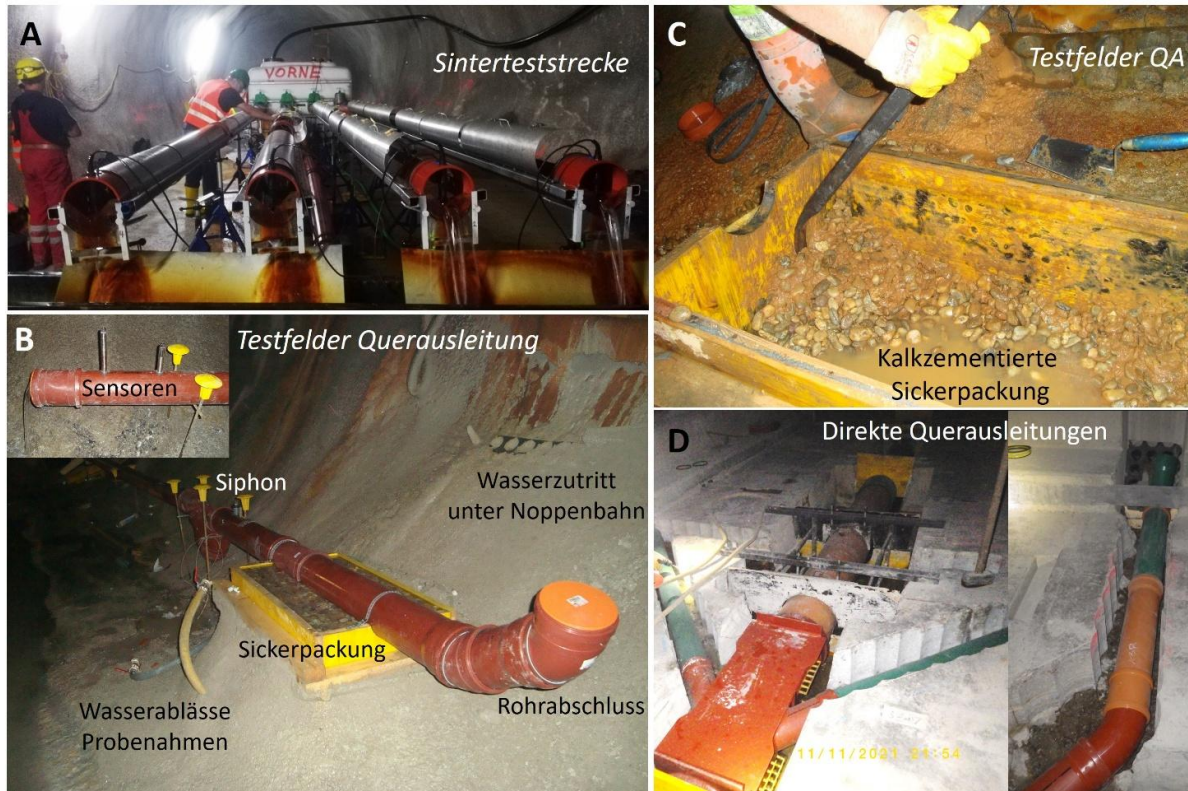


Abbildung 3 Feldversuche im KAT zwecks Optimierung der Ableitung kritischer Bergwässer und konkrete Umsetzung als Sonderspülsystem „Direkte Querausleitungen“ (n=148, GI1 & GI2, ~275 m Tunnelabschnitt um QS 51). A) „Sinterteststrecke“ mit Sensorik im QS 51, B) feldexperimentelle Überprüfung verschiedener Bauvarianten und -komponenten in drei „Testfeldern Querausleitung“, C) rasche Versinterung und Untauglichkeit von Sickerpackungen im Feldversuch, D) Umsetzung der Erkenntnisse aus den Feldversuchen in speziellen Querausleitungen zur Sammeldrainage.

