

Hrsg. Stefan Marschnig

Koralmtunnel – Technik im Fokus

26.02.2026, Graz

RP 1

RAILWAY PROCEEDINGS



Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft
Technische Universität Graz

Koralmtunnel – Technik im Fokus

26.02.2026, Graz

Verlag der Technischen Universität Graz

Railway Proceedings

Series Editor

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Marschnig

Tagungsband

Koralmtunnel – Technik im Fokus
26.02.2026, Graz

Die hier angeführten Inhalte sind Artikel zu den Vorträgen der Tagung „Koralmtunnel – Technik im Fokus“, der Technischen Universität Graz; zusammengefasst vom Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft im Jahr 2026

Herausgeber	Stefan Marschnig
Titelbild	Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft Verena Kaiser
Druck	Buchschmiede (DATAFORM Media GmbH)

2026 Verlag der Technischen Universität Graz
Technikerstraße 4, 8010 Graz
verlag@tugraz.at
www.tugraz-verlag.at

Print

ISBN 978-3-99161-065-6

E-Book

ISBN 978-3-99161-066-3

DOI 10.3217/978-3-99161-065-6



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0) Lizenz.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Diese CC-Lizenz gilt nicht für das Cover, Materialien von Dritten
(anderen Quellen zugeschrieben) und anderweitig gekennzeichnete Inhalte.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://www.dnb.de> abrufbar.

Vorwort zur Schriftenreihe Railway Proceedings

Die Koralmbahn ist zweifellos ein Jahrhundertprojekt, das sowohl regional mit der neugeschaffenen Verbindung zwischen Kärnten und der Steiermark sowie der verkürzten Fahrzeit nach Wien als auch international als Teil des Baltisch-Adriatischen Korridors eine deutliche Verbesserung des Bahnsystems darstellt. Der lange Tunnel als zentrales Element war nicht nur eine Herausforderung, sondern auch Anstoß für viele innovative technische Lösungen. Die Kombination aus Tunnellänge und der hohen Betriebsgeschwindigkeit erfordert hohe technische Robustheit.

Diese Tagung setzt den Fokus auf neue Zugänge in den verschiedensten technischen Aspekten, die im Zuge von Planung, Bau und Inbetriebsetzung des Koralmtunnels entwickelt wurden. Die Themenblöcke widmen sich technischen Systemen wie der Ausstattung des Fahrwegs von der Drainage bis zur Festen Fahrbahn. Weiters werden betontechnologische sowie Bau- und Logistikthemen genauso angesprochen wie die zentralen Themen Lärm, Staubentwicklung, Brandschutz und Aerodynamik. Es ist ein weites Feld, in dem neue Methoden und Systeme entwickelt und umgesetzt wurden, was zeigt, dass Großprojekte auch ein Motor für technische Innovationen sind.

Abgerundet wurde die Tagung mit einer Exkursion zum Semmeringbasistunnel, wo viele der beim Koralmtunnel gewonnenen Erfahrungen schon genutzt werden.

Stefan Marschnig

Wir danken unseren Unterstützern



Inhalt

1	ÖBB – Projekte und Visionen für die Zukunft der Mobilität	9
2	Koralmtunnel: Entwässerungssystem für 150 Jahre – Optimierung Bauwerk, Versinterungsentstehung und bedarfsorientiertes Spülen	15
3	Feste Fahrbahn und Masse-Feder-Systeme – Konzeption, Systemwahl und Planung	27
4	Betontechnologische Herausforderungen beim Bau der Festen Fahrbahn	37
5	Der Koralmtunnel – eine logistische Herausforderung	49
6	Die Brücken der Koralmbahn – technische, konstruktive Highlights	59
7	Koralmtunnel – Montage und technisch funktionale Abnahmeprüfung	69
8	Bahntunnel – Aerodynamische Belastungen und Bemessungsansätze für Tunneleinbauten	79
9	Schalltechnische Charakterisierung des Koralmtunnels	89
10	Staub in der Bau-, Test- und Betriebsphase in einem Bahntunnel – Messungen und Ergebnisse	99
11	Realitätsnahe Ansätze für Brandlasten in Eisenbahntunnel	109
12	Die Zukunft der Bahn mitgestalten – F&E bei der ÖBB-Infrastruktur AG	119

Alles andere ist Umweg.

**& WAS
FÄHRST
DU?**

Auf die Strecke, fertig, los!

Die Koralmbahn als Teil der neuen Südstrecke verbindet Graz und Klagenfurt so direkt wie nichts anderes. Die Zukunft kann kommen. Wir kommen ihr mit voller Geschwindigkeit entgegen.

Alle Infos auf suedstrecke.oebb.at

HEUTE. FÜR MORGEN. FÜR UNS.

1

ÖBB – Projekte und Visionen für die Zukunft der Mobilität

DI Gerald Zwitnig (Wien)

Die ÖBB investiert in eine Infrastruktur, die Österreich fit für die Zukunft macht: leistungsfähig, nachhaltig und innovativ. Mit Projekten wie der Koralmbahn und dem Semmering-Basistunnel, einem klaren Rahmenplan zur Finanzierung und Steuerung und mit der Vision des Zielnetzes 2040+ wird die Bahn zum Motor für Klimaschutz und Standortentwicklung. Österreich positioniert sich damit als Vorreiter im europäischen Bahnverkehr.

1.1 Einleitung

Die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) bilden das Rückgrat des öffentlichen Verkehrs in Österreich und sind ein entscheidender Faktor für die Erreichung der nationalen und europäischen Klimaziele. Angesichts wachsender Mobilitätsbedürfnisse und steigender Güterverkehrsströme steht die ÖBB vor der Herausforderung, ihre Infrastruktur zukunftssicher zu gestalten. Mit einer langfristigen Strategie und Milliardeninvestitionen in den Ausbau und die Modernisierung des Netzes verfolgt die ÖBB-Infrastruktur AG das Ziel, eine nachhaltige, leistungsfähige und innovative Mobilität für kommende Generationen zu gewährleisten.



Abbildung 1 Koralmbahn Bahnhof Weststeiermark (c) ÖBB_Chris Zenz

1.2 Neu- und Ausbauvorhaben – Fokus Südachse

Die Südstrecke ist eine der bedeutendsten Verkehrsverbindungen Österreichs und Teil des Baltisch-Adriatischen Korridors von der Ostsee bis zu den nordadriatischen Häfen. Sie verbindet Wien über Graz und Kärnten mit Italien und spielt sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr eine zentrale Rolle. Der Wiener Hauptbahnhof fungiert als moderne Drehscheibe des Bahnverkehrs und ermöglicht schnelle Umstiege sowie internationale Verbindungen. Mit der jüngst fertig gestellten Pottendorfer Linie steht der hochfrequentierte Abschnitt zwischen Wiener Neustadt und Wien nunmehr viergleisig zur Verfügung, um die bestehende Südbahn zu entlasten und zusätzliche Kapazitäten insbesondere für den Nahverkehr im Ballungsraum der Ostregion zu schaffen. Ein Meilenstein ist der Semmering-Basistunnel mit einer Länge von 27 Kilometern, der die Fahrzeit zwischen Wien und Graz erheblich verkürzen wird. Hier läuten die startenden Ausrüstungsarbeiten die finale Bauetappe des Schlüsselprojektes ein. Zwischen Bruck und Graz werden Bahnhöfe leistungsfähiger gemacht, modernisiert und barrierefrei gestaltet, um den Komfort für Reisende zu erhöhen und die Streckenkapazität zu erhöhen. Die Koralmbahn als Hochleistungsstrecke zwischen Graz und Klagenfurt verkürzt seit 14. Dezember 2025 die Fahrzeit für die schnellsten Verbindungen zwischen den Landeshauptstädten auf nur 41 Minuten und setzt neue wirtschaftliche Impulse für die Regionen Südösterreichs. All dies hebt den Bahnverkehr entlang der Südstrecke auf ein neues Niveau und wird die Mobilität für Menschen und Güter grundlegend positiv verändern.

Projekt	Fertigstellung	Nutzen
Hauptbahnhof Wien	abgeschlossen	Drehscheibe, internationale Anbindung
Pottendorfer Linie (Wien Meidling – Wr. Neustadt)	4-gleisig seit 2023, Attraktivierungen und Sanierungen bis 2029	Kapazitätssteigerung, Entlastung Südbahn
Semmering-Basistunnel	2030	Fahrzeitverkürzung Wien–Graz
Koralmbahn	2025	Hochleistungsachse Graz–Klagenfurt
Villach Hbf	2027	Güterverkehrsknoten, internationale Anbindung

Tabelle 1 Wichtige Projekte der Südachse



Abbildung 2 Koralmbahn Jauntalbrücke (c) ÖBB

1.3 Rahmenplan der ÖBB

Der Rahmenplan der ÖBB ist das zentrale Steuerungsinstrument für Infrastrukturinvestitionen. Er umfasst einen Zeitraum von sechs Jahren und sieht Investitionen in Milliardenhöhe vor. Die Schwerpunkte liegen auf dem konsequenten Ausbau der Hauptstrecken, der Beseitigung von Engpässen und der Attraktivierung des Mobilitätsangebots in den Ballungsräumen. Ebenso am Programm stehen Bahnhofmodernisierungen sowie eine umfassende Qualitätsoffensive für das Bestandsnetz. Ganz im Sinne der Dekarbonisierung erfolgen Streckenelektrifizierungen und die Erhöhung von Gleis- und Umschlagkapazitäten für den Güterverkehr. Ebenso werden Investitionen in erneuerbare Energien getätigt und es

wird die Digitalisierung des Bahnbetriebs durch moderne Stellwerkstechnik und das europäische Zugbeeinflussungssystem ETCS vorangetrieben.



Abbildung 3 S-Bahn Upgrade Wien, Baustelle Praterstern (c) ÖBB_Lukas Leonte

1.4 Zielnetz 2040+

Aber auch über den Betrachtungszeitraum des Rahmenplans hinaus wird an der Weiterentwicklung des Bahnnetzes gearbeitet. Mit dem Fachentwurf des Zielnetzes 2040+ verfolgt der Bund gemeinsam mit den ÖBB eine klare Vision: ein vollständig elektrifiziertes, leistungsfähiges und klimafreundliches Bahnnetz. Dieses Netz soll nicht nur die Mobilität in Österreich sichern, sondern auch die internationale Wettbewerbsfähigkeit stärken. Kernelemente sind Hochleistungsstrecken für Personen- und Güterverkehr, die Integration in das europäische TEN-V-Netz sowie die Verknüpfung mit dem öffentlichen Nahverkehr und intermodalen Logistiklösungen. Das Zielnetz 2040+ besteht österreichweit aus Modulen, die, jedes für sich genommen, eine wesentliche Nutzenwirkung für den Personen- und Güterverkehr entfalten. Beispiele sind die weitere Kapazitätssteigerung durch eine zusätzliche Neubaustrecke im Abschnitt zwischen Bruck und Graz, eine leistungsfähige Verbindung von der Weststrecke über das Innviertel Richtung München und kapazitätssteigernde Maßnahmen im Großraum Wien.

1.5 Nachhaltigkeit in der Projektabwicklung

Nachhaltigkeit ist ein zentrales Prinzip in der Projektumsetzung von Neu- und Ausbauprojekten der ÖBB-Infrastruktur AG. Die ÖBB setzt auf ressourcenschonendes Bauen, Recycling und Kreislaufwirtschaft. CO₂-Reduktion in Bauprozessen und klimafitte Baustellen sind ebenso Teil der Strategie wie umfassende Umweltverträglichkeitsprüfungen und der Schutz sensibler Lebensräume bei Großprojekten. Das Ziel ist eine klimaneutrale Infrastruktur bis 2040, die einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der österreichischen Klimaziele leistet.

1.6 Kapazitätsorientiertes Bauen

Im Projektportfolio der ÖBB-Infrastruktur AG treten die Erneuerungs- und Erweiterungsinvestitionen in das bestehende Streckennetz, somit jene Bauprojekte, die „unter dem rollenden Rad“ umzusetzen sind, immer mehr in den Vordergrund. Bei diesen Vorhaben ist neben einer qualitätvollen und wirtschaftlichen Planung und Bauausführung insbesondere auf die unvermeidbaren Einschränkungen des Bahnverkehrs und somit die Beeinträchtigung der Kunden zu achten. Diese erwarten zu Recht eine hochwertige und verlässliche Bahninfrastruktur für den Personen- und Güterverkehr und stabile Fahrpläne. Wir sprechen vom „kapazitätsoptimierten Planen“ und von einer Planung mit „Kundenbrille“. Wichtig sind dabei detaillierte und frühzeitige Bauablaufpläne, die Verschneidung mit dem Fahrplan und den Personenströmen des Bahnverkehrs und ein friktionsfreies Zusammenspiel zwischen Bauen und Betrieb.



Abbildung 4 Bauen unter Betrieb; Abtrag Brücke Friedhofstraße Linz
(c) ÖBB Robert Deopito

1.7 Innovationen in der Projektumsetzung

Technologische Innovationen sind ein Schlüssel für Effizienz und Qualität. Die digitale Planung mit Building Information Modeling (BIM) ermöglicht eine durchgängige Projektsteuerung und die Erstellung von digitalen Zwillingen für präzise Koordination und für Mehrwert in der Instandhaltung. Innovative Baumethoden wie die Vorfertigung von Bauteilen verkürzen Bauzeiten und reduzieren die Einschränkungen des Bahnbetriebes. Zahlreiche Innovationen, die an der Koralmbahn erfolgreich angewendet wurden, kommen bei Folgeprojekten zum Einsatz. Beispiele sind das modulare Drainagespülsystem, optimierte Bemessungsmodelle für Tübbinge, ETCS Level 2 ohne ortsfeste Signale, Deckenstromschienen für die Oberleitung oder Härtestabilisierungen zur Reduktion der Versinterung der Tunnel drainagen.

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.

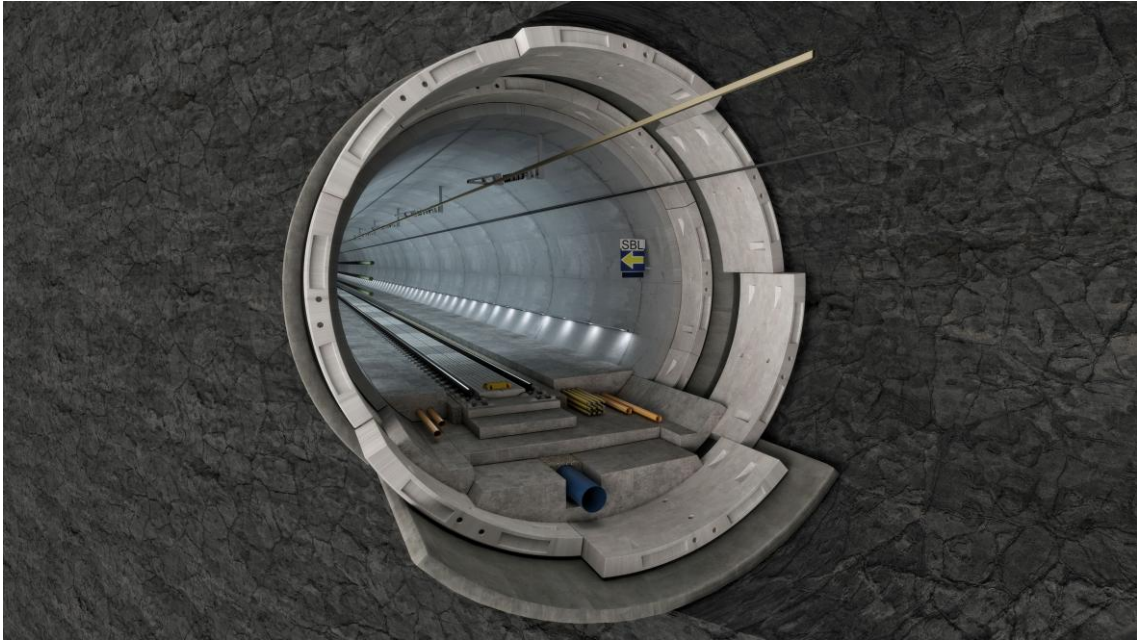


Abbildung 1 Regelquerschnitt KAT für den kontinuierlichen Vortrieb mit Tübbing und Sohl drainage.



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.

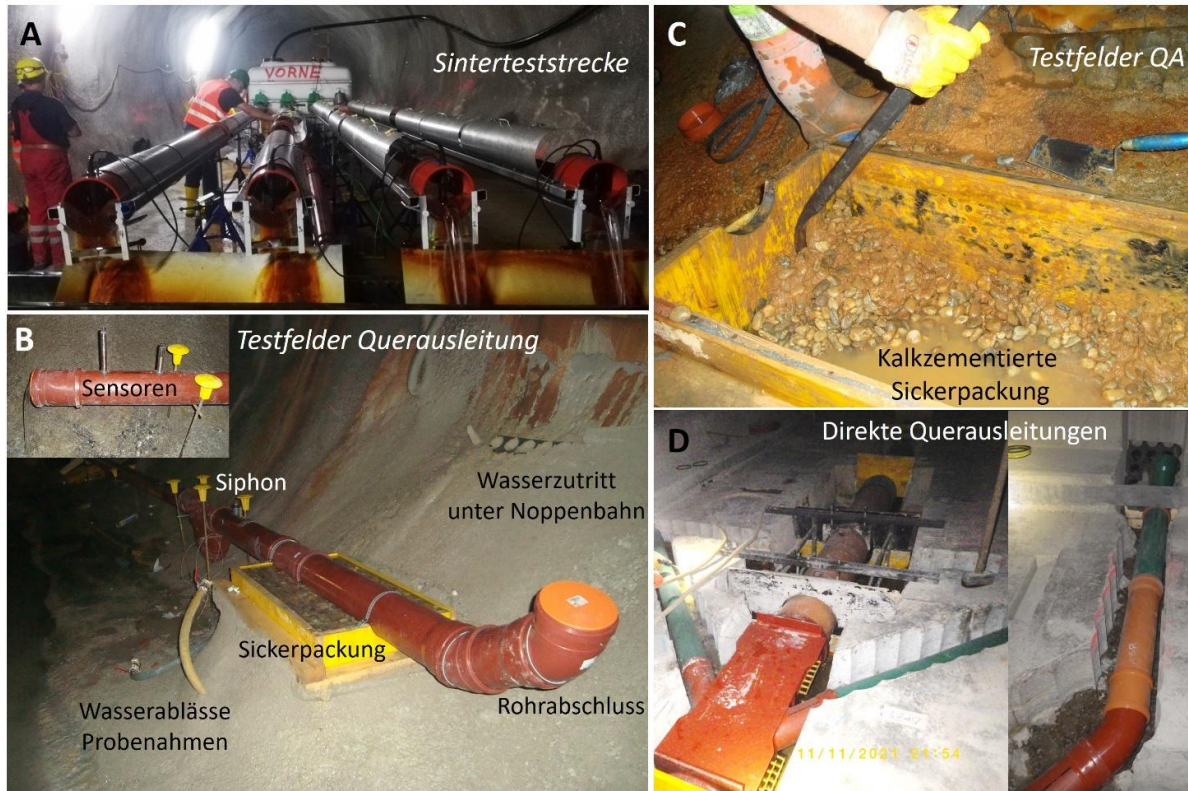


Abbildung 3 Feldversuche im KAT zwecks Optimierung der Ableitung kritischer Bergwässer und konkrete Umsetzung als Sonderspülsystem „Direkte Querausleitungen“ (n=148, GI1 & GI2, ~275 m Tunnelabschnitt um QS 51). A) „Sinterteststrecke“ mit Sensorik im QS 51, B) feldexperimentelle Überprüfung verschiedener 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.