2.2.2 Härtestabilisierungsmaßnahmen

Eine Reduktion von Versinterungserscheinungen, d.h. von mineralischen und biologischen Ablagerungen, kann durch den zielgerichteten Einsatz von Härtestabilisierungsmittel, sogenannten Green Inhibitors, verbessert werden. Es wird dabei die Versinterungsbildung bereits bei sehr geringen Dosierungen wirkungsvoll unterdrückt. Wenn diese Möglichkeiten schon bei der Planung und Errichtung entsprechende Berücksichtigung finden, sind die Einsatzmöglichkeiten vielfältiger und vor allem auch effektiver als beim nachträglichen Einbau bei einem Bestandstunnel mit vorgegebenen Randbedingungen.

Hinsichtlich der Anwendung in Tunneldrainagen und insbesondere für den KAT wurden verschiedene Härtestabilisierungsmaßnahmen und Härtestabilisierungsmittel (HSM, Inhibitoren) evaluiert, wobei „Grüne Inhibitoren“ (ökologisch unbedenklich) im Fokus standen (Projekt „Green KAT“). Eine Anwendung mineralischer Säuren (z.B. Salzsäure) oder auch einfacher organischer Säuren (z.B. Milchsäure) zwecks pH-Reduktion kam aufgrund der großen Wassermengen und weiterer Faktoren (Chlorideintrag in Umwelt, Korrosivität) nicht

in Frage. Im Gegensatz zu einer Flüssigkonditionierung der Drainagewässer mittels Härtestabilisierungsanlagen (HSA) konnte auch eine Depotsteinkonditionierung (feste „Tabs“ mit Wirkstofffreisetzung durch Hydrolyse) aufgrund des vorherrschenden Kalkversinterungsmechanismus (CO_2 ausgasende Wässer), der hohen und konstanten Wassermengen, sowie weiterer Faktoren verworfen werden. Unter Verwendung repräsentativer Bergwässer wurden im Tunnel (bei QS 51) und im Labor (Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Graz) verschiedene Wirkstoffe ($n=15$, v.a. organische Polymere), verschiedene Produkte (z.B. Polyaspartat/PASP von vier internationalen Anbietern), sowie Dosierungen (geringe aber effektive Wirkstoffmenge) getestet. In diesem Zusammenhang ist die Entwicklung eines „Kompakttests“ hervorzuheben, welcher aus einem sensorgestützten Laborversuch (kontinuierliche Datenaufzeichnung der inhibierten Kalkausfällung) in Kombination mit numerischer Modellierung (Quantifizierung) besteht (Abbildung 4A & 4B); [10]). Diese Vorgehensweise brachte einen wertvollen Erkenntnisgewinn und eine solide Grundlage hinsichtlich Auswahl und Grunddosierung des HSM für den KAT.

Während der späteren Bau- bzw. Ausrüstungsphase wurden nahe dem Scheitelpunkt des KAT auf kärntnerischer und steirischer Seite – im Bereich erster relevanter Wasserzutritte und fließender Bedingungen in der Sammeldrainage – temporäre Härtestabilisierungsanlagen zwecks Zudosierung von PASP eingerichtet. Diese temporären HSA zeigten bereits einen deutlichen Effekt hinsichtlich reduzierter Menge und (weicher) Konsistenz der abschnittsweise bedeutsamen (krustigen) Kalkablagerungen, welcher durch die episodisch tätigen Spülfirmen bestätigt wurde. Hinsichtlich einer besseren Mengenbestimmung der abschnittsweise zutretenden und teils sinterkritischen Bergwässer, sowie des Verhaltens des Wirkstoffes PASP im Drainagesystem (z.B. Adsorptionseffekt), wurde in einem Feldversuch ein Doppeltracer appliziert (chemisch konservatives Uranin und aktives Polyaspartat) und in über den ganzen Tunnel (beide Gleise) verteilten Putzschächten mittels zwei Lichtleiterfluorometern (LLF) in-situ gemessen (Abbildung 4C & 4D; [11-12]). Basierend auf den abgeleiteten Drainagewasserdurchflussmengen (Uranin) und den abschnittswisen Konzentrationsverteilungen von PASP konnten die Positionierung der HSA (in ausgesuchten QS) und die Zudosierung des HSM (Zielkonzentrationen) optimiert werden. Außerdem ergab sich daraus eine präzisere Bestimmung des Gesamtabflusses aus den Tunnelröhren. Ein portables LLF kam auch hinsichtlich der Überprüfung und Optimierung der Wirkstoffkonzentration (Inhibitor PASP) im Brauchwasserkreislauf zum Einsatz, wobei in den Lüftergebäuden (Paierdorf, Leibenfeld) ein zentral aufbereitetes Dosiergemisch mit 50 mg/l PASP-Zielkonzentration bereit gestellt werden soll. Hierfür wurde über einige Stunden eine Durchflusszelle als Bypass des Brauchwasserkreislaufsystems installiert, in welche neben dem LLF (Messung PASP-Gehalt) auch pH- und Leitfähigkeitssonden getaucht waren und kontinuierlich Daten aufzeichneten (Abbildung 4E). Die Zielwerte konnten durch die Ein-