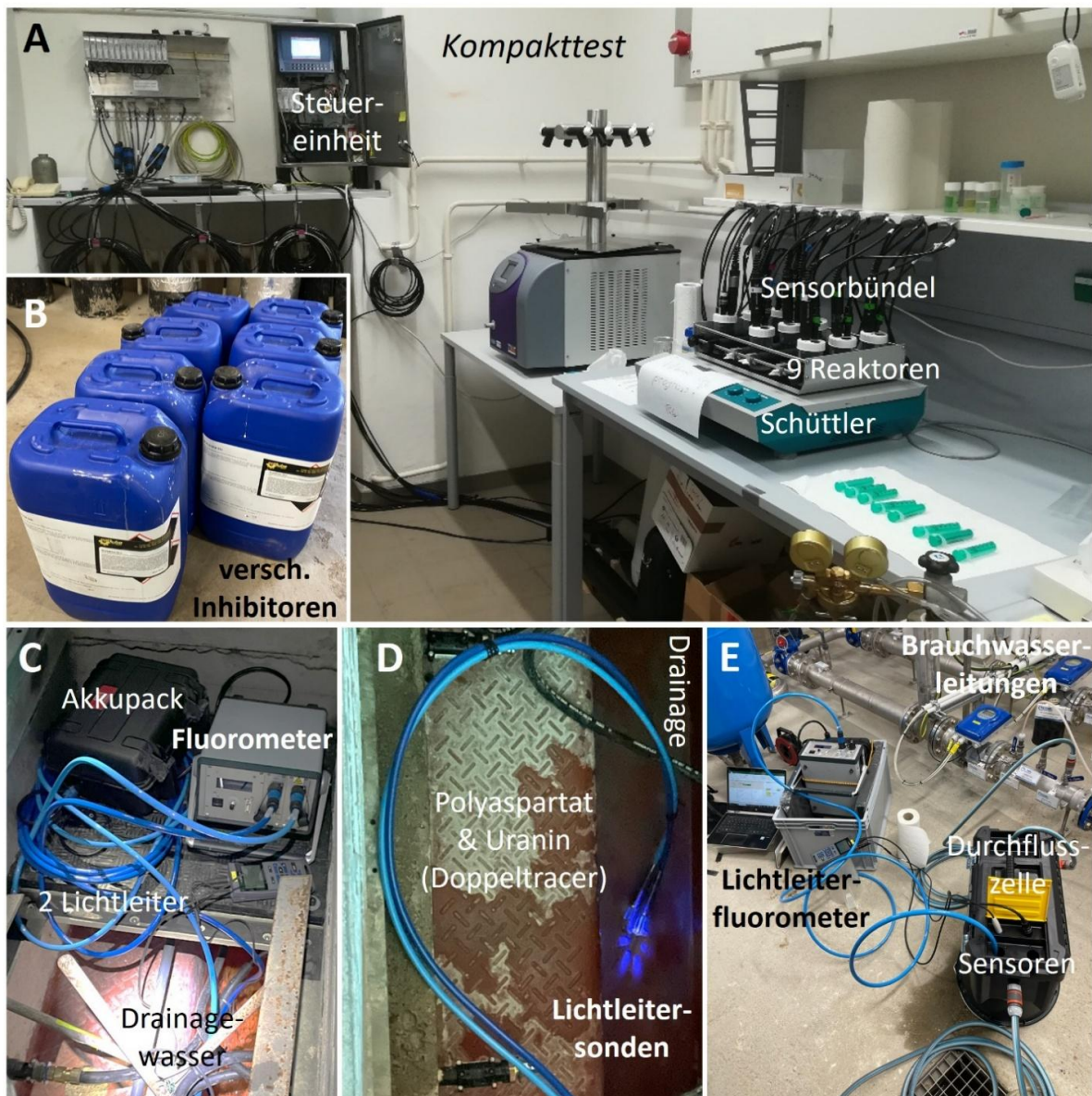


Abbildung 4 Evaluierung und Optimierung von Härtestabilisierungsmaßnahmen in Tunnel drainagen. A) & B) Entwicklung einer kompakten und quantitativen Testprozedur (Laborversuch) zwecks Überprüfung verschiedener HS-Mittel (Wirkstoffe, Produkte) und Dosierungen. C) & D) Anwendung eines portablen Lichtleiterfluorometers (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 CaCO_3 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 CaCO_3 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>

3

Feste Fahrbahn und Masse-Feder-Systeme – Konzeption, Systemwahl und Planung

Dipl.-Ing. Dr.techn. Dieter Pichler (Wien), Dipl.-Ing. Roland Fischer (Wien)

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Konzeption und den Planungsleistungen zur Ausrüstung des Koralmtunnels mit einer Festen Fahrbahn, bereichsweise kombiniert mit Sekundärschall- und Erschütterungsschutzmaßnahmen. Es wird auf die Entwicklung der einzelnen Elemente eingegangen und es werden Entscheidungskriterien für die Systemwahl dargelegt. Die Ausschreibung, die Einbaulogistik und die Ausführungsplanung zusammen mit der Qualitätssicherung werden vorgestellt.

3.1 Einleitung

Die Koralmbahn wurde um die Jahrtausendwende als Hochleistungsstrecke zwischen Graz und Klagenfurt konzipiert, auch wenn erste Überlegungen zu einer neuen direkten Eisenbahnverbindung zwischen Graz und Klagenfurt bereits kurz nach Ende des ersten Weltkriegs als Ersatz für die sogenannte Kärntner Bahn (der Abschnitt dieser Bahnlinie zwischen Marburg und Bleiburg war ja nunmehr auf fremdem Staatsgebiet) aufkamen. Kernstück der Koralmbahn ist der Koralmtunnel, wobei einige weitere Tunnelabschnitte den Streckenverlauf kennzeichnen. Entsprechend der in den 1990-iger Jahren entwickelten Oberbaustrategie für das Streckennetz der ÖBB sind für Tunnel ab 500 m Länge Feste Fahrbahnen vorzusehen. Bereits Anfang 2007 wurden daher erste Überlegungen zur Festen Fahrbahn im Koralmtunnel mit den Fachplanern aller betroffenen Gewerke angestellt. Das Ergebnis war, dass die Systembreite der Festen Fahrbahn kleiner als 2,40 m sein soll.

3.2 Konzeption der Festen Fahrbahn

Die Oberbaustrategie der ÖBB hinsichtlich des Einsatzes von Festen Fahrbahnen zusammen mit den spezifischen Festlegungen des Tunnelquerschnitts, des Tunnelentwässerungssystems, des Tunnelsicherheitskonzepts bildeten die wesentlichen Grundlagen für die Konzeption der Festen Fahrbahn im Koralmtunnel. Die Möglichkeiten Höhen und Seitentoleranzen (z.B. aufgrund von Fehllagen der Tunnelröhren) auszugleichen, stellten ein wesentliches Kriterium für die Wahl des Festen Fahrbahnsystems dar. Als weiterer Aspekt wurde auch die Anwendbarkeit des Festen Fahrbahnsystems in den sonstigen Abschnitten der Koralmbahn berücksichtigt und auch die Grundsatzfestlegungen der ÖBB für das gesamte Streckennetz beachtet.

3.2.1 Oberbaustrategie

Die Oberbaustrategie der ÖBB Infrastruktur AG sieht vor, dass Eisenbahntunnel mit einer Länge ab 500 m jedenfalls mit einer Festen Fahrbahn auszustatten sind. Generell soll die Mindestlänge eines Festen Fahrbahnabschnitts 500 m betragen. Bei aufeinanderfolgenden Festen Fahrbahnabschnitten soll in der Regel der Zwischenbereich (z.B. ein Freilandabschnitt) auch in Fester Fahrbahn ausgeführt werden, wenn dieser Bereich nicht wesentlich länger ist als die daran anschließenden Festen Fahrbahnbereiche. Allerdings sind diese Festlegungen immer projektspezifisch zu prüfen, wobei sowohl technisch wirtschaftliche Überlegungen als auch die laufende Instandhaltung dabei maßgebliche Kriterien darstellen.

3.2.2 Tunnelquerschnitt

Der Querschnitt der eingleisigen Tunnelröhren des Koralmtunnels wurde, gegenüber dem zum Zeitpunkt der UVE im Jahr 2002 üblichen Standard der ÖBB, im Rahmen eines mehrjährigen Entwicklungsprozesses in mehreren Schritten signifikant optimiert. Der geringste Innenradius der Fahrrohre beträgt daher im Ausführungsprojekt 3,95 m an Stelle der im Jahr 2002 vorgesehenen 4,40 m. Aufgrund der Platzanforderungen für die bahntechnischen Ausrüstungen und für die 110 kV Hochspannungsleitung wurde rasch klar, dass auch das Fahrbahnsystem möglichst platzsparend auszuführen ist – die zur Verfügung stehende Fahrtrogbreite beträgt im Regelfall nur 2,78 m, lediglich im Bereich von Masse-Feder-Systemen ist eine Aufweitung auf 2,95 m vorgesehen. Im Fahrtrog ist neben der Festen Fahrbahn selbst auch die Fahrraumentwässerung unterzubringen. Das im Jahr 2002 gültige Regelwerk der ÖBB sieht für Feste Fahrbahnen eine Mindestbreite des Fahrtrogs von 2,90 m vor. Im Zuge der Arbeiten an der Festen Fahrbahn für den Arlbergtunnel wurden bereits Erfahrungen mit einer Konstruktionsbreite der Festen Fahrbahn in Gleistragplattenbauweise von 2,12 m gesammelt – auch hinsichtlich der Befahrbarkeit mit gummibereiteten Fahrzeugen für derart schmale Fahrbahnkonstruktionen.

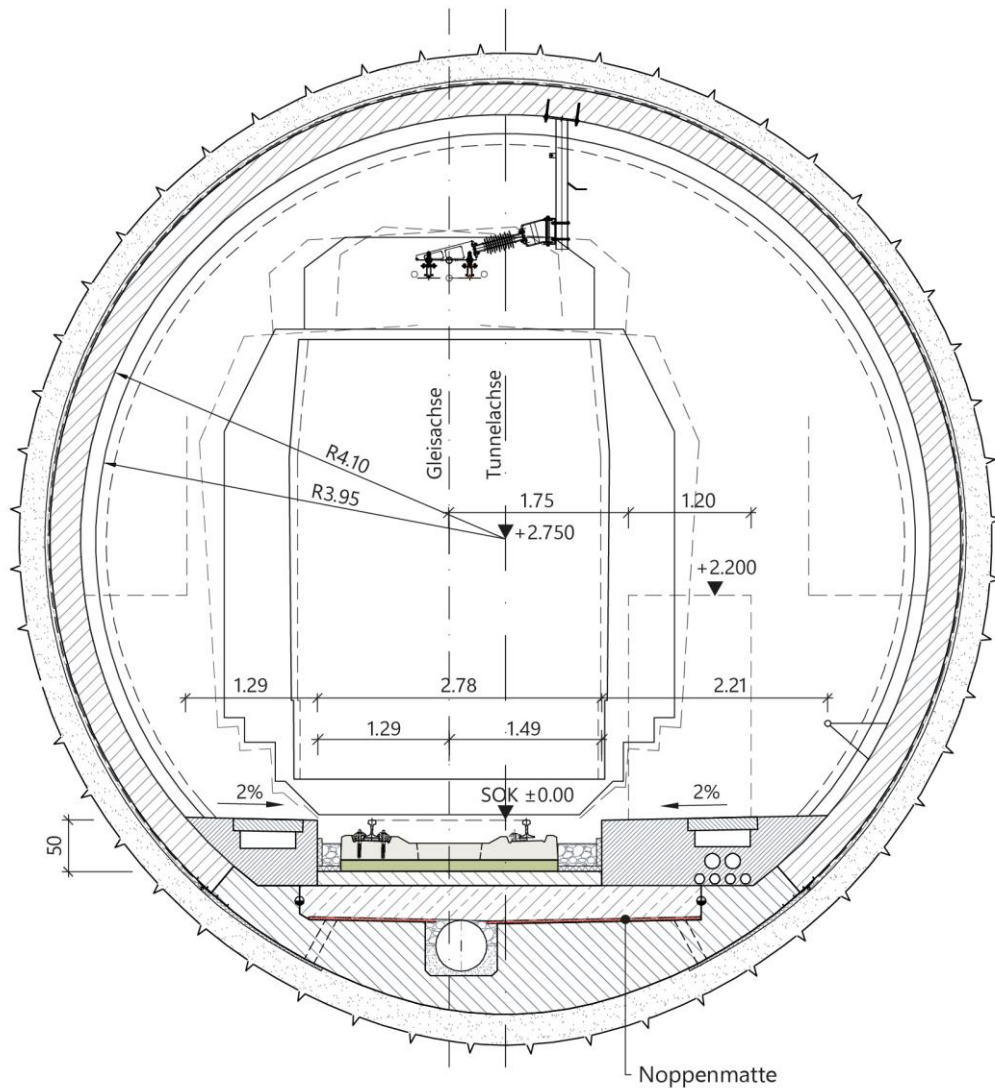


Abbildung 1 Feste Fahrbahn in Tunnelröhre mit Fahrtrogbreite 2,78 m. [1]

3.2.3 Tunnelentwässerungskonzept

Das Tunnelentwässerungskonzept des Koralmtunnels sieht eine strikte Trennung von Bergwässern und im Tunnelinnenraum anfallenden Wässern vor. Dadurch wird eine Kontamination der Bergwässer mit allfälligen Störfallwässern aus dem Tunnel sicher vermieden. Die Trennung zwischen Bergwasserdrainage und Fahrraumentwässerung liegt im Bereich der Festen Fahrbahn. Die Reinigung der Bergwasserdrainage erfolgt über ein System von abgedichteten Schächten in Gleisachse. Das Bergwasser wird über Noppenmatten unterhalb der sogenannten RBS-Platte in die Bergwasserdrainage eingeleitet. Die RBS-Platte ist das Auflager für die Feste Fahrbahn. Die Lastabtragung der Festen Fahrbahn erfolgt über diese RBS-Platte auf die Noppenmatte und über diese in die Unterkonstruktion. Damit die Lasten sicher abgeleitet werden können wurden bereits in einer sehr frühen Phase Versuche hinsichtlich des Reibkoeffizienten zwischen Noppenmatte und Unterkonstruktion durchgeführt und darauf aufbauend entsprechende rechnerische Nachweise insbesondere für den Abtrag der Longitudinal- und Lateralkräfte erbracht.

Der Abstand der Schächte wurde so festgelegt, dass eine minimale Anzahl an Sonderkonstruktionen der Festen Fahrbahn erforderlich wurde und mit einer Standardlösung gearbeitet werden konnte. Besondere Herausforderungen haben sich hinsichtlich der Abdichtung und der Bautoleranzen ergeben.

Für die Fahrtraumentwässerung werden zwei Bereiche unterschieden: der Bereich von den beiden Tunnelportalen in Richtung Tunnelmitte, der vom Eintrag von Schleppwässern betroffen ist und der Tunnelinnenbereich, der praktisch kaum von Schleppwassereintrag betroffen ist. In den portalnahen Bereichen (bis ca. 3 km ins Tunnelinnere) wird die Entwässerung durch seitlich angeordnete mit Einkornbeton ummantelte Drainageleitungen realisiert, die die Wässer aus dem Tunnel ableiten. Für den Innenbereich des Tunnels wird davon ausgegangen, dass die eventuell noch anfallenden Restschleppwässer in den beidseits der Festen Fahrbahnkonstruktion vorhandenen mit Einkornbeton gefüllten Rinnen verdunsten.

3.2.4 Tunnelsicherheitskonzept

Das Tunnelsicherheitskonzept des Koralmtunnels baut auf folgenden Prinzipien auf:

- I Selbstrettung vor Fremdrettung
- I Sichere Bereiche
- I Nothaltestelle
- I Nutzung der 2. Tunnelröhre für Evakuierung

Hinsichtlich des Fahrbahnsystems sind daher Begehrbarkeiten zur Fluchtwegnutzung sicher zu stellen. Die Oberfläche der Festen Fahrbahn ist im Vergleich zu einem Schotteroberbau bereits sehr ebenflächig und daher gut zu begehen. Durch geeignete Eindeckungen der Fahrbahn kann eine derartige Begehrbarkeit bei Bedarf auch als durchgehende Fläche auf Höhe der Schienenoberkante erreicht werden.

3.3 Konzeption Masse-Feder-Systeme

Aufgrund der Bebauungen im Nahebereich des Koralmtunnels mit geringer Überdeckung (also im Nahebereich der Tunnelportale) wurden sowohl auf steirischer Seite im Bereich Leibenfeld (Ostportal) als auch auf Kärntner Seite im Bereich Lindhof (Westportal) Untersuchungen und Prognoserechnungen hinsichtlich der zu erwartenden Sekundärschall- und Erschütterungsimmissionen bei den Anrainern durchgeführt. Dabei wurde stufenweise vorgegangen: in einem ersten Schritt erfolgten die Prognosen auf Basis geotechnischer Untersuchungen (Refraktionsseismik) und Bewertung der Schwingungsübertragungen vom Emissionsort, also von der Kontaktfläche Rad-Schiene, zu den Anrainern, Fundamente und Decken der Gebäude mittels numerischer Simulationen. In einer zweiten Phase wurden

dann direkte Messungen während des Tunnelvortriebs und Emissionsspektren vergleichbarer Tunnel herangezogen. Die endgültige Festlegung der erforderlichen Maßnahmen erfolgte dann unter Verwendung von VibroScan Untersuchungen und der Auswertung der Emissionen der bauzeitlichen Tunnelbahn. Schlussendlich ergab sich folgendes Erfordernis für Masse-Feder-Systeme:

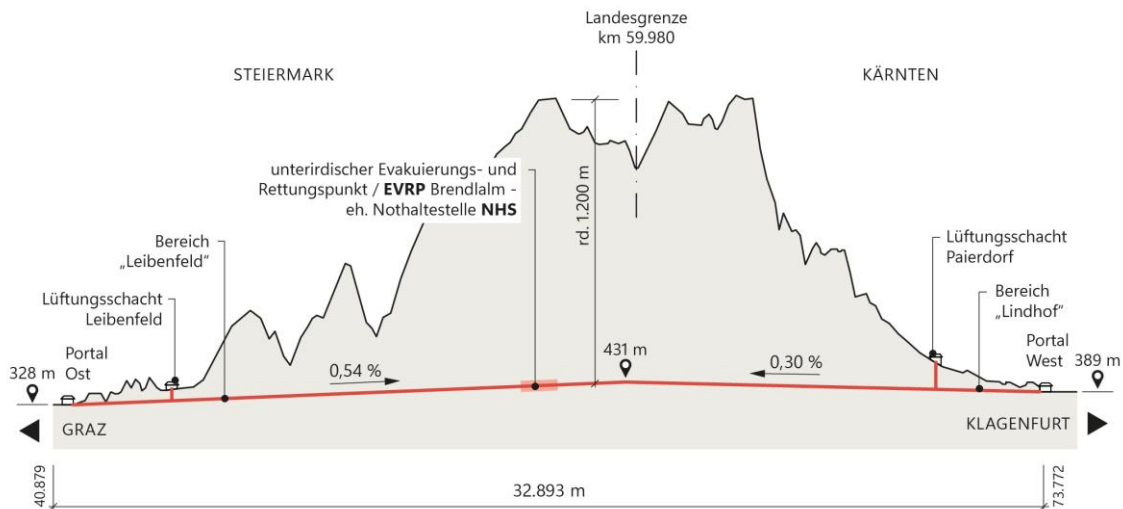


Abbildung 2 Schema-Längsschnitt Koralmtunnel [2]

Südröhre

- I Portalbereich Ost: MFS 20 Hz, Länge 250 m
- I Bereich Leibenfeld: MFS 15 Hz, Länge 320 m und 690 m; MFS 20 Hz, Länge 430 m
- I Bereich Paierdorf: MFS 20 Hz, Länge 200 m
- I Bereich Lindhof: MFS 16 Hz, Länge 525 m
- I Portalbereich West MFS: 20 Hz, Länge 200 m