stellung und Wechselwirkung diverser Pumpen (Aufbereitung Dosiergemisch aus PASP-Originalprodukt, Durchflussregelung Brauchwasser) reguliert werden. Eine solcher anlagen-spezifischer und datenbasierter Ansatz mittels in-situ Messungen in den Tunnelröhren (Doppeltracer-Versuch) und in den Betriebsgebäuden (z.B. Brauchwasserkreislauf) erlaubt eine gezielte Verbesserung und Qualitätskontrolle der erst in Betrieb genommenen HS-Maßnahmen und der damit verbundenen Herausforderungen eines neuen Entwässerungssystems.

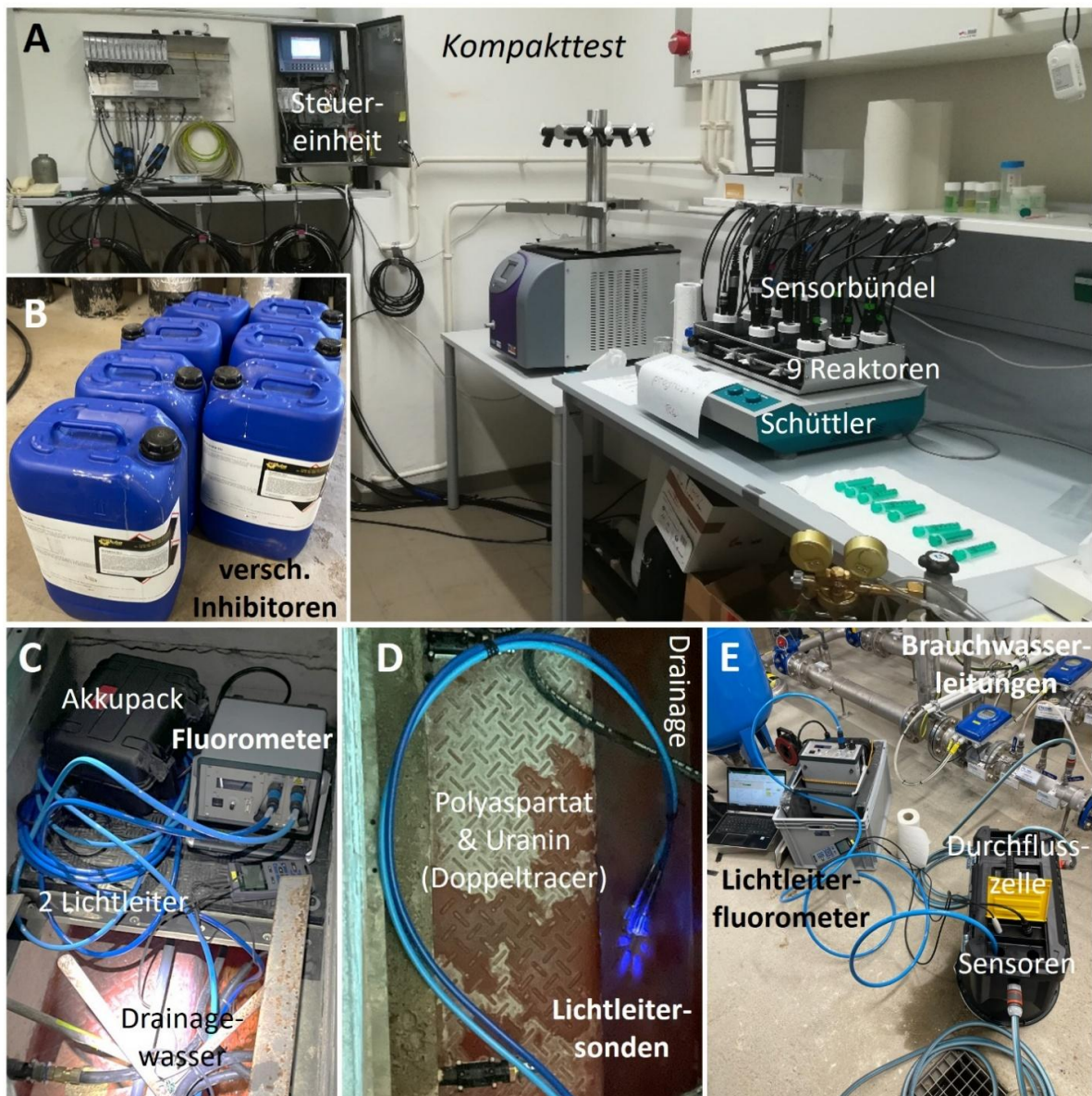


Abbildung 4 Evaluierung und Optimierung von Härtestabilisierungsmaßnahmen in Tunnelndrainagen. A) & B) Entwicklung einer kompakten und quantitativen Testprozedur (Laborversuch) zwecks Überprüfung verschiedener HS-Mittel (Wirkstoffe, Produkte) und Dosierungen. C) & D) Anwendung eines portablen Lichtleiterfluorometers (LLF) zur in-situ Bestimmung der Wirkstoffmenge (Polyaspartat – PASP) im Drainagewasser, E) LLF in Durchflusszelle gekoppelt an Brauchwasserkreislauf zwecks Überprüfung und Einstellung der Inhibitorkonzentration im KAT (zentrale HS-Versorgung).

2.3 Schlussfolgerungen und Ausblick

2.3.1 Bedarfsorientiertes Spülen

Um den Aufwand für das Drainagespülen zu minimieren, ist der Einsatz von gleisgebundenen Spülarbeiten möglichst zu reduzieren. Denn damit einhergehend sind Gleissperren erforderlich, wobei geringe Spüllängen und ein geringer Spülfortschritt zu beträchtlichen Betriebseinschränkungen führen.