Nordröhre

- I Portalbereich Ost: MFS 20 Hz, Länge 250 m
- I Bereich Leibenfeld: MFS 15 Hz, Länge 370 m und 750 m; MFS 18 Hz, Länge 370 m
- I Bereich Paierdorf: MFS 20 Hz, Länge 200 m
- I Bereich Lindhof: MFS 18 Hz, Länge 525 m
- I Portalbereich West MFS: 20 Hz, Länge 200 m

Aufgrund der gegebenen Anforderungen an die Eigenfrequenzen und den Platzverhältnissen im Tunnel wurden folgende Konstruktionstypen entwickelt:

- I Masse-Feder-Systeme mit Flächenlagerung
- I Masse-Feder-Systeme mit Streifenlagerung (für Eigenfrequenzen < 17 Hz)
- I Masse-Feder-Systeme in Form eines Trog- und in Form eines Plattenquerschnitts

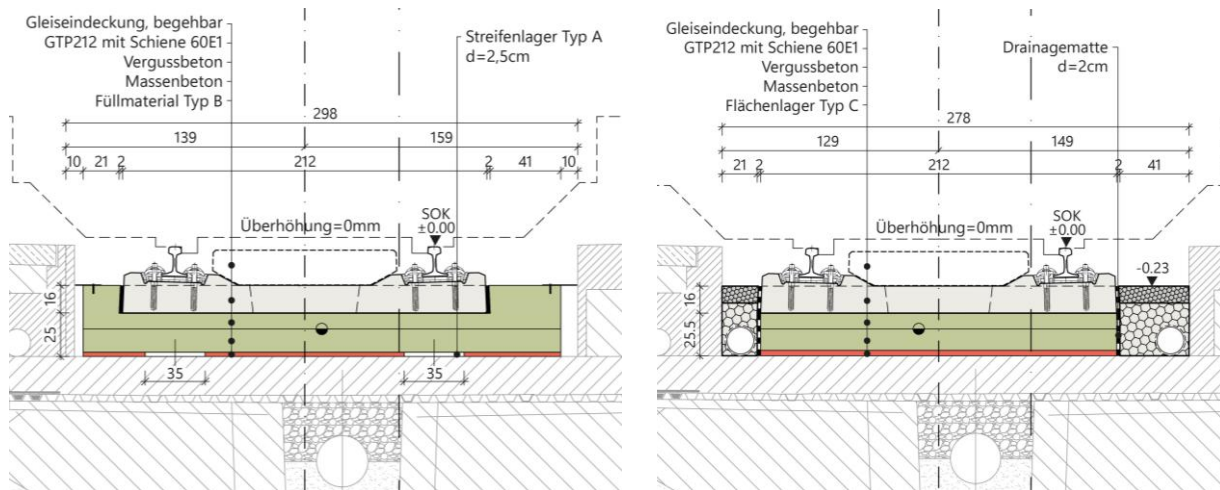


Abbildung 3/4 MFS Trogquerschnitt mit Streifenlagerung und MFS Plattenquerschnitt mit Flächenlagerung [3]

3.4 Systemwahl Feste Fahrbahn

Aufbauend auf den konzeptionellen Vorgaben wurde eine Marktanalyse zu Festen Fahrbahnsystemen durchgeführt. Dabei waren wesentliche Kriterien:

- I System muss im Vollbahnbereich, mit einem ähnlichen Betriebsprogramm wie bei der Koralmbahn vorgesehen, mehrjährig erfolgreich erprobt sein
- I System muss entweder eine Zulassung einer europäischen nationalen Bahngesellschaft, einer europäischen nationalen Eisenbahnbehörde oder eine ÖBB-Anwendung vorweisen können
- I System muss den TSI-Anforderungen entsprechen und entweder eine Teilprüfbescheinigung vorweisen oder zumindest bereits bei einem Einzelprojekt eine positive EG-Prüfbescheinigung vorweisen

Schlussendlich wurden dann mehrere Systeme einer vertieften vergleichenden Prüfung unterzogen:

- I Sonnevile System LVT (Low Vibration Track)
- I RailOne System Rheda 2000
- I Max Bögl Fertigteilplattensystem
- I System ÖBB-Porr elastisch gelagerte Gleistragplatten (Slab Track Austria – STA)

Durch diese Vorauswahl wurden grundsätzlich unterschiedliche Bauweisen betrachtet und somit ein Querschnitt über weit verbreitete Systeme abgebildet. Anhand der nachfolgenden Kriterien erfolgte dann eine detaillierte qualitative Bewertung, wobei als Referenzsystem das System „ÖBB-Porr elastisch gelagerte Gleistragplatte“ herangezogen wurde, da dieses

die Regelbauart im Streckennetz der ÖBB darstellt. Bei der Bewertung wurden die Anwendungsfälle entlang der gesamten Koralmbahn mit einbezogen, da eine einheitliche Systemwahl für die gesamte Bahnstrecke vorteilhaft ist.

I Geometrische Parameter: Platzbedarf und Bauhöhe Herstellbarkeit Öffnung Entwässerungsschächte	I Einbauparameter: Vorfertigungsgrad Einbaugeschwindigkeit und Einbaufehleranfälligkeit Arbeitssicherheit Qualitätssicherung Erzielbare Anfangs-Gleislagequalität Möglichkeit der Regulierung
I Betriebs-/ Sicherheitsparameter: Brandschutz Instandhaltungskonzept Reparaturkonzept	I Systemparameter: Sekundärschall- und Erschütterungsminde- rungswirkung Befahrbarkeit für gummibereitete Fahrzeuge Freilandtauglichkeit Langzeiterfahrung

Zusätzlich zu dem o.a. qualitativen Vergleich wurde ein Systemvergleich hinsichtlich der relevanten Aspekte des Life-Cycle Managements ausgearbeitet. In einem ersten Schritt wurden die LCM-Bewertungsfaktoren für jedes System ermittelt und die Ergebnisse gegenübergestellt. Es wurden folgende LCM-Bewertungsfaktoren berücksichtigt:

I Technische Lebensdauer	I Lebenszykluskosten
I Reparatur- und Austauschkonzept	I Höhenregulierung

Danach erfolgte die Ermittlung, Gegenüberstellung und Bewertung von Alterungsmodellen, Maßnahmenplanungen und Lebenszykluskosten jeweils anhand von LCM-Bewertungsmatrizen. Hinsichtlich Instandhaltung wurden für die Lebenszykluskosten folgende Ansätze angewendet:

- I Maßnahmen, die unabhängig vom FF-System zu erwarten sind und deren Kosten ebenfalls vom FF-System annähernd unabhängig sind:**
 - Inspektion (Begehung und Befahrung)
 - Schienenschleifen
 - Schientausch
 - Spülen/Instandsetzen Entwässerung

- I Maßnahmen, die abhängig vom jeweiligen FF-System auftreten und zu individuellen Kosten für das jeweilige System führen:
- Sanierung gelockerter Schwellen
 - Erneuerung von Stützpunkten/Teilewechsel
 - Instandsetzung von Setzungsschäden
 - Rissanierung

Schlussendlich hat sich in der Zusammenschau aller Untersuchungsergebnisse folgende Reihung ergeben:

	Betriebserprobung			Technische Nutzungsdauer	Lebenszyklus-kosten	Reparatur-/ Austausch-konzept	Höhen-regulierung	Gesamt-be-wertung
	Referenz-strecke	Langzeit-erfahrung	Betriebs-erprobung					
Bögl	4	4	4	2	2	2	2	2
LVT	3	2	2	4	4	4	3	4
ÖBB – PORR	1	1	1	1	1	1	1	1
Rheda 2000	1	3	3	3	3	3	4	3

Tabelle 1 Reihung der Fahrbahnsysteme [1]

Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde seitens der ÖBB entschieden, dass die Feste Fahrbahn in Form des Systems ÖBB-Porr elastisch gelagerte Gleistragplatte weiter beplant wird.

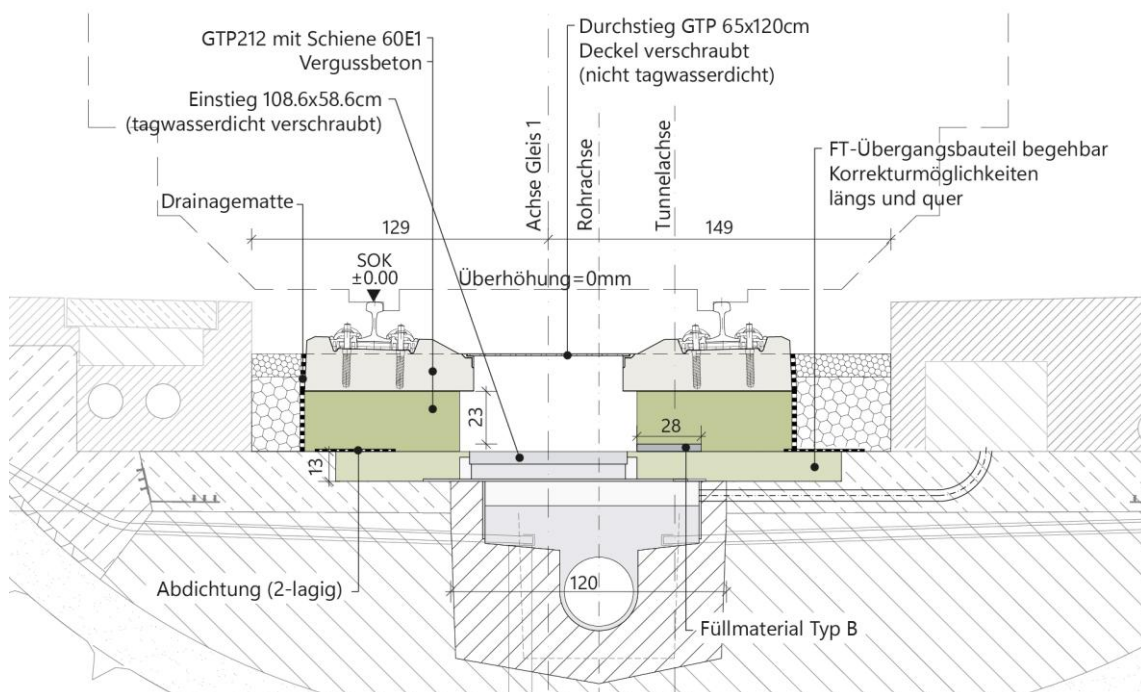


Abbildung 5 FF-Systemquerschnitt im Bereich Schacht für Mitteldrainage [3]

3.5 Ausschreibungs- und Ausführungsplanung FF und MFS

Nachdem die Systementscheidung getroffen wurde, konnte die Ausschreibungsplanung erfolgen. Dabei war auch die Trassierung nochmals zu kontrollieren und fallweise anzupassen, um die Ist-Lage der Tunnelröhren und damit die Abweichungen von der Soll-Lage entsprechend zu berücksichtigen. Die Planung der Festen Fahrbahn beinhaltet auch die Austeilung der Gleistragplatten in Tunnellängsrichtung unter Berücksichtigung der geometrischen Zwangspunkte und die Planung der Fertigteilplatten selbst. Für die Plattenproduktion und Lieferung wurde ein Prüfsystem gewählt – die Platten wurden für den Einbau über einen eigenen Vertrag beigestellt. So konnte schlussendlich auf der einen Seite mit der Arge MABA/HABAU ein sehr kompetenter Fertigteilproduzent mit einer auf der Baustellen-seite sehr erfahrenen und fachkundige ARGE bestehend aus Porr Bahnbau und Rhomberg/Sersa Bahnbau kombiniert werden, um ein technisch-wirtschaftlich optimales Ergebnis zu erzielen.

Die Komplexität des Gesamtsystems ist anhand der Systemquerschnitte gut erkennbar. Insbesondere die beengten Platzverhältnisse und die Dichtigkeitserfordernisse an die Schächte für die Mitteldrainage waren gemeinsam mit der Logistik und Baustellensicherheit für einen derartig langen Tunnel herausfordernd. Zur Erleichterung des Einbaus wurde die Randwegherstellung vom Tunnelrohbau in den Tunnelausbau verschoben und somit für die Erstellung der Fahrbahn ein größtmöglicher Bewegungsspielraum in den Tunnelröhren geschaffen.

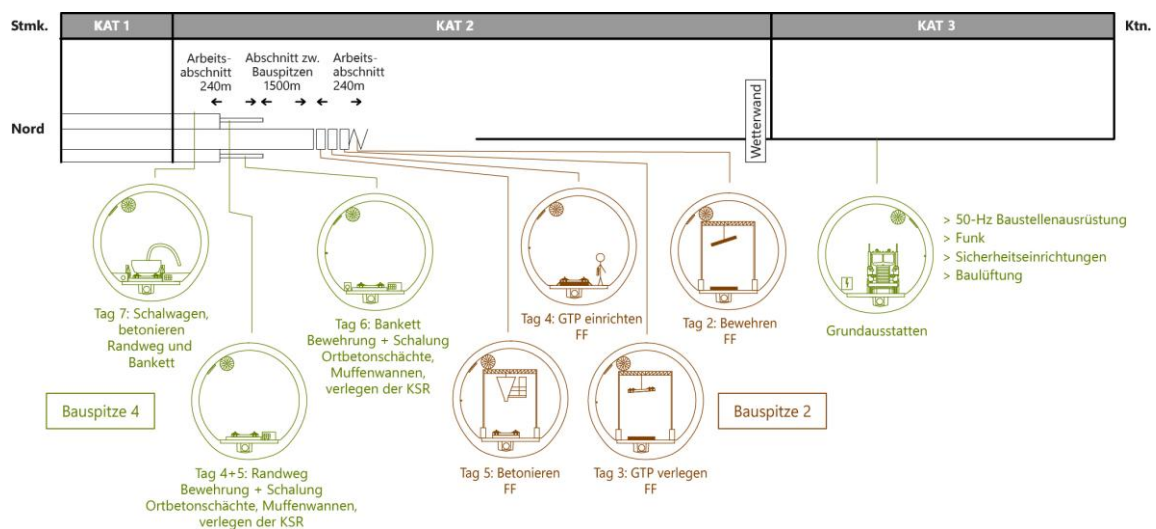


Abbildung 6 Bauablauf Ausschreibungsplanung am Beispiel Nordröhre

Zur Sicherstellung einer bestmöglichen Ausführungsqualität wurde auch die Errichtung eines Probegleises vor Beginn der Fahrbahnerrichtung außerhalb des Tunnels vorgesehen.

Weitere Qualitätssicherungsmaßnahmen für die Bauausführung waren:

- I Gleislageabnahme vor Betonage
- I Gleislagekontrolle am fertigen System
- I Endoskopprüfungen des Vergusses der GTPs
- I Abhebekontrolle an einzelnen GTPs zur Prüfung des vollflächigen Vergusses bzw. von Lunkerbildungen.
- I Eigenfrequenzprüfungen an den Masse-Feder-Systemen

3.6 Zusammenfassung

Der Koralmtunnel ist Kernstücke der neuen Hochleistungseisenbahnstrecke zwischen Graz und Klagenfurt. Für den Fahrweg wurde eine Feste Fahrbahn bereichsweise auf Masse-Feder-Systemen konzipiert, geplant und ausgeführt. Dazu wurde in einer ersten Phase die Auswahl des Festen Fahrbahnsystems anhand einer Fülle von Kriterien über Lebenszykluskostenanalysen durchgeführt. Die erforderlichen unterschiedlichen Masse-Feder-Systeme wurden auf Basis von Erschütterungs- und Sekundärschallprognosen entwickelt. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse in den sehr langen Tunnelröhren wurde die Herstellung der Randwege vom Tunnelrohbau in die Phase des Baus der Fahrbahn verschoben. Die Ausschreibungsplanung teilte sich in die Ausarbeitung eines Prüfsystems für die Produktions- und Lieferungsleistungen für die Fertigteilgleistragplatten und in die Ausschreibung der Einbauleistungen für die Fahrbahn, die Randwege und weitere bahntechnische Ausrüstungen. Dabei wurde auch eine Bauablauflogistik entwickelt. In weiterer Folge wurde die Ausführungsplanung erstellt, wobei insbesondere die Gleistragplattenausteilung unter Beachtung der geometrischen Zwangspunkte und die unterschiedlichen Masse-Feder-Systeme bei den vorhandenen beengten Platzverhältnissen herausfordernd waren. Baubegleitend wurden sowohl für die Fahrbahn als auch für die Wirksamkeit der Masse-Feder-Systeme umfangreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen ergriffen.

Insgesamt ist es durch das Engagement aller Projektbeteiligten gelungen, einen modernen Fahrweg, der trotz der langen Projektgeschichte dem letzten Stand der Technik entspricht zu planen und umzusetzen.

Literatur

- [1] D. Pichler, M. Widmann, Vergleich Feste-Fahrbahn-Systeme, FCP ZT GmbH, Wien, März 2015
- [2] R. Felsner, H. Steiner, W. Unterberger, Masse-Feder-Systeme im Koralmtunnel: 20 Jahre – Prognose, Planung, Realisierung, Inbetriebsetzung, 3. Wiener Dynamik Tage, 25.07.2024.
- [3] FCP ZT GmbH, Ausführungsprojekt Feste Fahrbahn und Masse-Feder-Systeme im Koralmtunnel

4

Betontechnologische Herausforderungen beim Bau der Festen Fahrbahn

Dipl.-Ing. Dr. techn. Walter Pichler (Hart im Zillertal), Dipl.-Ing. Roland Fischer (Wien)

Die Herstellung eines qualitativ hochwertigen Vergusses von Gleistragplatten ist sehr komplex aufgrund der vielen Einflussfaktoren. An Probefeldern und nach dem Einbau der Gleistragplatten (GTP) zeigte sich, dass die Problematik der Bildung von minderfesten Schichten (Hohlräume oder Porenbetonbildung) am Übergang vom Vergussbeton zur GTP besteht. Durch ein neu entwickeltes Prüfverfahren, der modifizierten L-Box, ist es nun möglich, mit deutlich geringerem Kostenaufwand gegenüber der Herstellung von Probefeldern die Eigenschaften des Vergussbetons zu optimieren und damit die Prozesssicherheit zu erhöhen.

Probefelder für den Verguss von Schwellen zeigten, dass die Problematik der Bildung von minderfesten Schichten (Hohlräume oder Porenbetonbildung) auch beim Verguss von Schwellen besteht. Das Versuchsverfahren wurde zwischenzeitlich auch für die Prüfung der Eignung von Beton zum Verguss von Schwellen optimiert. Da der Beton beim Einbau im Gleis allerdings manuell verteilt und verdichtet werden muss, kann dabei nur die Eigenschaften des Vergussbetons beurteilt werden, nicht aber das gewählte Einbauverfahren.

4.1 Feste Fahrbahn mit Gleistragplatten (GTP)

Nach den Regelwerken der ÖBB-Infrastruktur AG sind Tunnel über 500m mit Fester Fahrbahn auszuführen. Seit ca. 1995 wird bei Errichtung von FF bei der ÖBB Infrastruktur AG das System „elastisch gelagerte Gleistragplatte“ (ÖBB-Porr Platte) eingebaut.

Bei dem System handelt es sich um ein Fertigteil-Plattensystem mit Abmessungen von 5,16 m x 2,4 m x 0,16 m. Projektbezogen können aus Platzgründen auch schmalere Platten mit einer Breite von 2,12m eingebaut werden.

Die Platte besitzt 2 Einfüllöffnungen, über die sie mit Vergussbeton nach Einrichtung vergossen wird.

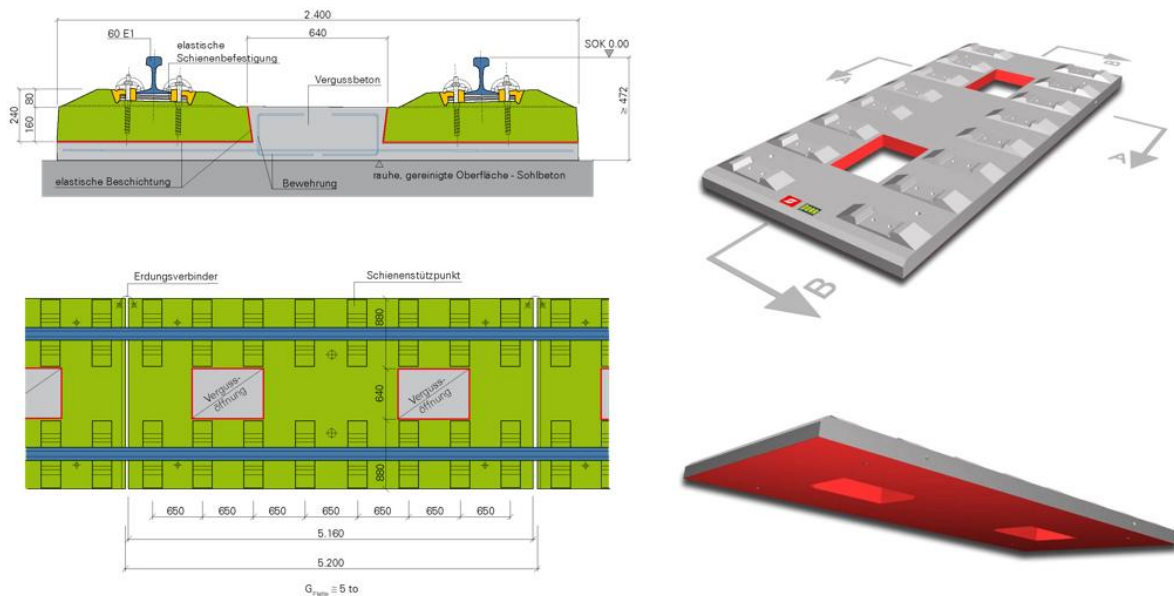


Abbildung 1 Feste Fahrbahn System Gleistragplatte (GTP)

Der Grund für den Einbau einer FF liegt vor allem im geringeren Instandhaltungsaufwand. Die ÖBB hat betreffend Instandhaltung eine gute Erfahrung mit dem System elastisch gelagerte Gleistragplatte. Prognostiziert ist eine Lebensdauer von 80 Jahren. Lediglich das Befestigungssystem (System 300-1) muss zwischendurch gewartet bzw. getauscht werden.

4.2 Vergussbeton

Die Gleistragplatten werden in einem ersten Schritt aufgeständert und justiert. Der Hohlraum unter der GTP wird anschließend mit dem Vergussbeton vergossen. An den Vergussbeton ergeben sich daraus, neben dem Erreichen der geforderten Druckfestigkeit und Expositionsklassen, die folgenden spezifischen Anforderungen:

- I Die Fließeigenschaften des Betons müssen ein hohlraumfreies Untergießen der Gleistragplatten ermöglichen, dabei muss sich der Vergussbeton selbsttätig unter der GTP verteilen.
- I Da der Vergussbeton nicht mittels Rüttler verdichtet werden kann, muss dieser sich soweit selbstverdichten, dass die geforderten Festbetoneigenschaften erreicht werden.
- I Der Beton darf sich beim Einbau nicht entmischen und muss kraftschlüssig an die GTP anbinden. Eine minderfeste Schicht oder Hohlräume am Anschluss zur GTP sind nicht zulässig. Gleichmäßig verteilte, kleinere Lufteinschlüsse bis zu 25 % der Gesamtfläche unter der GTP sind zulässig.

Die Anforderungen an die Druckfestigkeit liegen in der Regel im Bereich von C25/30 bis in Sonderfällen C50/60. Die geforderten Expositionsklassen sind in der Regel XC4 und XA1L sowie zusätzlich im Frost belastetem Bereich XF3.

Abhängig von der Dicke des Vergussbetons ist ein Größtkorn von 4 bis 16 mm erforderlich.

4.2.1 Eignungsnachweis für den Vergussbeton

Für den Beton ist grundsätzlich eine Eignungsprüfung zum Nachweis der normgemäßen Frisch- und Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit und der Expositionsklassen) zu erbringen.

Die normgemäßen Nachweisverfahren für selbstverdichtenden Beton (SCC-Beton) wie Blockierneigung, Fließmaß und Sedimentationsstabilität sind erfahrungsgemäß für die Bewertung der Eignung des Vergussbetons für das Untergießen von GTP nicht ausreichend aussagekräftig.

Aus diesem Grund wird ein zusätzlicher Eignungsnachweis in Form von Probefeldern gefordert. Zu berücksichtigen sind bei der Herstellung der Probefelder das Transportverfahren des Betons zur Einbaustelle (z.B. Pumpen oder Rutsche) und die vorgesehene Verarbeitungsdauer des Betons. Wird der Beton gepumpt, ist zusätzlich die Pumpleitungslänge als maßgeblicher Faktor zu berücksichtigen.

Anhand dieser Probefelder ist das Erreichen der geforderten Vergussbetonqualität im eingebauten Zustand für die seitens der ausführenden Firma zu wählende Ober- und Untergrenzen der Konsistenz des Frischbetons, über die vorgesehene Verarbeitungsdauer, nachzuweisen.

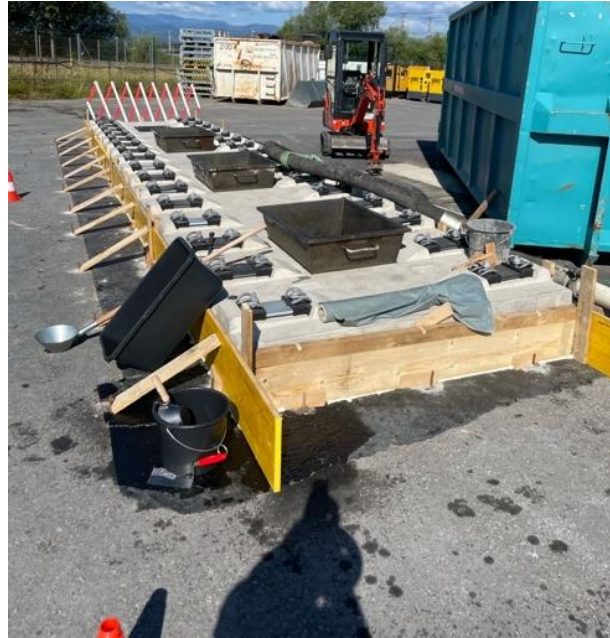


Abbildung 2 Beispiel eines Probefeldes für den Vergussbeton

Die bei den Probefeldern verwendete Ober- und Untergrenze der Konsistenz dürften in der Ausführung weder über- noch unterschritten werden.

Im Rahmen der Herstellung der Probefelder wurde nach dem Abheben der Gleistragplatten überprüft, ob die Anforderungen an die Vergussqualität eingehalten wurden.

Die bisherigen Erfahrungen aus den Probefeldern zeigen, dass bei ersten Herstellungsversuchen im Vergussbeton am Übergang zur Gleistragplatte häufig Hohlstellen durch Lufteinschlüsse sowie großflächig minderfester Beton auftreten.



Abbildung 3 Negatives Ergebnis eines Probefeldes mit großen Lufteinschlüssen und Porenbeton

Häufig werden erst nach der Herstellung einer Serie von Probefeldern mit unterschiedlichen, optimierten Betonzusammensetzungen die Anforderungen an die geforderte Qualität des Vergussbetons erreicht.

4.2.2 Fehlstellen im Vergussbeton

Wird der Vergussbeton zu weich eingebaut, kann es zu Entmischungen und Bildung einer schaumartigen, weichen, mehrere mm dicken Porenbetonschicht an der Grenzfläche zur GTP kommen.



Abbildung 4 Fehlerhafte Vergussbetonoberfläche nach dem Abheben der GTP mit Detailaufnahme mit Schuhabdrücken im weichen schaumartigen Porenbeton

Die Erkennbarkeit, ob es zu Entmischungen kommt, ist nur zum Zeitpunkt des Betoneinbaues möglich. Ansonsten können derartige Fehlstellen nur nach dem Abheben der GTP sichtbar gemacht werden. Anzeichen für derartige Entmischungen ist die vermehrte Bildung einer schaumartigen Schicht auf der Vergussbetonoberfläche in den Vergussöffnungen der GTP.



Abbildung 5 Schaumbildung am Frischbeton in der Einfüllöffnung

Wird der Vergussbeton zu steif eingebaut, bilden sich unter der Gleistragplatte Hohlstellen. Liegen diese am Rand der GTP, so sind diese nach dem Einbau des Betons und der Entfernung der seitlichen Schalung erkennbar (Bild 6).



Abbildung 6 Hohlstelle am Rand unter der GTP

4.3 Kennwerte unterschiedlicher Vergussbetone

In der folgenden Tabelle sind die Kennwerte von unterschiedlichen Vergussbetonen gegenübergestellt. Die Vergussbetone weisen alle ein GK8 auf und entsprechen den Expositionsklassen XC4, XA1L und XF3.

Projekt	A	B	C	D	E
Bindemittelgehalt	470 kg/m ³	520 kg/m ³	500 kg/m ³	500 kg/m ³	560 kg/m ³
Füller	90 kg/m ³	-	-	80 kg/m ³	40 kg/m ³
Bindemittel inkl. Füller	560 kg/m ³	570 kg/m ³	500 kg/m ³	580 kg/m ³	600 kg/m ³
Wassergehalt	205 l/m ³	200 l/m ³	182 l/m ³	206 l/m ³	200 l/m ³
Gesteinskörnung	1570 kg/m ³	1472 kg/m ³	1623 kg/m ³	1485 kg/m ³	1549 kg/m ³
Fließmittel	5,4 kg/m ³	3,8 kg/m ³	4,0 kg/m ³	4,13 kg/m ³	5,5 kg/m ³
Luftporenmittel	1,74 kg/m ³	0,8 kg/m ³	0,3 kg/m ³	1,15 kg/m ³	-
Verögerer	1,95 kg/m ³	1,5 kg/m ³	-	1,0 kg/m ³	1,84 kg/m ³
Kennwerte Beton					
Luftporengehalt	4,7 %	5,5 %	4,6 %	7,0 %	3,0 %
Mehlkorngehalt	577 kg/m ³	644 kg/m ³	580 kg/m ³	600 kg/m ³	620 kg/m ³
Fließmaß	FM _{10min} =72 FM _{225min} =63	FM _{10min} =66 FM _{90min} =68	FM _{10min} =68 FM _{90min} =58	FM _{10min} =62 FM _{90min} =68	FM _{10min} =71 FM _{165min} =58
Druckfestigkeit	72 MPa	61 MPa	58 MPa	51 MPa	80 MPa

Tabelle 1 Kennwerte von Vergussbetonen unterschiedlicher Baustellen

4.4 Auswertung der Konformitätsprüfungen von Vergussbeton

In den folgenden Tabellen sind beispielhaft die Kennwerte des Frisch- und Festbetons aus der Konformitätsprüfung von drei Baustellen ausgewertet. Bei den Baustellen 1 und 2 wurde der Beton gleisgebunden in den Tunnel transportiert und zur Einbaustelle gepumpt, auf der Baustelle 3 wurde der Beton mit dem Fahrmischer direkt zur Einbaustelle gefahren und mittels Rutsche in die Einfüllöffnung der GTP transportiert. Auf den Baustellen 1 und 2 war aufgrund fehlender Möglichkeit den Beton im Tunnel aufzumischen eine Konsistenzanpassung durch Nachdosieren von Fließmittel nicht möglich. Auf der Baustelle 3 wurde jedes Fahrzeug vor der Entleerung überprüft und die Konsistenz erforderlichenfalls durch die Zugabe von Fließmittel korrigiert. Der zusätzlich statistisch ermittelte Vertrauensbereich gibt an in welchem Bereich die Kennwerte von 95% des Betons liegen.

	Baustelle 1		Baustelle 2		Baustelle 3
Prüfort	Werk	Einbaustelle	Werk	Einbaustelle	Einbaustelle
Anzahl	396	201	273	969	48
MW	1,5 %	1,6 %	2,3 %	2,1 %	4,6 %
Min	0,2 %	0,3 %	1,1 %	0,8 %	3,9 %
Max	3,2 %	3,7 %	3,3 %	3,3 %	5,8 %
Stabw.	0,50 %	0,60 %	0,41 %	0,46 %	0,61 %
Vertrauensbereich	0,5–2,5 %	0,4–2,8 %	1,5–3,1 %	1,2–3,0 %	3,4–5,8 %

Tabelle 2 Konformitätsprüfung für den Luftporengehalt des Frischbetons

Die Luftporengehalte schwanken nur in einem engen Bereich. Veränderungen zwischen der Prüfung im Werk und auf der Einbaustelle sind unwesentlich.

	Baustelle 1		Baustelle 2		Baustelle 3
Prüfort	Werk	Einbaustelle	Werk	Einbaustelle	Einbaustelle
Anzahl	430	183	292	973	62
MW	68 cm	73 cm	62 cm	63 cm	63 cm
Min	55 cm	60 cm	54 cm	55* cm	58 cm
Max	78 cm	81 cm	72 cm	71	66 cm
Stabw.	4,6 cm	3,4 cm	3,1 cm	2,2 cm	1,9 cm
Vertrauensbereich	59–77 cm	66–80 cm	56–68 cm	59–67 cm	59–67 cm

Tabelle 3 Konformitätsprüfung für das Fließmaß von Vergussbeton

Die Fließmaße streuen bei der Prüfung im Werk wesentlich weiter als an der Einbaustelle. Bei der Baustelle 1 wurde ein Fließmittel verwendet, dass eine deutliche Nachverflüssigung aufweist. Die Baustelle 1 weist eine deutlich weichere Betonkonsistenz und eine erheblich größere Streubreite der Fließmaße gegenüber den Baustellen 2 und 3 auf.

Auf der Baustelle 1 wurden beim Einbau des Vergussbetons phasenweise Anzeichen der Entmischung am Frischbeton festgestellt. An diesen Stellen wurden nachträglich eine erhebliche Anzahl von GTP abgehoben und mehrfach eine nicht entsprechende Vergussbetonqualität festgestellt.

	Baustelle 1		Baustelle 2		Baustelle 3
Prüfort	Werk	Einbaustelle	Werk	Einbaustelle	Einbaustelle
Anzahl	424	4	213	53	47
MW	204 l/m ³	205 l/m ³	201 l/m ³	202 l/m ³	194 l/m ³
Min	184 l/m ³	203 l/m ³	189 l/m ³	197 l/m ³	184 l/m ³
Max	226 l/m ³	211 l/m ³	210 l/m ³	207 l/m ³	203 l/m ³
Stabw.	5,5 l/m ³	3,5 l/m ³	3,8 l/m ³	2,6 l/m ³	4,0 l/m ³
Vertrauensbereich	193–215 l/m ³	197–213 l/m ³	193–208 l/m ³	197–207 l/m ³	186–202 l/m ³

Tabelle 4 Konformitätsprüfung für den Wassergehalt

Die Streuung des Wassergehaltes liegt im für Mikroprozessor gesteuerte Mischanlagen üblichen Bereich von unter $\pm 10 \text{ l/m}^3$.

	Baustelle 1	Baustelle 2	Baustelle 3
Anzahl	88	82	41
MW	63	70	71
Min	53	48	68
Max	75	87	75
Stabw.	4,7	8,3	1,6
$f_{ck,cube}^*$	52	53	68,8
$f_{ck,cube}$	48	49	63

*Lagerung gemäß ÖNORM B 4710-3 (Trockenlagerung ab 7 Tage)

Tabelle 5 Konformitätsprüfung für die Druckfestigkeit in N/mm^2

Die erreichte Betondruckfestigkeit liegt weit über dem geforderten Wert für $f_{ck,cube}$ von 30 N/mm^2 für die Druckfestigkeitsklasse C25/30. Tatsächlich erreicht wurde zumindest die Festigkeitsklasse C 35/45.

Das Erreichen der Anforderungen an die Festbetonkennwerte stellt für den Vergussbeton keine wesentliche Herausforderung dar.

4.5 Verbesserung der Beurteilbarkeit von Vergussbeton

Die Anforderungen an den Vergussbeton sind von der Art des Betoneinbaues und den konstruktiv erforderlichen Gegebenheiten vorgegeben. Die Eigenschaften des Vergussbetons, insbesondere die Frischbetoneigenschaften, sind von den Betonausgangsstoffen und der Betonzusammensetzung abhängig. Das Zusammenspiel ist sehr komplex, insbesondere, da die normgemäßen Prüfverfahren die geforderten Frischbetoneigenschaften nicht ausreichend beschreiben.

Die Überprüfung von Gussbetonqualität durch die Herstellung von Probefeldern kann dies zwar kompensieren, ist aber sehr kostenintensiv und lässt daher nur eingeschränkt eine Variation einzelner Parameter zu.

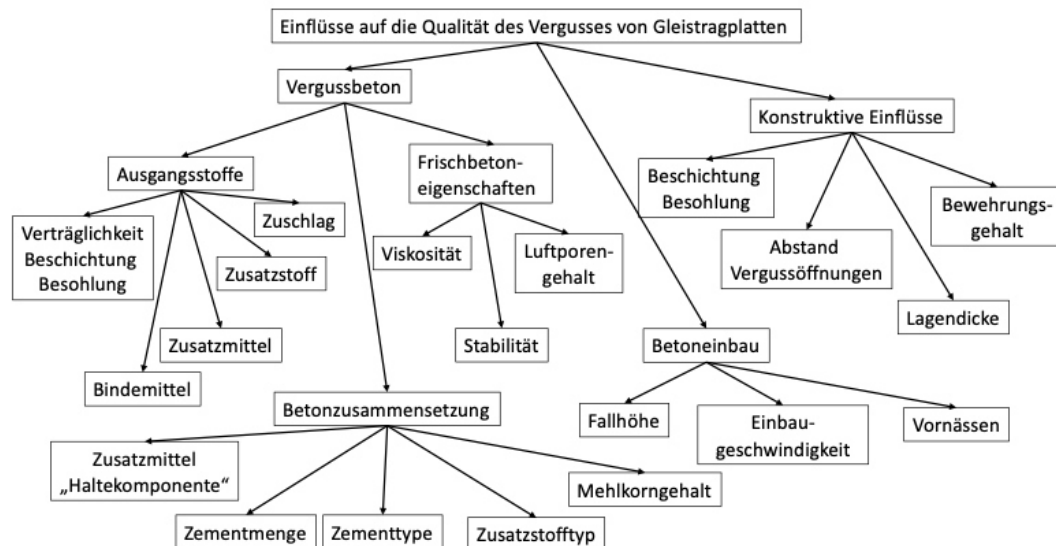


Abbildung 7 Einflussgrößen für die Qualität des Vergusses

Zur besseren Beurteilung der Eignung von Vergussbeton wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes der ÖBB Untersuchungen des Frischbetons mit alternativen, weniger kostenintensiven Beurteilungsmethoden durchgeführt. Die verwendeten gebräuchlichen Methoden für die Prüfung von SSC-Beton wie Trichter-Auslaufversuch oder Siebtest zeigten keine verwertbaren Ergebnisse, da kein Zusammenhang mit der Qualität der Betonoberflächen der Versuchsfelder gefunden wurde. Es war daher die Entwicklung eines gesonderten Versuchs erforderlich.