Von Seiten der ÖBB wird die Entwicklung moderner Spülsysteme – z.B. „Mobiles Drainagespülsystem Bahn / MDB-Spülsystem“ [13] vorangetrieben. Ein Weitspülsystem mit Spüllängen bis zu 600 m, sehenden wie auch steuerbaren Spüldüsen und Ressourcen schonender Einsatz beim Personal sind Ziele dieser Weiterentwicklung. Im Falle des zweiröhri-gen Tunnelsystems des KAT werden von einer Position direkt vor einem Querschlag aus bis zum nächsten Querschlag die Drainagen in beiden Tunnelröhren über eine Distanz von ~500 m mittels Hochdruckspülen gereinigt. Der Vorteil dabei ist, dass nur eine Tunnelröhre (Gleis 1) für den Betrieb für das Ab- und Aufladen der Spüleinheit gesperrt werden muss. Die vor Ort abgestellte Spüleinheit kann aus der Ferne gesteuert werden und ermöglicht einen uneingeschränkten Bahnbetrieb. Die dafür erforderlichen baulichen Optimierungen, wie z.B. die spezielle Ausbildung der Drainageschächte mit ihren Sohlgerinnen, die Versorgung dieser Standorte mit Strom und Spülwasser, wie auch die Beaufschlagung des Berg-/Drainagewassers mit härtestabilisierenden Mitteln, sind beim KAT schon frühzeitig in der Planung und dann später im Bau durchgehend berücksichtigt worden. Die erfolgreichen Versuche mit der MDB-Spülbox im Granitztaltunnel im Jahr 2025 zeigen die positive Umsetzung dieser Idee. Im KAT wird mit einer geringfügig adaptierten MDB-Spülbox Ende 2026 mit Testläufen und ersten Drainagespülungen begonnen.