4.5.1 Modifizierter L-Box Versuch

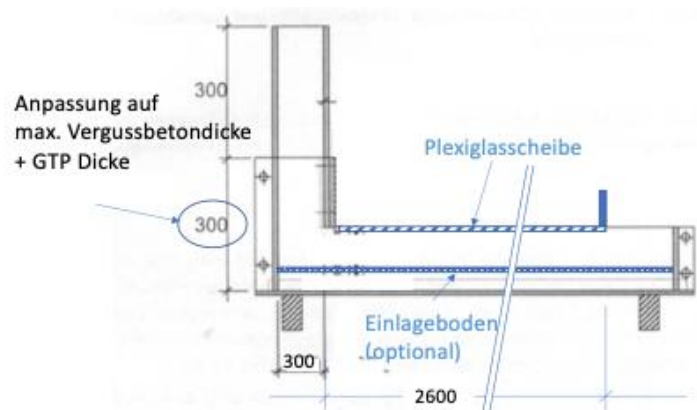


Abbildung 8 Modifizierte L-Box zur Beurteilung der Eignung von Vergussbeton

Die Versuchsanordnung wurde auf der Basis eines bestehenden Versuches zur Bestimmung der Fließfähigkeit von SCC-Beton bei vorhandenen Störkörpern (L-Box-Versuch) für die Beurteilung des Vergussbetons entsprechend modifiziert, um die Anforderungen des Einbaues des Vergussbetons unter der GTP zu simulieren.

Bei der Herstellung des Probekörpers sind der Betontransport und die Einbaugegebenheiten bei der Ausführung zu simulieren. Dies betrifft insbesondere die Transportdauer und die Art des Transportes des Betons zur Einbaustelle (Rutsche bzw. Pumpe und Pumplänge).



Abbildung 9 Positive Prüfergebnisse im modifizierten L-Box Versuch (links) und im Vergleich dazu das Ergebnis am Probefeld

Dieses Prüfverfahren hat sich als geeignet zur Beurteilung der von Vergussbeton gezeigt. Parallelversuche mit hergestellten Probefeldern zeigte eine gute Korrelation. Der Versuchsergebnisse.

**GENERALPLANUNG
BAUÜBERWACHUNG
ASSET MANAGEMENT
TRAGWERKSPLANUNG
PROJEKTMANAGEMENT
KLIMASCHUTZPLANUNG
INFRASTRUKTURPLANUNG
BEGLEITENDE KONTROLLE
FORSCHUNG & ENTWICKLUNG
SACHVERSTÄNDIGENTÄTIGKEIT
STATISCH-KONSTRUKTIVE PRÜFUNG
ÖKOBILANZ & KREISLAUFWIRTSCHAFT**

FCP

IDEEN WERDEN WIRKLICHKEIT



VCE

Supports Your Project



- DIGITAL ENGINEERING
- OFFSHORE STRUCTURES
- INFRASTRUCTURE DESIGN
- STRUCTURAL HEALTH MONITORING
- STRUCTURAL ENGINEERING
- CONSTRUCTION PROCESS MANAGEMENT
- ENVIRONMENTAL CONSULTING

DOI 10.3217/978-3-99161-065-6-005

CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Diese CC-Lizenz gilt nicht für Materialien von Dritten und anderweitig gekennzeichnete Inhalte.

5

Der Koralmtunnel – eine logistische Herausforderung

DI (FH) Günther Klinger (Wien), M.Eng. Steffen Zanner (Wien)

Für die Realisierung der Festen Fahrbahn und der bahntechnischen Ausstattung im 33 km langen Koralmtunnel bestand die logistische Herausforderung darin einerseits im Zuge der Errichtung der Festen Fahrbahn großen Materialmengen in kurzer Zeit in den Tunnel einzufahren und andererseits im Zuge der bahntechnischen Ausstattung viele unterschiedliche Komponenten zeitgleich an unterschiedlichen Einbaustellen im Tunnel zu verteilen. Unter Verwendung maßgeschneiderter Geräte- und Softwaresysteme konnten diese logistischen Herausforderungen beherrscht werden und somit ein wichtiger Teil zur Fertigstellung des Jahrhundertprojektes Koralmtunnel beigetragen werden.

5.1 Einleitung

Der Koralmtunnel mit einer Länge von rund 33 km ist das zentrale Bauwerk der neuen 127 km langen Hochleistungsstrecke zwischen Graz und Klagenfurt. Für die Realisierung der Tunnelausrüstung wurden 2 Arbeitsgemeinschaften (ARGE), jeweils mit Porr Bau GmbH als ARGE-Partner, beauftragt:

- I Die ARGE Feste Fahrbahn Koralmtunnel für die Errichtung der Festen Fahrbahn und der Randwege und Bankette im Tunnel, sowie bauliche Maßnahmen im Bereich der beiden Tunnelportale.
- I Die ARGE Bahntechnische Ausstattung Koralm für die bahntechnische Ausrüstung inklusive Energieversorgung, Telekommunikation, Sicherungsanlagen und maschineller Einrichtungen.

Die Versorgung des Koralmtunnel musste schienengebunden erfolgen. Somit stellte die Erarbeitung und Umsetzung eines schienengebundenen Logistikkonzepts für die beiden Bauaufträge, unter Berücksichtigung der großen Materialmengen, der beengten Platzverhältnisse im Tunnel, der sicherheitsrelevanten Aspekte und der langen Bauzeit von rund 5 Jahren, ein kritischer Erfolgsfaktor dar.

Die schienengebundene Andienung des Tunnels hatte über die beiden Baustelleneinrichtungsflächen „BE Ost“ in Wettmannstätten (Steiermark) und „BE West“ in Mitterpichling (Kärnten) zu erfolgen, wobei 85 % der Material- und Gerätetransporte von der Baustelleneinrichtungsfläche „BE Ost“ in Wettmannstätten abgewickelt wurden. Diese waren rund 10 km vom östlichen Tunnelportal entfernt.



Abbildung 1 Luftbildaufnahme BE Ost mit einer Fläche von 25.000 m²

5.2 Logistik für die Errichtung der Festen Fahrbahn und Randwege

5.2.1 Leistungsumfang und logistische Rahmenbedingungen

Die ARGE Feste Fahrbahn Koralmtunnel war von Mai 2021 bis Juli 2023 mit der Errichtung von ca. 66 km Fester Fahrbahn sowie zugehörige Randwege / Bankette im Tunnel tätig.

Um einen Eindruck zu vermitteln, welche Materialmengen hierzu in den Tunnel transportiert werden mussten, nachfolgenden einige Kennzahlen:

- I ca. 132 km Schienen UIC 60 (60E1) (Gesamtgewicht 8.000 t)
- I ca. 12.700 Gleistragplatten (GTP) a 5 t (Gesamtgewicht 65.500 t)
- I ca. 40.000 m³ Vergussbeton (Gesamtgewicht 96.000 t)
- I ca. 140.000 m³ Beton für Randweg / Bankett (Gesamtgewicht 336.000 t)
- I ca. 1.000 km Kabelschutzrohre, die in den Randwegen verbaut wurden

5.2.2 Baulogistische Herausforderungen für die Feste Fahrbahn

Aus logistischer Sicht bedeutete dies hohe Massenströme an GTPs, Schienen, Einbauteilen und insbesondere Beton, die über die beiden Portale in die beiden Tunnelröhren eingebracht werden mussten. Beispielsweise waren an einem Arbeitstag 500 m³ Frischbeton in den Tunnel einzubringen. Dafür waren 20 Betontransportwaggons mit einem Fassungsvermögen von je 15 m³ sowie 6 schienengebundene Zugfahrzeuge auf der Baustelle notwendig, um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Um die hohe Anzahl der täglich erforderlichen Zugfahrten umzusetzen, waren exakte Abstimmungen der täglich benötigten Transporte und der Transportreihenfolge erforderlich.

Die logistischen Herausforderungen dieses Projekts waren vielschichtig und erforderten ein hohes Maß an Planung, Koordination und Anpassungsfähigkeit. Eine zentrale Herausforderung stellte die hohe Komplexität der Abläufe dar, da zahlreiche beteiligte Gewerke mit unterschiedlichen Arbeitsweisen eingebunden waren. Zudem bestanden enge Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Einbauprozessen, wie etwa der Betonage, der Verlegung der GTP sowie der Herstellung der Randwege und Bankette. Diese Rahmenbedingungen machten eine präzise abgestimmte zeitliche und räumliche Planung erforderlich, um gegenseitige Behinderungen zu vermeiden und einen kontinuierlichen Baufortschritt sicherzustellen.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt betraf die Sicherheit und das Risikomanagement. Die Arbeiten fanden im Tunnel statt und waren daher in besonderem Maße arbeitssicherheitsrelevant. Sämtliche Transporte und Bauaktivitäten mussten konsequent mit den geltenden Rettungskonzepten, definierten Fluchtwegen sowie festgelegten Sperrbereichen koordiniert werden, um die Sicherheit aller Beteiligten jederzeit gewährleisten zu können.

Darüber hinaus stellten technologische Neuerungen eine zusätzliche Herausforderung dar. Im Rahmen des Projekts wurden neue Maschinen und digitale Systeme eingeführt, deren erfolgreiche Anwendung nicht nur eine technische Implementierung, sondern auch ein wirksames Change Management erforderte. Die beteiligten Teams mussten im Umgang mit den neuen Technologien geschult werden und diese in ihre bestehenden Arbeitsprozesse integrieren, was eine gezielte Begleitung und Akzeptanzförderung notwendig machte.

5.2.3 Digitale Integration der Logistik für die Feste Fahrbahn

Die Logistik der Festen Fahrbahn war in ein übergreifendes Konzept „Effiziente Prozesse durch digitale Integration“ eingebettet. Dieses Modell umfasst die Phasen Planung & Vorbereitung, Baustellenlogistik, Einbau & Montage sowie Entsorgungslogistik.

Für die Feste Fahrbahn lassen sich logistische Themen hervorheben, die zur erfolgreichen Projektabwicklung entscheidend waren. Diese sind in den nachstehenden beiden Kapiteln angeführt und erläutert.

5.2.3.1 Mission Control / Leitstand

Mit Mission Control / Leitstand ist die Einrichtung einer zentralen Leitstelle zur digitalen Steuerung sowie zur kontinuierlichen Überwachung der Logistik- und Sicherheitsprozesse auf der Baustelle in Echtzeit gemeint. In diesem Leitstand erfolgte die Visualisierung und Überwachung der Gleisanlagen, der Fahrwege von Baustellenzüge sowie der aktuellen Fahrzeugpositionen. Durch die systematische Erfassung und Auswertung der Logistikdaten in Echtzeit konnten Material- und Personentransporte effizient aufeinander abgestimmt werden. Gleichzeitig trug die verbesserte Übersicht über alle Bewegungen im Baustellenbereich sowie die eindeutige Zuweisung von Fahrwegen maßgeblich zur Erhöhung der Arbeitssicherheit bei.

5.2.3.2 Innovative Fahrzeuge und Geräte

Um die terminlichen und technischen Anforderungen des Projektes zu erfüllen, wurden so weit als möglich am Markt verfügbare schienengebundene Geräte, wie Zweiwege-Traktionsfahrzeuge, Lokomotiven, Betonzüge, außenluftunabhängige Rettungszüge oder Kräne auf Flachwagen eingesetzt. Jedoch war es auch notwendig maßgeschneiderte Maschinenlösungen für die Baustelle zu entwickeln. Dabei wurde ein Portalkran mit Dualfahrwerk, welcher 3 Stück Gleistragplatten mit einem Hub manipulieren konnte entwickelt. Auch eine ferngesteuerte, schleppbare, schienengebundene Selbstfahreinheiten für sehr langsame Arbeitsgeschwindigkeiten bei hoher Zugkraft wurde realisiert, sowie eine schienengebundene Reinigungseinheit für die Tunneltrockenreinigung.



Abbildung 2 Reinigungszug für Tunneltrockenreinigung

Zusammenfassend war die Logistik der Festen Fahrbahn als digital gesteuertes, hochgradig koordiniertes System organisiert, bei dem Materialflüsse, Sicherheit und Bauablauf eng miteinander verzahnt waren. Unter Einsatz von altbewährten und neu entwickelten Geräten konnte dies umgesetzt werden.

5.3 Logistik für die bahntechnische Ausstattung

Die Logistik stellte auch für die bahntechnischen Ausstattung ein zentrales Schlüsselement für die termingerechte und qualitätsgerechte Ausführung der beauftragten Leistungen dar. Die ARGE Bahntechnische Ausstattung Koralalm war im Zeitraum vom Mai 2023 bis November 2025 operativ im Koralmtunnel tätig.

Die zu erbringenden Leistungen sind nachstehend zusammengefasst:

- I BIM- und Planungsleistungen
- I Kabelbauleistungen (110 kV, Mittel- und Niederspannung, 50 Hz-Kabel – zusammen rund 1.200 km)
- I Montage von Strahlerkabel (ca. 264 km)
- I Verlegen von Lichtwellenleiter (LWL)
- I Energietechnik in 69 Querschlägen und der Nothaltestelle
- I Telekommunikations- und Sicherungstechnik
- I Maschinelle Anlagen (u. a. Lüftung, Klimatisierung, Hochdruckwassernebelanlagen, Löschwassersysteme)
- I Kernbohrungen, Doppelbodensysteme, Türen und weitere bauliche Ausstattungselemente

Die unterschiedlichen Gewerke arbeiteten zeitgleich über den gesamten, 33 km langen Tunnel verteilt. Ein besonderer logistischer Schwerpunkt war die Ausstattung der Tunnelquerschläge sowie der Nothaltestelle. Die logistische Herausforderung bestand dabei weniger in großen Massenströmen einzelner Materialien, sondern in der hohen Anzahl unter-

schiedlicher Bauteile und Kabel sowie der engen Verzahnung zahlreicher Gewerke auf begrenztem Raum. Hinzu kamen nacheinander und voneinander abhängige getaktete Abläufe, die eine präzise Planung, Abstimmung und Steuerung der Logistikprozesse erforderlich machten.

5.3.1 Logistik in den Querschlägen und Technikräumen

Insgesamt wurden über 130 Bauteile je Querschlag und mehr als 8.500 Bauteile im gesamten Tunnelbauwerk installiert. Um diese Komponenten strukturiert, sicher und nachvollziehbar in den Tunnel einbringen zu können, wurde ein mehrstufiges Logistikkonzept entwickelt, das auf den vier Säulen Lagerplatzverwaltung, Digital LEAN, Analyse und Visualisierung und Transportwesen basierte.

5.3.1.1 Lagerplatzverwaltung

Aufgrund der äußerst begrenzten Lagerflächen sowohl am Tunnelportal als auch im Tunnel selbst wurde frühzeitig die Notwendigkeit einer systematischen Lagerplatzverwaltung identifiziert. Die zeitgleiche Versorgung der unterschiedlichen Gewerke im Tunnel erforderte eine klare, digitale Abbildung der erforderlichen Materialflüsse. Hierzu wurden auf Basis der Microsoft-PowerApps-Technologie eigene Applikationen entwickelt, mit denen der gesamte Baustellenlebenszyklus der Bauteile, von der Anlieferung bis zur Installation, abgebildet wurde. Die Prozesskette ist nachstehend erläutert.

Die Prozesskette setzt sich aus dem Eingang, Einlagern, Kommissionieren, Transport und Auslagern zusammen. In Abbildung 3 ist die Oberfläche der Lagerverwaltungsapp dargestellt. Der Lagerist erfasste dabei ankommende Elemente mittels QR-Code und ordnete sie digital einem konkreten Lagerplatz zu. Die Logistiker*Innen planten in einer separaten App die erforderlichen Lieferungen in den Tunnel. Der Lagerist arbeitete anhand eines täglichen, digital bereitgestellten Beladeplans die Verladung ab. Die Zugführer*Innen buchten die transportierten Elemente an den jeweiligen Einbauorten im Tunnel wieder aus.

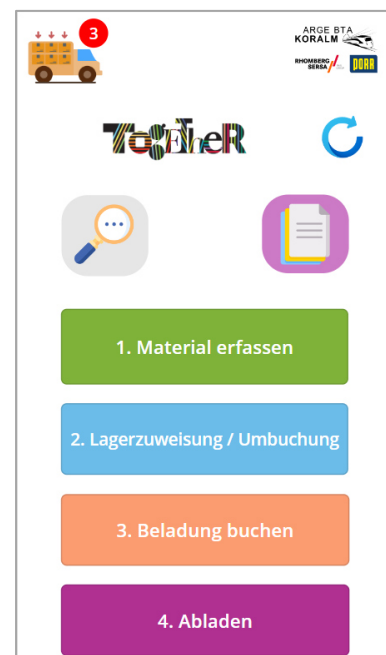


Abbildung 3 Oberfläche der Lagerverwaltungsapp für den Lagerist

Für die Baustelle ergaben sich daraus organisatorische und logistische Maßnahmen. Materialien, wie Kabel, Schaltschränke, Ventilatoren, Rohrleitungen, Armaturen sowie Doppelbodenelemente wurden vorgelagert, eindeutig gekennzeichnet und den jeweiligen Lagerplätzen digital zugeordnet. Die Kommissionierung für einzelne Querschläge und Technik-

räume erfolgte digital unterstützt, sodass die jeweils benötigten Komponenten termingerecht und bedarfsgerecht zur Verfügung standen. Die Transporte in den Tunnel wurden sowohl inhaltlich als auch zeitlich mit der „Mission Control“ (Leitstand) sowie mit den Wochenprogrammen der Digital-LEAN-Struktur abgestimmt und dadurch systematisch in den Gesamtbauablauf integriert.

Diese strukturierte Lagerplatzverwaltung ermöglichte eine hohe Transparenz über den Materialbestand, reduzierte Such- und Wartezeiten und trug entscheidend zur Verringerung von Fehlanlieferungen bei.

5.3.1.2 Digital LEAN

Die Koordination der einzelnen Gewerke und die Abstimmung mit dem Auftraggeber waren ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Umsetzung des Projektes. Hierzu wurde eine an die Projektanforderungen angepasste LEAN-Methodik in Kombination mit eigens entwickelter Software eingesetzt.

Mit dieser Software konnten die einzelnen Gewerke ihre geplanten Leistungen im Tunnel eigenständig anmelden, den Abruf der für sie eingelagerten Einbauelemente auslösen und Einbauorte und -zeiten transparent darstellen. Auf Basis einer visuellen Darstellung wurden mögliche Überschneidungen frühzeitig identifiziert, Abläufe optimiert und die Reihenfolge der Tätigkeiten abgestimmt.

5.3.1.3 Analyse und Visualisierung

Zur datenbasierten Steuerung der Logistik und des Bauablauf wurde auf Basis der in der Lagerplatzverwaltung und dem digitalen Leitstand erzeugten Prozessdaten eine Auswertung aufgebaut. Ziel war es, jederzeit belastbare Aussagen über Lagerstände, Engpässe und Logistikkennzahlen ableiten zu können.

Hierzu wurden Power BI-Dashboards entwickelt, die zentrale Kennzahlen transparent und rollenspezifisch bereitstellten. Logistikkennzahlen wie Zugfahrdaten oder Lagerdatenanalysen wie Bestände, Umschlag, Artikelnachverfolgungen wurden beispielsweise dargestellt.

Durch die Verknüpfung von Materialstatus (Lagerplatzverwaltung) und Echtzeit-Umsetzung (Leitstand) entstand ein konsistentes Lagebild. In Kombination mit der Planung (Digital LEAN) konnten Abweichungen frühzeitig sichtbar gemacht werden, Priorisierungen unterstützt und die Stabilität der Bauabwicklung durch fundierte Entscheidungen deutlich erhöht werden.

Der digitale Leitstand fungierte damit auch als zentrale Steuerungs- und Überwachungsinstanz für sämtliche logistischen Bewegungen im Tunnel und bildete die Schnittstelle zwischen Planung (Digital LEAN), Lagerplatzverwaltung und tatsächlicher Ausführung.

5.3.1.4 Transportwesen

Das Transportwesen stellte die operative Umsetzung der im LEAN-Prozess und im Leitstand geplanten Abläufe sicher. Die Transporte – sowohl für Personal als auch für Material – wurden in fest definierten Zeitfenstern und nach einem abgestimmten Fahrplan durchgeführt.