Ein weiterer Aspekt bei der Optimierung des Drainagespülens ist die Festlegung von bedarfsorientierten Spülintervallen auf Basis von systematischem Monitoring (insbesondere Schlüsselstellen), Analysen (Wässer, ev. Ablagerungen) und Expertise. Lange Abschnitte des KAT zeigen eine außerordentlich geringe Versinterungsneigung, während andere Bereiche mehr Aufmerksamkeit benötigen. Mit Hilfe des fortlaufend erweiterten Drainageerhaltungsplans (DEP), der für jeden Tunnel spezifisch erstellt wird, und der Abschätzung durch die FachexpertInnen, werden die Abschnitte hinsichtlich ihrer Entwicklung und Versinterungsneigung beurteilt und entsprechend der Notwendigkeit mit einem definierten Spülintervall hinterlegt. Damit können z.B. Abschnitte mit geringer Versinterungsneubildung mit adaptierten, längeren Spülintervallen hinterlegt werden, als die „Hotspots“, die eine intensivere Reinigungsbehandlung erfahren müssen.

2.3.2 Ausblick Tunnelentwässerung

Die Planung und Ausführung eines modernen Entwässerungssystems muss stets orts- und tunnelspezifisch sowie datenbasiert erfolgen. Mit dem Tunnelhohlraum als künstlich geschaffenen Aufschluss des Untergrundes setzt die Entwässerung in Abhängigkeit von geologischen, hydraulischen, hydrogeochemischen und geotechnischen Rahmenbedingungen und sich neu einregelnden Gradienten ein. Bereits in einer frühen Phase (z.B. Pegelbeobachtungen während UVP, Monitoring im Erkundungsstollen) können wichtige Einsichten betreffend Potenziale, Drainagedesign und HS-Maßnahmen gewonnen werden. Für die langfristige Instandhaltung und Funktionalität des Entwässerungssystems ist ein Prozessverständnis hinsichtlich möglicher Ablagerungen (mineralisch, biologisch) und Materialalteration (Betonangriff, Korrosion) wesentlich, dies haben auch die Erfahrungen im KAT eindrücklich gezeigt. Wesentliche Verbesserungen im Umgang mit kritischen Bergwasserzutritten und deren kontinuierlicher Ableitung können mit Blick auf deren Evaluierung (Potentialbewertung), gezielten Anpassungen des Drainagedesigns bzw. von Gradienten (z.B. direkte Querausleitungen im KAT), sowie mittels proaktiver Härtestabilisierungsmaßnahmen (Positionierung HSA, Auswahl und Einstellung HSM) erzielt werden. Insbesondere können die Verteilung und Wirkeffizienz des HSM (z.B. diverse PASP) im Tunnel (in-situ, Drainage) bzw. im Brauchwasserkreislauf quantifiziert und optimiert werden (z.B. portable LLF, spezifische Parameter). Neue Herangehensweisen hinsichtlich Tunnelentwässerung und assoziierter Wechselwirkungen stützen sich neben den sich rasch entwickelnden Mess- und Monitoringtechnologien (Sensorik, künftig auch drohnen- und robotikbasiert) weiters auf die Weiterentwicklung eluatarmer und resistenter Baustoffe (z.B. diverse Geopolymere), sowie die Anpassung bautechnischer Ausführungen und Richtlinien (z.B. druckwasserdichte Tunnelschalen).

2.4 Zusammenfassung

Das Entwässerungssystem des Koralmtunnels ist mit einer Auslegung auf eine Nutzungsdauer für 150 Jahre der wichtigste Baustein im Instandhaltungsprozess in der Betriebsphase. Durch den Entfall der Ulmendrainagen durch Noppenfolien kann die zu spülende Drainagelänge massiv reduziert werden. Die sukzessive durchgeführte Optimierung des Bauwerks, die fortlaufende Evaluierung der ortsspezifischen Versinterungsneigung und die Konzeptionierung einer zielgerichteten Härtestabilisierung in Kombination mit neuen Spülverfahren, soll dazu beitragen, durch bedarfsorientiertes Spülen die Nutzungsdauer sicherzustellen. Hinsichtlich Tunnelentwässerung im Koralmtunnel konnten einige neue konstruktive und hydrogeochemische Ansätze versucht und umgesetzt werden.