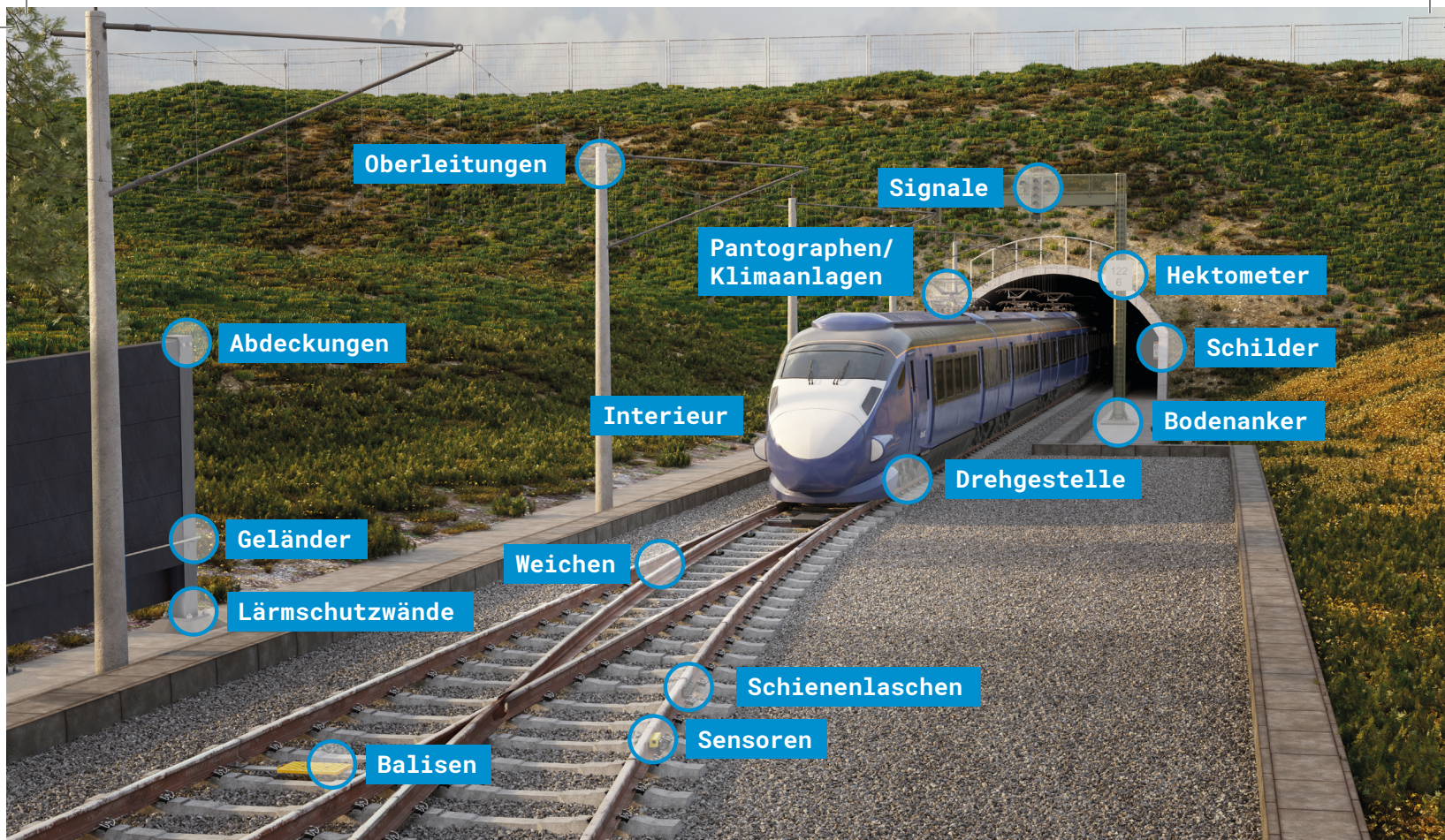
Die wesentlichen Elemente des Transportkonzeptes umfassten den Einsatz klar definierter Zug- und Transportkapazitäten für unterschiedliche Materialarten (wie bspw. Kabeltrommeln, Schaltschränke oder sperrige Anlagenteile) wobei hierfür eigens konzipierte Waggonaufbauten und entsprechende Erweiterungen verwendet wurden. Darüber hinaus erfolgte eine gezielte Bündelung der Lieferungen nach Querschlag, Bauabschnitt und Gewerk. Die Transportfahrten wurden eng mit den geplanten Montage- und Installationsarbeiten abgestimmt. Zugleich wurden die geltenden Sicherheitsanforderungen konsequent berücksichtigt, insbesondere im Hinblick auf die Freihaltung und Nutzbarkeit von Flucht- und Rettungswegen.

Durch die Kombination aus digitaler Lagerplatzverwaltung, LEAN-basierter Ablaufplanung, digitalem Leitstand und einem strukturierten Transportwesen konnte ein durchgängiger, transparenter und effizient steuerbarer Logistikprozess geschaffen werden, der maßgeblich zur erfolgreichen Umsetzung der bahntechnischen Ausstattung beitrug.

5.4 Schlussbemerkung

Die Logistik für die Errichtung der Feste Fahrbahn Koralalm und Bahntechnische Ausstattung im Koralmtunnel zeichnete sich durch die folglich drei genannten zentralen Merkmale aus:

- I Die ganzheitliche Betrachtung der Logistik: Die Logistik wurde nicht nur als Transport, sondern als integraler Bestandteil des Projektmanagements verstanden.
- I Der hohe Digitalisierungsgrad: Mit Mission Control, Digital Lean, Lagerplatzverwaltung und Data-Intelligence-Anwendungen wurde der Material- und Informationsfluss durchgehend digital erfasst. Dies schaffte Transparenz und bildete die Grundlage für vorausschauende Entscheidungen.
- I Die projektweite Standardisierung bei gleichzeitiger Spezialisierung: Die gleichen digitalen und organisatorischen Prinzipien galten für beide Bauaufträge, wurden aber jeweils auf die spezifischen Anforderungen der Festen Fahrbahn (massive, gleichförmige Materialflüsse) und der Bahntechnik (hohe Teilevielfalt, komplexe Einbausituationen) angepasst.



BEWÄHRT, ZUGELASSEN UND FREIGEgeben

Schraubensicherungen für das
Bauwesen und Bahnanwendungen



WEITERE INFORMATIONEN UND DOWNLOAD DER ZULASSUNGEN

Nur Nord-Lock Keilsicherungsscheiben haben eine
bauaufsichtliche Zulassung für alle gängigen Schraubenverbindungen im
Stahlbau und sichern diese zuverlässig gegen selbststätiges Lösen.

6

Die Brücken der Koralmbahn – technische, konstruktive Highlights

DI Julia Heidrich (Graz), DI Gerhard Oberlerchner und FH-Prof. Dr. Markus Vill (Wien)

Neben dem Herzstück des Koralmtunnels, der wohlgerneht sechstlängste Tunnel der Welt, sind Brücken das Gegenteil von Tunnelbauwerken und sowie jedes andere Infrastrukturbauperk ein wesentlicher Landmark – nachhaltig, tragfähig, gebrauchstauglich, betriebsicher. Es sind nicht zuletzt nur Bauwerke, die den statischen Erfordernissen genügen müssen, sondern passend in das Landschaftsbild zu integrieren sind. Während man bei Überschreiten von tiefen Tälern oftmals die Brückenhöhe nicht bemerkt, so ist jedoch die Herstellung von hohen Brücken eine der größten Herausforderungen in der Bautechnik. Ohne Brücken waren diese Hindernisse oftmals nur mit stundenlangen Ausweichrouten zu überwinden, heute können wir beispielsweise eine Brückenlänge bei der Jauntalbrücke mit 430 m bei 250 km/h in nur 7 Sekunden überqueren. So übernehmen wir, als Bauherrnvertreter:innen, Planer:innen oder Ausführende eine entscheidende gesellschaftliche Rolle, die hohe technische Kompetenz, Verantwortungsbewusstsein, gestalterisches Geschick und Managementfähigkeiten voraussetzt, denn Eisenbahnbrückentragwerke sind entgegen von Linienbauwerken immer Unikate oder Prototypen, die nur in den seltensten Fällen 1:1 duplizierbar sind.

Im Rahmen der Koralmbahn wurden von der Unterführung des Eggenberger Gürtels am HBF in Graz (GW1) [1] bis zum HBF in Klagenfurt mehr als 100 Brückentragwerke als Eisenbahn-, Straßen-, Begleitweg- oder Fußgängerbrücken errichtet worden. Betrachtet man die Streckenlänge abzüglich des Koralmtunnels mit rund 33 km und die weiteren Tunnelbauwerke im Granitztal, dem Hengsbergertunnel sowie diversen Unterführungsbauwerken

unter der Autobahn in Weitendorf oder der Flughafentunnel in Graz, so befinden sich pro Bahnkilometer durchschnittlich ein bis zwei Brückentragwerke, die die Koralmbahn von Graz nach Klagenfurt verbinden.

6.1 Anforderungen an nachhaltige Brückenbauwerke für Hochleistungsstrecken

Vergleicht man herkömmliche Brückenbauwerke im Straßennetz oder auf Nebenstrecken der Bahn, so unterscheiden sich die Anforderungen bei Eisenbahnbrücken insofern, dass verstärkte Aspekte der Gebrauchstauglichkeit und Betriebssicherheit eingehalten werden müssen, um hohen Fahrkomfort und Grundlagen für die Fahrdynamik der Hochgeschwindigkeitszüge sicherzustellen. Das erfordert grundsätzlich die Einhaltung der Kriterien der Oberbauanforderungen und wird durch das Schwingungs- und Verformungsverhalten der Brücken erweitert. Grundlage hierfür bilden die Regelwerke der Technischen Spezifikationen für Interoperabilität (TSI) [2,3] die mit den Bemessungsgrundlagen der europäischen statisch konstruktiven Normen (Eurocodes) einzuhalten sind. In dem Zusammenhang sind insbesondere für Eisenbahnbrücken die Kriterien der Betriebssicherheit zu erfüllen, die nachfolgend angeführt sind:

- I Vertikale Verformung des Überbaus,
- I Verwindung des Überbaus,
- I Querverformungen und Querschwingungen des Überbaus,
- I Vertikale Beschleunigungen des Überbaus,
- I Verformungen an den Brückenenden.

Auf Basis der strikten Einhaltung dieser Kriterien, die bei Zugsüberfahrt von 250 km/h nur Verformungen von 1/1400 bis 1/2000 bezogen auf die Stützweite bei Geschwindigkeiten ermöglichen, werden die statischen Systeme, Querschnittsgeometrien und auch die Abmessungen der Bauwerke gewählt und haben grundsätzlich eine robuste Ausführung mit nicht allzu schlanker Bauform zur Folge.

6.1.1 Lebenszyklusorientiertes Planen, Bauen und Erhalten als strategisches Gesamtkonzept im Brückenbau

In dem Zusammenhang kommt allerdings auch der Aspekt der Nachhaltigkeit für dauerhafte, robuste Bauwerke speziell in den Fokus, ermöglicht somit aber gleichzeitig die Erzielung einer hohen Lebensdauer mit starkem Bezug auf geringe Lebenszykluskosten, geringe Instandhaltungsmaßnahmen und hohe Dauerhaftigkeit bzw. technische Lebensdauer. Lebenszyklusorientiertes Planen, Bauen und Erhalten sind somit zentrale strategische Konzepte, die zur Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung im Eisenbahnbrückenbau beitragen und in sämtliche Planungsgrundlagen der über 100 Brückenbauwerke eingeflossen sind.

Bei der Planung, dem Bau und der Erhaltung von Eisenbahnbrücken und anderen konstruktiven Ingenieurbauwerken ist ein lebenszyklusorientierter Ansatz von zentraler Bedeutung. Dieser Ansatz stellt sicher, dass Bauwerke nicht nur den aktuellen Anforderungen genügen, sondern auch langfristig leistungsfähig, sicher und wirtschaftlich betrieben werden können. Bereits in der frühen Planungsphase müssen daher jene Faktoren berücksichtigt werden, die Einfluss auf die Dauerhaftigkeit, Instandhaltungsfreundlichkeit und Betriebssicherheit des gesamten Bauwerks über seine gesamte Nutzungsdauer hinweg haben.

Ein wesentlicher Grundgedanke des lebenszyklusbasierten Planens ist die Verwendung dauerhafter, bewährter Materialien, deren Verhalten unter verschiedenen Umwelteinflüssen und Beanspruchungen bereits gut erprobt und vorhersehbar ist. Die Wahl geeigneter Materialien und die sorgfältige Dimensionierung sicherheitsrelevanter Komponenten tragen dazu bei, die Lebensdauer zu maximieren und zukünftige Instandhaltungsmaßnahmen zu minimieren.

Besondere Bedeutung kommt der Auswahl ausreichender Biegesteifigkeit sowie der Ausbildung schwingungsunempfindlicher Tragwerke zu. Da Eisenbahnbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, muss das statische System so gewählt werden, dass es keine unerwünschten Schwingungen oder Resonanzeffekte zulässt. Gleichzeitig sollte das Tragwerk robust gegenüber außergewöhnlichen Ereignissen sein und keine Tendenz zu sprödem oder schlagartigem Versagen aufweisen. Dies wird unter anderem durch den Einsatz struktureller Redundanzen erreicht, die es ermöglichen, dass einzelne Tragglieder ausfallen können, ohne die Gesamtstandsicherheit zu gefährden. Ein weiterer zentraler Aspekt ist die optimale Abstimmung des Bauwerks auf die Eigenschaften des Baugrunds. Die Interaktion zwischen Boden und Bauwerk beeinflusst wesentlich das Trag- und Verformungsverhalten und damit auch den Erhaltungszustand der Brücke, weshalb geotechnische Rahmenbedingungen bereits im Planungsprozess umfassend analysiert werden müssen.

Darüber hinaus muss das Tragwerk so gestaltet sein, dass es möglichst erhaltungsarm ist und der Einsatz nachhaltiger Baustoffe gefördert wird. Dies betrifft sowohl die konstruktive Gestaltung als auch die Anordnung von Bauteilen, die regelmäßiger Wartung unterliegen. Teile mit kürzerer Lebensdauer sollten möglichst einfach austauschbar sein, ohne umfangreiche Eingriffe in den Betrieb zu erfordern. Insbesondere bei Eisenbahnbrücken ist es entscheidend, dass Wartungs-, Instandsetzungs- und Austauschvorgänge unter Aufrechterhaltung des Bahnbetriebes möglich sind, sofern keine Umfahrungsmöglichkeiten existieren. Konstruktive Details und Bauabläufe müssen so geplant werden, dass sie praktisch umsetzbar sind und spätere Risiken oder Verzögerungen im Bauablauf reduziert werden. Wesentlich für die langfristige Funktionsfähigkeit eines Bauwerks ist zudem ein dauerhaft

funktionierendes, wartungsarmes Entwässerungssystem. Zusammenfassend zielt lebenszyklusorientiertes Planen darauf ab, technische, wirtschaftliche und betriebliche Anforderungen über die gesamte Lebensdauer eines Bauwerks hinweg optimal zu vereinen.

6.2 Die verschiedenen Brückentypen auf der Koralmbahn

Effizienter Brückenbau hängt neben der Erfassung des statischen Systems und der konstruktiven Anforderungen noch von vielen weiteren Kriterien ab, die vordergründig auch eine ausgewogene Lösung zwischen Kosteneffizienz in der Errichtungsphase und der Betriebsphase abbilden sollen. So steht die Qualität grundsätzlich im Vordergrund für niedrige Lebenszykluskosten sowie die Herstellungsmethode in Bezug auf die Bauverfahrenstechnik im Großbrückenbau also auch das Bauen unter Aufrechterhaltung des Betriebes.



Abbildung 1 Diverse integrale Rahmenbauwerke Koralmbahn, Graz Klagenfurt, Fotocredit: Vill [1]

Der Großteil der über 100 Brückenbauwerke besteht in diesem Zusammenhang aus integralen Bauwerken in Form von Rahmentragwerken aus Stahlbeton mit Stützweiten unter 20 m, die vielfach in Kombination mit Unterführungen von Straßen in Zusammenhang stehen (vgl. Abbildung 1). Für Großbrücken kamen in erster Linie dauerhafte Spannbetonbrücken als Hohlkästen mit oberliegendem Fahrbahndeck zur Ausführung. Bei dieser Methode entstehen geringe Errichtungskosten aufgrund der lokalen Verfügbarkeit des Baumaterials Beton. Zudem kann bei heutiger Ausführungsqualität auch mit den geringsten Erhaltungskosten gerechnet werden. Bei ungünstigen Feldlängen, Schwierigkeiten beim Bauen unter Betrieb, der Aufrechterhaltung des Straßenverkehrs und kurzen Bauzeiten wurden vielfach auch Stahl-, bzw. Stahlverbundtragwerke ausgeführt. In der nachfolgenden Zusammenstellung wird auf wenige spezielle Brückentypen und deren Herausforderung bei der Planung und beim Bau eingegangen.

6.2.1 Unterführung des Eggenberger Gürtels am Südkopf des Hauptbahnhofes Graz – GW1

Bauen unter Betrieb stellt eine der komplexesten täglichen Herausforderungen beim Bau von Eisenbahnbrücken dar und ist in vielen Fällen für den Bauablauf, das vorgesehene Bauverfahren und die Wahl des Konstruktionstyps samt Material entscheidend. So wären bei Stützweiten bis zu 25 m im Regelfall auch integrale Rahmentragwerke eine Lösungsvariante um erhaltungsintensive Lager und Fahrbahnübergangskonstruktionen vermeiden zu können.



Abbildung 2 Eggenberger Unterführung am Grazer Hauptbahnhof, Fotocredit Vill [1]

Bei der Eggenberger Unterführung im Hauptbahnhof Graz kamen genau diese Bedingungen auf Basis der vorhandenen Bauphasen der Herstellung des Bahnsteigdaches, der Gleisneulagen, der beiden Personentunnel und weiterer betrieblicher Einschränkungen zu tragen. Vorgespannte Plattentragwerke für zwei bis drei Gleise kamen hier zum Einsatz. Die Eggenberger Unterführung wurde mit 2+2 Fahrspuren und seitlichen Geh- und Radwegen mit einer Stützweite von rund 25 m in Gleissperren abschnittsweise unter Betrieb hergestellt. Die Plattenstärke beträgt nur 1,40 m und konnte durch Vorspannung erzielt werden.

6.2.2 Unterführungsbauwerke unter der A9 Pyhrnautobahn bei Weitendorf – FW12

Im weiteren Verlauf der Zulaufstrecke zum Ostportal des Koralmtunnels ist im Bereich von Weitendorf eine "schleifende" Unterquerung der A9 Pyhrnautobahn auf eine Länge von rund 800 m zuzüglich Wannenbauwerke ausgeführt worden. Die Komplexität des Bauwerks wurde durch Bauzustände im Bereich der Rampen der A9 Anschlussstelle Wildon sowie die Aufrechterhaltung der Landesstraße und der Richtungsfahrbahnen hervorgerufen. Weiterhin wurde das Bauwerk für die Brandbeanspruchung eines Hochtemperaturbrandes mit 1200°C (Schutzniveau 3.1) mit einer Standdauer von 180 min und einer Sicherungszeit von 60 min ausgelegt. Dazu wurde Faserbeton verwendet sowie eine Heißbemessung für diese außergewöhnlichen Lastsituationen durchgeführt.

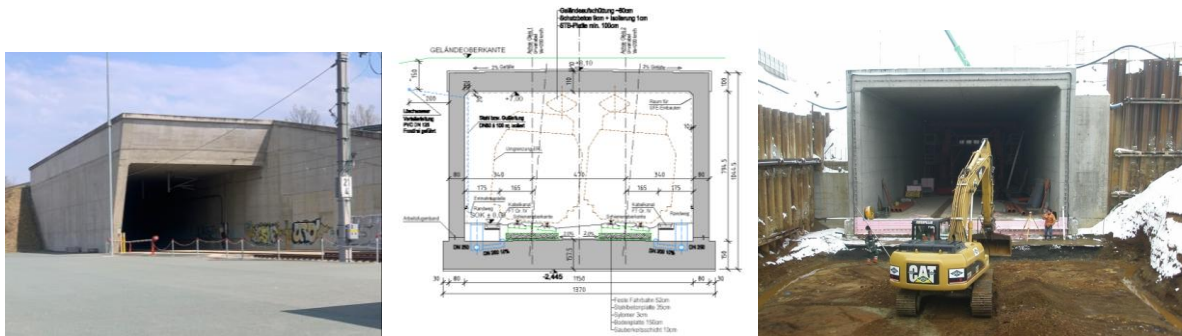


Abbildung 3 Unterföhrungsbauwerk A9, Weitendorf FW2, Fotocredit: Vill 0

6.2.3 Spannbeconbrücke über die Kainach – FW13

Im weiteren Streckenverlauf vor dem Hengsbergttunnel, welcher sowohl in offener Bauweise, Deckelbauweise als auch geschlossener Tunnelbauweise errichtet wurde, kam eine gemäß den Robustheitskriterien der Richtlinien der ÖBB-Infrastruktur AG eine 115 m lange vorgespannte Brücke zur Ausführung. Die Brücke überspannt die Kainach sowie die begleitenden Retentionsflächen und wurde aufgrund der Verbesserung der hydrologischen Anforderungen mit elliptisch geformten Pfeilergeometrien für den Hochwasserabfluss ausgebildet und architektonisch gestaltet. Die zwei vorgespannten Hohlkästen können getrennt voneinander instandgesetzt und ggf. auch unter Aufrechterhaltung des Betriebes in der Zukunft nach Ende der Lebensdauer erneuert werden. Die Kainachbrücke wurde auf klassischem Lehrgerüst mit Rüstträgern im Bereich der Kainach hergestellt.



Abbildung 4 Spannbeconbrücke über die Kainach FW13, Fotocredit: Vill [4]

6.2.4 Wildquerung WA9 bei Krottendorf an der Laßnitz

Im Bereich des Bahnhofes Weststeiermark wurde eine Wildbrücke mit seitlich freiem Streckenprofil und einer Stützweite von ca. 45 m hergestellt. Das in Gleisrichtung ca. 50 m lange Tragwerk wurde je Widerlager auf zweireihigen Großbohrpfählen gegründet. Die Herstellung erfolgte über drei Betonierabschnitte auf Lehrgerüst. Die Schalenstärke des Bogens beträgt im Scheitelbereich ca. 1,05 m und weitet sich zum Widerlager auf ca. 1,90 m auf. Der Vorteil des sehr breiten Querschnitts und die großzügige Freihaltung des Lichtraumes ist durch die aerodynamisch reduzierten Beanspruchungen gegeben.



Abbildung 6 Wildquerung bei Krottendorf an der Laßnitz, Fotocredit: Vill [4]

6.2.5 Jauntalbrücke über das Drautal bei Aich/ Bleiburg

Die Jauntalbrücke wurde als einzelliger, eingleisiger Stahlhohlkasten bereits zu Beginn der 1960er Jahre errichtet und hat eine Höhe von knapp 100 m über dem Flussbett. Die Gesamtlänge der Brücke beträgt rund 430 m mit Einzelstützweiten von etwa 78 bis 95 m. Sie ruht auf vier Betonpfeilern mit nach oben hin verjüngendem Querschnitt. Die Pfeiler sind auf Brunnen gegründet, im Bereich des Flussbettes wurde eine Senkkastengründung ausgeführt. Im Zuge des zweigleisigen Ausbaues wurden die Pfeiler und die Widerlager intensiv inspiziert, instandgesetzt und auf die neuen Anforderungen angepasst. Das neue Tragwerk ist als Verbundfachwerk mit oberliegender Fahrbahnplatte für zwei Gleise ausgeführt. Zwischen den Fachwerksebenen kann die Brücke als Geh- und Radweg genutzt werden. Die Besonderheit bei der Herstellung lag insofern darin, dass das neue Tragwerk mit dem alten Tragwerk verbunden wurde (vgl. Abbildung 7 rechts) und so materialeffizient ohne Vorbauschubel eingeschoben werden konnte. Das alte Tragwerk wurde nach dem Aus Schubvorgang zerkleinert und wurde einem Recyclingprozess zugeführt.

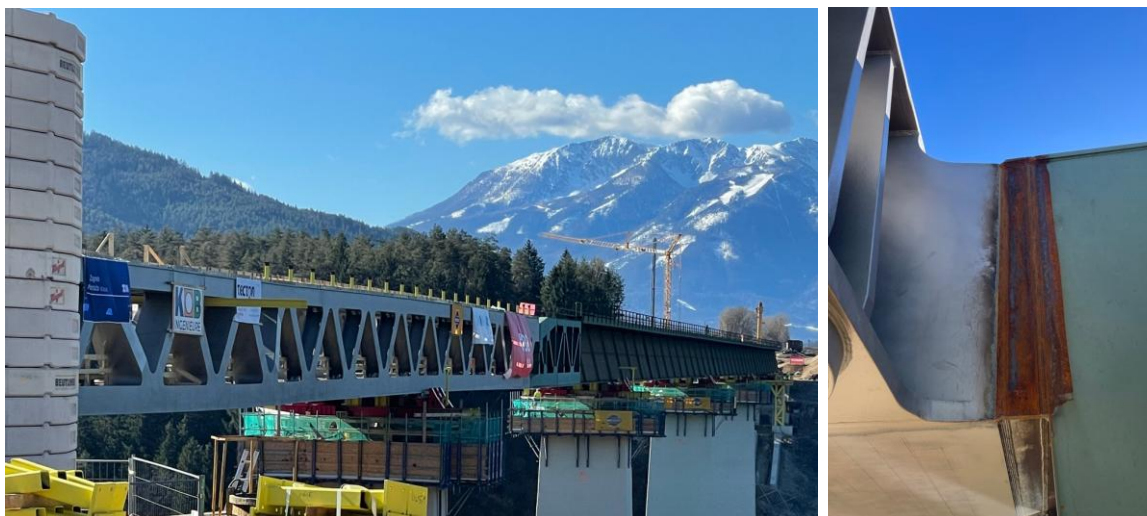


Abbildung 7 Neue und alte Jauntalbrücke beim Einschubvorgang mit Verbindungsstück bzw. Schweißnaht zwischen altem und neuem Tragwerk, Fotocredit: Vill [4]

6.2.6 Drauquerung über den Völkermarkter Stausee MA26

Die Drauquerung MA26 ist eine rund 600 m lange Spannbetonbrücke als zweigleisiger Hohlkasten und besteht aus vier Einzeltragwerken. Die Brücke befindet sich im Gleisbogen mit einem 3200 m Bogenradius und wurde im Taktschiebeverfahren bei konstanter Krümmung mit Einzelstützweiten von bis zu 70 m ohne Hilfsunterstützung erstellt. Der Hohlkastenträger hat eine Gesamthöhe von 4,74 m, eine Dicke der Fahrbahnplatte von 33 cm bis 42 cm und Stegdicken von 55 cm im Feldbereich (vgl. Abbildung 8).



Abbildung 8 Drauquerung über den Völkermarkter Stausee MA, Fotocredit: links: Revotec
zt gmbH und rechts: ZKP ZT-GmbH

6.3 Zusammenfassung

Die Herausforderungen der Eisenbahnbrücken auf der Koralmbahn haben sich durch viele Faktoren ergeben und spielten für Konzeptionierung auf Basis der Anforderungen für Hochgeschwindigkeitsstrecken, der örtlichen Gegebenheiten, des Bauverfahrens und unter den Aspekten einer hohen Lebensdauer mit großer Robustheit eine entscheidende Rolle. Weiterhin erfolgte der Entwurf der Brückenbauwerke auch unter der Berücksichtigung der Aspekte der leichten Inspizierbarkeit und Auswechselbarkeit von einzelnen Tragwerksteilen und trägt somit wesentlich zu einem modernen System Bahn bei.

Literatur

[1] Steiner, H., Vill, M., Pirker, A.: Die „Neuen“ Bahnbrückentragwerke der Eggenberger Unterführung am Grazer Hauptbahnhof, Buchpublikation Graz Hauptbahnhof 2020, 2015.

[2] VERORDNUNG (EU) Nr. 1302/2014 DER KOMMISSION vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1302>.

[3] VERORDNUNG (EU) Nr. 1299/2014 DER KOMMISSION vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union, <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1299>.

[4] Vill, M.: Eisenbahnbrücken im Zuge der Koralmbahn, Graz – Klagenfurt, Alumni Talks, TU Graz, 2008.

GEOCONSULT

CONSULTING ENGINEERS



WE **UNITE**
NATURE AND
TECHNOLOGY



HOHLRAUMBAU ▪ TUNNEL ▪ STRASSE ▪ EISENBAHN ▪ U-BAHN ▪ BERGBAU ▪ ENERGIE

Mit Innovationsgeist und 50 Jahren Erfahrung bietet GEOCONSULT bereichsübergreifende Ingenieurs- und Beratungsleistungen für Infrastrukturprojekte, von Untertage- und Tunnelbauwerken über Berg- und Naturgefahrenprojekte bis hin zu Straßen- und Schieneninfrastruktur.

Unsere Experten des Bauingenieurwesens, der Geologie und der Elektrotechnik unterstützen unsere Kunden in allen Projektphasen mit individuellen und nachhaltigen Lösungen in den Bereichen



VISION & VISUALISIERUNG



PLANUNG & BERATUNG



ENGINEERING & DESIGN



BAUMANAGEMENT



BETRIEB & INSTANDHALTUNG



SANIERUNG & RÜCKBAU

Geoconsult ZT GmbH

Wissenspark Salzburg Urstein

Urstein Süd 13 ▪ 5412 Puch ▪ Austria

office@geoconsult.com ▪ +43 662 65965 0

www.geoconsult.com



7

Koralmtunnel – Montage und technisch funktionale Abnahmeprüfung

Rudolf Wank (EUROPTEN), Ing. Sturzeis Wolfgang (Wien)

Die Koralmbahn und hierbei im Folgenden vor allem der Koralmtunnel stellt ein Jahrhundertprojekt dar, welches unter Beachtung der unterschiedlichsten Einflussfaktoren als technisch anspruchsvoll galt. Hierzu sei nur auszugsweise angeführt, dass es sich bei dem Koralmtunnel an sich um den längsten Eisenbahntunnel in Europa handelt, welcher mit einem durchgängigen Deckenstromschienensystem ausgerüstet ist. Dies ist unter anderem mit dem kleinen Querschnitt des Tunnels begründet, wodurch sich jedoch auch entsprechende aerodynamische Effekte ergeben, welche sich auf das Zusammenwirken Oberleitung-Stromabnehmer auswirken.

Im vorliegenden Fachbeitrag soll ein kurzer Einblick hierbei bezogen auf die Themenstellung der Montage und technisch funktionale Abnahmeprüfung, sowie Inbetriebnahme des Deckenstromschienensystems, gegeben werden.

7.1 Einleitung

Die Koralmbahn stellt ein Jahrhundertprojekt dar, welches neben der zu berücksichtigenden Bauzeit und den damit verbundenen technischen Entwicklungen und Neuerungen, als erster Tunnel in Europa unter den gegebenen Bedingungen und kleinen Tunnelquerschnitten ein durchgehendes Deckenstromschienensystem für den Geschwindigkeitsbereich von bis zu 250 km/h verbaut hat!

7.2 Montage

Gegenstand dieses Projekts ist die Elektrifizierung der Tunnelanlage Koralm und der Zulaufstrecken auf der steirischen wie auf der kärntnerischen Seite. Da die Ausrüstung gemäß Ausschreibungsunterlagen, in einem kurzen und sehr herausfordernden **Zeitfenster** ohne Partner nicht realisierbar war, wurde durch die beiden österreichischen Fahrleitungsmontagefirmen European Trans Energy GmbH (kurz EUROPTEN) und Rhomberg Sersa Rail Power GmbH die ARGE „ARGE KAT DSS“ (Abbildung 1) gegründet. Gemeinsam konnte das Projekt über einen Ausführungszeitraum von ca. 7 Monaten mit den hohen geforderten Qualitätsstandards fristgerecht umgesetzt werden.



Abbildung 1 Logo „ARGE KAT DSS“

Der Projektstart der Montagearbeiten war am 11.03.2025. Die folgenden im Vertrag definierten Zwischen- und Endtermine wurden seitens der ARGE KAT DSS fristgerecht eingehalten.

- I 01.10.2024: Abschluss Montagearbeiten Oberleitung,
Fertigstellung OL-Montagearbeiten Tunnel und Zulaufstrecke Ost
- I 06.12.2024: Abschluss Montagearbeiten Oberleitung,
Fertigstellung OL-Montagearbeiten Tunnel und Zulaufstrecke Ost und West
- I 13.12.2024: Start Inbetriebnahme,
Fertigstellung techn. Funktionale Abnahme ED21 und gem. Prüfheft
- I 01.02.2025: Endtermin Oberleitung,
Abschluss der Inbetriebnahme, Übergabe der Bestandsunterlagen

Die Oberleitungsanlage wurde am 13.02.2025 durch den Auftraggeber ÖBB übernommen. Zusatzarbeiten wurden hingegen noch bis Jahresende 2025 durchgeführt und fristgerecht abgeschlossen.

7.2.1 Baustellenabwicklung

Die erstmalige Schnittstelle zwischen Bau- und OL-Ausführungsfirma für das Deckenstromschienensystem war eine der nennenswerten Herausforderungen in diesem Projekt. Zwar wurde die ARGE KAT DSS für die Baubegleitung, zur Abstimmung und Koordinierung „Montage der Hängesäulen“ beauftragt, entstanden jedoch trotzdem erhebliche Schwierigkeiten. Seitens Baufirma wurden die Toleranzen gemäß Vorgabe ($\pm 1,5^\circ$) korrekt umgesetzt, diese waren jedoch für die Ausführung der Oberleitung teilweise zu große Ausführungstoleranzen, welche die anschließende Montage erheblich erschwerte. Im März 2024 erfolgte der Start der Oberleitungsmontage auf Gleis 1 und Gleis 2. Die Montage der bereitgestellten Deckenstromschienenkomponenten [DSS] wurde in einer Linienbaustelle geplant, musste aufgrund von Behinderungen jedoch teilweise adaptiert werden. Mit dieser Ausführungsmethode konnte die Baustelle Zeit- und Kostenminimierend durchgeführt werden, da die Installation der Deckenstromschiene gleichartige und sich wiederholende Arbeitsschritte erfordert. Die Durchführung erfolgte mittels eigens entwickelter Geräte, wie beispielsweise der Montageeinheit inkl. Hebevorrichtung oder des Montagehöhenvermessungsgeräts.

Die Montageschritte eines DSS-Systems gliedern sich in folgende Arbeitsschritte:

- I Vermessung der Montagehöhen
- I Montage der Drehgelenke und Rückleiteraufhängungen
- I Zieharbeiten Rückleiter
- I Montage Stromschienentragwerke
- I Montage Deckenstromschiene und Federbalken
- I Montage Fixpunkt/Festpunkt
- I Einlegen des Fahrdrabtes
- I Montage Dilatationen und Streckentrenner
- I Montage Schalter/OLSIG
- I Regulierung und Einstellung der Deckenstromschiene

Folgende Bauteile wurden im Tunnel verbaut:

Bauteil	Menge	Gewicht
DSS-System gemäß ÖBB-Regelwerk	~66 km	~500 t
DSS- und RL-Tragwerke	~9.300 Stk	~450 t
Rillenfahrdrabt (CuAg 120mm ²)	~66 km	~70 t
Erdrückleiter (CuAg 150mm ²)	~132 km	~150 t
Ringerdungsverbindungen	~140 Stk	~10 t
Bahnerdungsverbindungen	~280 Stk	
OLSIG-Anlage	8 Stk	
Streckentrenner	14 Stk	
Dilatationen und Festpunkte	118 Stk	

Tabelle 1 – Bauteile

7.2.2 Bauphasen

Bereits im Herbst 2022 wurden mehrere Baubegleitungen zur Montage der Hängesäulen bei der ausführenden Baufirma durchgeführt. Dabei mussten die einzelnen Montageschritte abgestimmt und koordinierende Maßnahmen umgesetzt werden, um eine fachgerechte Montage der Oberleitungsstützpunkte sicherzustellen. Ab März 2024 erfolgte der Start der Oberleitungsmontage, indem die beschriebenen Arbeitsschritte sukzessive abgearbeitet wurden. In dieser Bauphase erfolgte ein Zweischichtbetrieb, bei dem zeitgleich Tag und Nacht auf beiden Gleisen gearbeitet wurde. Besondere Herausforderungen brachten die Abstimmungen mit den zahlreichen anderen Gewerken mit sich. Hierzu gab es ein eigens für dieses Projekt entwickeltes Web-Tool, in dem sich alle Unternehmen zeitlich und örtlich eintragen mussten. Im Herbst 2024 konnten die Arbeiten fertiggestellt werden, wobei nach Übernahme am 13.02.2025 nur noch kleine Rest- und Zusatzarbeiten offen waren.

7.2.3 Spezialwerkzeuge und Innovationen

Für die Umsetzung dieses Jahrhundertprojekts waren u. a. folgende Spezialwerkzeuge und Innovationen erforderlich:

Das **Montagehöhenvermessungsgerät** wurde eigens für den Koralmtunnel entwickelt, da die Hängesäulenmontage nicht im Auftrag der ARGE KAT DSS war. Mit diesem Vermessungsgerät konnten die meisten Hängesäulenmontagetoleranzen kompensiert werden. Weiters wurde eine **Hebevorrichtung** speziell für die projektbezogenen Anforderungen einer Deckenstromschienenmontage entwickelt und stellt damit ein optimales Hilfsmittel zur Manipulation der Deckenstromschienenprofile auf die Montagebühne dar. Die rund 320 Stück lagerbaren DSS-Profile konnten mithilfe von Rollenbatterien auf die gewünschte Endlage gebracht werden. Deren Montage erfolgte in weiterer Folge auf der rund 40 m² großen Montageeinheit, welche je nach Tunnelprofil in der Höhe individuell einstellbar ist. Als Traktion konnten wir mit unserem Hybrid HTW100 umwelt- und arbeitsplatzschonende Arbeitsverhältnisse für unsere Mitarbeiter schaffen. Zudem wurde unser Oberleitungsvermessungsgerät **MOLMAK** durch eine Weiterentwicklung nun auch für das DSS-System zugelassen.

7.2.4 Singuläre Stellen Dilatationen/Streckentrenner

Bei einer Geschwindigkeit von ca. 250 km/h stellen montierte Dilatationen und Streckentrenner Problemstellen im DSS-System dar, sofern sie nicht mit höchster Präzision eingebaut werden. Aufgrund der eingangs erwähnten Hängesäulentoleranzen verlangte es vereinzelt sehr viele Anpassungsschritte, um die erforderliche Qualität umsetzen zu können. Zudem wurden alle singulären Stellen mit dem Lieferanten und Fachbereich der ÖBB überprüft und abgenommen.

7.2.5 Herausforderungen und Umplanungen

Der Einlauf der Fahrleitungskette an den Portalen auf das System der Deckenstromschiene erwies sich als Spezialaufgabe für alle Projektbeteiligten. Um einen relativ weichen Übergang von der Fahrleitungskette auf das doch sehr starre DSS-System zu gewährleisten, wurde dieser Übergang mit einem Federbalken ausgeführt (siehe Abbildung 2).