Literatur

- [1] Diernhofer, F., Schneider, K., Steiner, H. (2019). Herausforderung Instandhaltung Koralmtunnel im Spannungsfeld betrieblicher Verfügbarkeit und Anlagenmehrung. *Geomechanik und Tunnelbau* 12, H. 6, S. 652-660. <https://doi.org/10.1002/geot.201900052>
- [2] Dietzel, M., Boch, R., 2024. Precipitation of CaCO₃ in natural and man-made aquatic environments - mechanisms, analogues, and proxies. *Geochemistry*, 84, 4, 126206. DOI: 10.1016/j.chemer.2024.126206.
- [3] Eichinger, S., Boch, R., Leis, A., Koraimann, G., Grengg, C., Domberger, G., Nachtnebel, M., Schwab, C., Dietzel, M., 2020. Scale deposits in tunnel drainage systems – A study on fabrics and formation mechanisms. *Science of the Total Environment*, 718, 137140. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137140.
- [4] Koraimann, G., Bischof, K., 2022. Charakterisierung von mikrobiellen Biofilmen aus Tunnelwässern. *Geomechanik und Tunnelbau*, 15, 4, 358-368, DOI: 10.1002/geot.202200016.
- [5] Boch, R., Kluge, T., Leis, A., Dietzel, M., Szanyi, J., 2024. Mineral deposits affecting geothermal energy production – Insights, analytical approaches and implementation strategies. *Geomechanik und Tunnelbau*, 17, 5, 453-464. DOI: 10.1002/geot.202400028.
- [6] Arbeiter, F., Eichinger, S., Rieß, G., Schachinger, T., Boch, R., Wenighofer, R., Galler, R., Hausberger, A., Strobl, E., Stur, M., Saliger, F., Steiner, M., Dietzel, M., Pinter, G. (2019). Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken – PolyDrain, *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 164, 545-551. DOI: 10.1007/s00501-019-00918-6
- [7] Wedenig, M., Eichinger, S., Boch, R., Leis, A., Wagner, H., Dietzel, M. (2023). Understanding of tunnel drainage scale formation by in-situ monitoring. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 131:104853.
- [8] Boch, R., Pettau, M., Dietzel, M., Leis, A., 2025. Sinterkritische Bergwässer im Tunnelbau - Überlegungen zu Härtestabilisierung und Drainagesystem. 39. Christian Veder Kolloquium 2025, Technische Universität Graz, *Mitteilungshefte NAWI Graz*, 21, 201-212. DOI: 10.3217/e54qq-ps288.
- [9] Boch, R., Pilgerstorfer, T., Moritz, B. (2022). Reduzierung von Versinterung durch optimierte Drainagebedingungen – Erkenntnisse eines Feldversuchs. *Geomechanik und Tunnelbau*, 15, 4, 371-391.
- [10] Wedenig, M., Boch, R., Leis, A., Wagner, H., Dietzel, M., 2021. Green Inhibitor Performance against CaCO₃ Scaling: Rate-Modeling Aided Test Procedure. *Crystal Growth & Design*, 21, 4, 1959-1971.
- [11] Leis, A., Wagner, H., Eichinger, S., Domberger, G., Wedenig, M., Dietzel, M., Boch, R., 2022. Use of green inhibitors for hardness stabilisation of tunnel drainage systems. *Geomechanik und Tunnelbau*, 15, 4, 402-413. DOI: 10.1002/geot.202200018.
- [12] Pettau, M., Leis, A., Gotschy, W., Boch, R., Hasenhüttl, L., Dietzel, M., 2025. In-situ analysis and monitoring of antiscalant polyaspartate by mobile fluorescence spectroscopy. *MethodsX*, 15, 103488. DOI: 10.1016/j.mex.2025.103488.
- [13] Heissenberger, R., Schneider, M., Wagner, H., Ferreira, C., Schachinger, D. (2022). MDB – Leistungsfähiges, flexibles und betriebsorientiertes Drainagespülen in Eisenbahntunneln. *Geomechanik und Tunnelbau* 15, H. 4, S. 414-423. <https://doi.org/10.1002/geot.202200017>