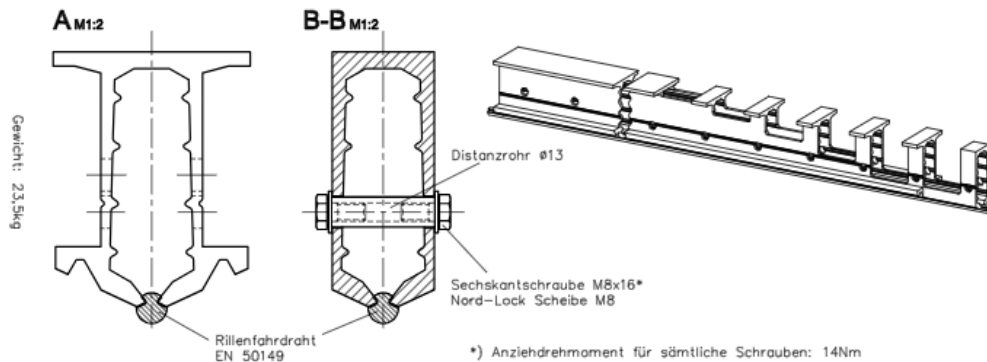


Abbildung 2 Federbalken

Diese Einfahrtsrampen (Übergang Fahrleitungskette auf Deckenstromschiene) auf der Ost- und Westseite, sowie der mit einer Fahrleitungskette ausgeführten Zulaufstrecken mussten aufgrund von mehrmaligen Qualitätsstopfungen im Außenbereich nachträglich wiederholend angepasst werden. Für die speziellen Rampen wurden seitens ÖBB „Rampenversuche-Hochstastfahrten“ für die hohen Geschwindigkeiten durchgeführt.

7.3 Technisch funktionale Abnahme

7.3.1 Allgemeines

Über die Regelwerke der ÖBB-Infrastruktur AG, vorrangig RW 12.10.01 sowie RW 12.17.02 / ED 21, ist definiert, dass vor der Inbetriebnahme von neu- und umgebauten Anlagen eine technisch funktionale Abnahmeprüfung durchzuführen ist.

Das wesentliche Ziel hierbei ist die stichprobenartige Überprüfung der oberleitungstechnischen Anlage auf etwaige ausführungstechnische Mängel sowie der Festlegung der damit verbundenen Maßnahmen im Beisein der verantwortlichen Vertreter aus der Projektumsetzung sowie den künftigen Instandhaltern.

Darüber hinaus dient die technisch funktionale Abnahme dazu, den künftigen Instandhalter über die oberleitungstechnische Anlage sowie die Örtlichkeit so unterweisen und so eine zuverlässige Übergabe aus dem Projekt in die Instandhaltung zu ermöglichen.

Über die Prozesse der ÖBB-Infrastruktur AG ist weiterführend festgelegt, dass nach 12 bis maximal 15 Monaten die sogenannte 1. Ordentliche Untersuchung der neu- oder umgebauten oberleitungstechnischen Anlagen durch die für die Instandhaltung zuständige Stelle durchzuführen ist. Ein Ziel dieser 1. Ordentlichen Untersuchung ist es auf Grundlage der technisch funktionalen Abnahme zu überprüfen ob alle offenen Mängel und sonstigen Problemstellungen behoben wurden.

7.3.2 Technisch funktionale Abnahme Koralmtunnel

Bezugnehmend auf den Koralmtunnel als Prestige- sowie Jahrhundertprojekt, wurde unter Beachtung des Ausmaßes – zweiröhrige, eingleisige Tunnel mit einer Länge von ungefähr 33 km – damit verbunden ungefähr 66 km Deckenstromschienenanlagen inkl. dazugehöriger angeschlossener Kettenwerks oberleitungen von ungefähr 5 km, eine Anpassung der technisch funktionalen Abnahme durchgeführt.

Hierbei wurde vereinbart, dass die Leitung der technisch funktionalen Abnahme dem Fachbereich Elektrotechnik (Ing. Sturzeis Wolfgang) obliegt. Als Grundlage wurde ein gesamtheitliches Dokument in Form eines Technischen Berichtes erstellt, welches vor allem folgende Eckpunkte beinhaltet und darstellt:

- I Regelwerkstechnische Grundlagen (RW 12.10.01 und RW 12.17.02)
- I Planungstechnische Grundlagen (Ausführungsplanung)
- I Projekttechnische Abweichungen
- I Prüfumfang
 - I Kettenwerk
 - I Deckenstromschiene
- I Technisch funktionale Abnahmeprüfung gem. RW 12.17.02 / ED 21
- I Dynamische Kontaktkraftmessungen
- I Stellungnahme der ÖBB-Infrastruktur AG zu den ermittelten Abweichungen

Unter Beachtung der Tragweite des Projektes Koralmtunnel hat man sich im Rahmen der technisch funktionalen Abnahme dazu entschlossen den Prüfumfang nicht nur stichprobenartig durchzuführen, sondern entsprechend zu erweitern. Dies hatte zur Folge, dass vor allem alle singulären Stellen sowie die damit verbundenen Stützpunkte einer vertiefenden technischen Prüfung unterzogen wurden, was zu dem grundsätzlich folgenden Prüfumfang zur Folge hatte:

- I 4 Übergänge Kettenwerk auf Deckenstromschiene (Federbalken), je ca. 800 m
- I 14 Streckentrenner inkl. Motorantriebe und Schalter
- I 118 Dilatationen und Festpunkte
- I ca. 1000 Stützpunkte, Maste und Felder

- I Ruhelagemessung je km sowie durchgehend für den gesamten Koralmtunnel, je Röhre

Zu Folge der umfangreichen technisch funktionalen Abnahmeprüfung hat man sich dazu entschlossen, entsprechende Vorlagen zu erstellen, gemäß derer die einzelnen Bereiche nachvollziehbar und vergleichbar überprüft werden können. Hierfür wurden folgende Vorlagen erstellt.

Auf Basis dieser Grundlage fand am 27.08.2024 die Startbesprechung zur technisch funktionalen Abnahme des Koralmtunnel statt, wo die Terminschiene sowie gemeinsame Vorgehensweise und Umsetzung abgestimmt wurden.

Die Überprüfung der oberleitungstechnischen Anlage des Koralmtunnel umfasste im Rahmen der technisch funktionalen Abnahme je Woche zwischen 3-4 Tage, wobei in einem Tag ungefähr 1 km zu überprüfen war, und endete mit 24.01.2025 und umfasste damit knapp 4 Monate!

Mit der technisch funktionalen Abnahme waren hierbei unter anderem die folgenden Stellen betraut, welche es zu zeitlich und bezogen auf deren Zuständigkeit zu koordinieren galt:

- I Projektumsetzung / Projekte Neu- und Ausbau (PNA)
- I Projektumsetzung / Leistungsbeauftragter Geschäftsbereich Streckenmanagement und Anlagenentwicklung (GB SAE) Region Süd 2
- I Örtliche Bauüberwachung / externes Bauüberwachung von Seiten PNA
- I Örtliche Bauüberwachung / externe wirtschaftliche Örtliche Bauaufsicht von Seiten GB SAE
- I Ausführende Oberleitungsmontage Firma / Konsortium aus European Trans Energy GmbH und Rhomberg Sersa Rail Power GmbH
- I Technikmanagement GB SAE Region Süd 1
- I Technikmanagement GB SAE Region Süd 2
- I Instandhaltungsstelle GB SAE Region Süd 1 ASC A
- I Instandhaltungsstelle GB SAE Region Süd 2 ASC B
- I Externe Prüforgane, bspw. Designated Body (DeBo)
- I Fachbereich Elektrotechnik

7.3.3 Dynamische Kontaktkraftmessungen

Einen essenziellen Prüfpunkt der technisch funktionalen Abnahmeprüfung sowie der TSI ENE, stellt die Überprüfung des Kontaktkraftverhaltens im Sinne der Interaktion Stromabnehmer-Oberleitung dar!

Unter Beachtung der Vorgaben der TSI ENE sowie den damit verbundenen Normen, wie bspw. der EN 50367, gilt es die folgenden Themenstellungen im Rahmen der dynamischen Kontaktkraftmessung mittels eines zugelassenen Messsystems nach EN 50317 nachzuweisen.

Darüber hinaus wurden die Anhubhöhe im Kettenwerk über optische Anhubmesssysteme erfasst und stellen in Verbindung mit den erfassten Daten der technisch funktionalen Abnahmeprüfung den Nachweis gemäß TSI ENE dar.

Die dynamischen Kontaktkraftmessungen wurden durch den elektrotechnischen Messwagen der ÖBB-Infrastruktur AG in Einfach- sowie Doppeltraktion mit einem Stromabnehmerabstand von 31 m, bis zur maximalen Befahrgeschwindigkeit von 250 km/h durchgeführt.

Hierbei ist zu beachten, dass im speziellen der Koralmtunnel durch seinen kleinen sowie immer wieder wechselnden Querschnitt eine Herausforderung, vor allem unter Beachtung der aerodynamischen Effekte, für die Interaktion zwischen dem Stromabnehmer sowie der Deckenstromschiene darstellt.

Im Rahmen der Inbetriebnahme der Koralmbahn wurden die dynamischen Kontaktkraftmessungen auf zwei zeitliche Blöcke aufgeteilt:

- I 24.04 bis 07.05.2025 (1. Messkampagne)
- I 26.05 bis 29.05.2025 (2. Messkampagne)

Dies hatte den Vorteil, dass Örtlichkeiten, welche aufgrund der Interaktion zwischen Stromabnehmer und Oberleitung mangelhafte Ergebnisse aufgezeigt haben, im Zeitraum von 07.05. bis 26.05. im Rahmen von außerordentlichen Untersuchungen überprüft und behoben werden konnten.

Auf Grundlage der Ergebnisse der dynamischen Kontaktkraftmessungen der 1. Messkampagne wurden beispielsweise Anpassungen an den Kettenwerksabsenkungen im Übergangsbereich zwischen Kettenwerk und Deckenstromschiene vorgenommen. Darüber hinaus konnten auch einige sogenannte „feste Punkte“ identifiziert werden, welche bis zur 2. Messkampagne behoben wurden.

7.4 EG-Prüfbescheinigung im Teilsystem Energie

Bezogen auf das Projekt Koralmbahn ist zu beachten, dass aufgrund der Laufzeit des Projektes sich einige Streckenteile bereits in Betrieb befanden womit unterschiedliche technisch funktionale Abnahmen, Teilinbetriebnahme-Erklärungen, §40 Erklärungen, etc. vorlagen, welche es für eine gesamtheitliche Bewertung der Koralmbahn unter Beachtung der TSI im Teilsystem Energie zu vereinen galt!

Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projektes festgelegt, dass die Prüfung im Teilsystem Energie gemäß der TSI ENE 2014 zu erfolgen hat. Hierbei ist anzuführen, dass bspw. die Entwurfsplanung für den Koralmtunnel mit 2007 genehmigt wurde, womit hier die TSI ENE 2002 galt. Diese unterschiedlichen technischen Vorgaben, Normen und Gesetze, galt es mit Bezug auf eine einheitliche Bewertung nach TSI ENE 2014 zusammenfassend darzustellen und bewertungstechnisch positiv abzuschließen!

Die Koralmbahn an sich umfasst in etwa eine Streckenlänge von 122 km, für die Prüfung im Teilsystem Energie bedeutete dies jedoch:

- I 85 km Deckenstromschienenanlagen
- I 253 km Kettenwerksoberleitungen der Type 1.2, 1.3, 2.1
- I 4 Betriebsbewilligungen seit 2012
- I 2 Streckenabschnitte und
- I jeweils 12 Bahnhöfe, Tunnel und Unterföhrungsbauwerke.

Zusammenfassend stellt dies 18 GB an Daten dar. Diese wurden dem DeBo zur Prüfung übergeben und am 02.10.2025 mit der positiven EG-Prüfbescheinigung abgeschlossen.

7.5 Zusammenfassung

Die Koralmbahn und vor allem der Koralmtunnel stellen ein Jahrhundertprojekt dar, welches unter Beachtung der unterschiedlichsten Einflussfaktoren als technisch anspruchsvoll gilt. Der Fachartikel beschreibt die Montage, Inbetriebnahme sowie die technisch funktionale Abnahme des durchgehenden Deckenstromschienensystems im längsten Eisenbahntunnel Europas. Aufgrund des geringen Tunnelquerschnitts, der hohen zulässigen Geschwindigkeit bis zu 250 km/h sowie der resultierenden aerodynamischen Effekte ergeben sich besondere Anforderungen an das Zusammenwirken von Stromabnehmer und Oberleitungsanlage. Aufgrund des kurzen und anspruchsvollen Zeitfensters wurde eine Arbeitsgemeinschaft zweier österreichischer Fachfirmen gegründet, wodurch alle vorgegebenen Zwischen- und Endtermine fristgerecht eingehalten werden konnten. In einer Hauptbauzeit von rund sieben Monaten wurden etwa 66 km Deckenstromschienensystem mit rund 9.300 DSS- und RL-Tragwerken, 66 km Rillenfahrdraht, 132 km Erdrückleitern sowie zahlreiche

Sonderbauteile verbaut. Für die erfolgreiche Umsetzung dieses Projekts kamen speziell entwickelte Werkzeuge und innovative Lösungen zum Einsatz, darunter ein Montagehöhenvermessungsgerät, eine Hebevorrichtung sowie das weiterentwickelte Oberleitungsvermessungssystem MOLMAK. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der erweiterten technisch funktionalen Abnahme, bei der neben der Regelwerkskonformität insbesondere singuläre Stellen wie Übergänge, Streckentrenner und Dilatationen umfassend geprüft wurden. Ergänzend wurden dynamische Kontaktkraftmessungen unter Hochgeschwindigkeitsbedingungen durchgeführt, um die Anforderungen der TSI ENE nachzuweisen und eine sichere Inbetriebnahme zu gewährleisten.

8

Bahntunnel – Aerodynamische Belastungen und Bemessungsansätze für Tunneleinbauten

Priv.-Doz. Dr.techn.habil. Michael Reiterer (Wien)

In Bahntunneln kommt es bei der Einfahrt, Durchfahrt und Ausfahrt von Zügen zu hochgradig dynamischen druckwellen- und strömungsinduzierten aerodynamischen Belastungen, die auf alle Tunneleinbauten einwirken und bei der Bemessung der Bauteile entsprechend zu berücksichtigen sind. Aufgrund der hohen Anzahl von täglichen Zugfahrten und den damit über die gesamte Lebensdauer der Bauteile verbundenen hohen Lastspielzahlen sind neben den Nachweisen der Tragsicherheit insbesondere auch Ermüdungsnachweise zu führen. Für die Einbauten in Tunnelbauwerken der Koralmbahn wurden im Zuge der Planungsphase aerodynamische Belastungsansätze definiert, die der Bemessung zugrunde gelegt wurden. Die Festlegung der Belastungsansätze erfolgte damals auf Grundlage von bestehenden Normen und Regelwerken sowie Simulationsberechnungen und/oder Messungen der zuginduzierten aerodynamischen Einwirkungen in vergleichbaren Bahntunneln in Österreich. Im Rahmen der im Jahr 2025 durchgeführten Inbetriebnahmefahrten der Koralmbahn wurden im Granitztaltunnel die bei Zugfahrten sich tatsächlich einstellenden aerodynamischen Belastungen messtechnisch ermittelt und mit den für die Bemessung definierten Belastungsansätzen verglichen. Im Artikel werden die im Granitztaltunnel durchgeführten Messungen und die erzielten Ergebnisse beschrieben und diskutiert. Es wird gezeigt, dass die im Zuge der Planungsphase definierten aerodynamischen Belastungsansätze für die unterschiedlichen Tunneleinbauten auf der sicheren Seite liegen, und somit sowohl die Trag- als auch Ermüdungssicherheit der Bauteile über die gesamte technische Lebensdauer gegeben ist.

8.1 Einleitung

Die infolge der Zugfahrten in Eisenbahntunnel auftretenden Belastungen setzen sich aus den druckwellen- und strömungsinduzierten aerodynamischen Belastungen zusammen (Abbildung 1) [1-3]. Druckwelleninduzierte Belastungen (Abbildung 1a) entstehen unmittelbar bei der Ein- und Ausfahrt von Zügen in den Tunnel infolge der plötzlichen Luftpartikelkompression und die dabei entstehenden Druckwellen breiten sich mit Schallgeschwindigkeit (343,2 m/s in trockener Luft bei 20°C) über die gesamte Tunnellänge aus. Sie verändern das Druckfeld im Tunnel in einem Bruchteil einer Sekunde und wirken analog wie der hydrostatische Wasserdruck in jede Raumrichtung mit gleicher Größe auf druckdichte Einbauten wie z.B. den zu den Querschlägen hin dicht abgeschlossenen Notausgangstüren. Bei nicht druckdicht ausgeführten Einbauten wie z.B. Beschilderungen, Befestigungen für die Deckenstromschiene und Telekom-Strahlerkabeln kommt es infolge der Druckwellenereignisse aufgrund der allseitig gleich großen Einwirkungen zu einem Druckausgleich und damit zu keiner resultierenden Belastungswirkung bzw. Verformungsreaktion. Die plötzlichen Druckänderungen im Tunnel führen zu stoßartigen Beanspruchungen der Tunnleinbauten, wodurch sich im Vergleich zu den Einwirkungen von statischen Belastungen signifikante Vergrößerungen der Verformungsreaktionen ergeben. Bei der Bemessung von Tunnleinbauten ist daher ein dynamischer Stoßfaktor (Vergrößerungsfaktor) in der Größe von $\varphi_{dyn} = 1,40$ anzusetzen [2].

Strömungsinduzierte aerodynamische Belastungen (Abbildung 1b) entstehen bei der Durchfahrt der Züge durch den Tunnel infolge des Luftverdrängungs- und Wirbelablöseeffektes [4]. In unmittelbarer Umgebung des durch den Tunnel fahrenden Zuges kommt es ausgehend vom Zugkopf zu Veränderungen des Strömungsfeldes, mit gleichzeitiger Ausbildung von hochturbulenten Wirbelschleppen am Zugheck bzw. im Nachlauf dahinter. Die im Nahbereich des Zuges befindliche Tunnleinbauten – unabhängig davon, ob sie druckdicht oder nicht druckdicht ausgeführt sind – werden durch die strömungsinduzierten aerodynamischen Belastungen ebenfalls plötzlich dynamisch beansprucht.

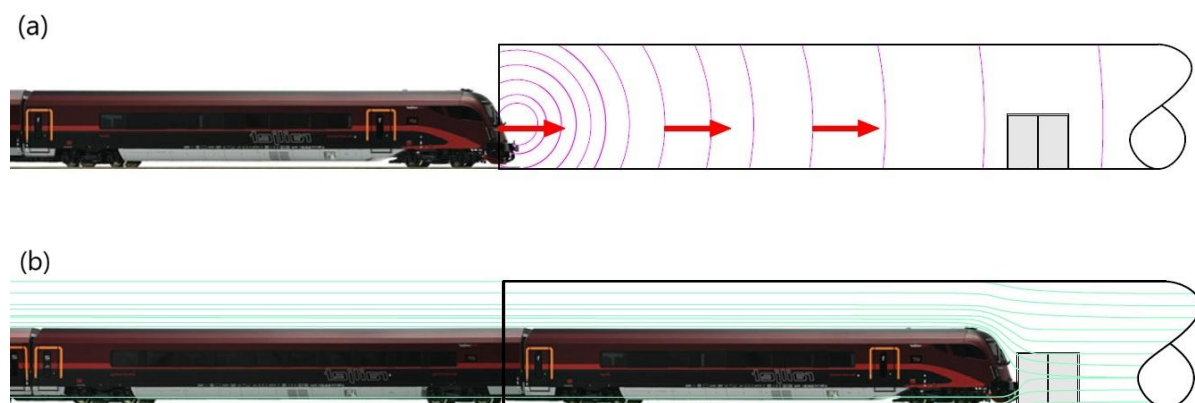


Abbildung 1 Druckwellen-(a) und strömungsinduzierte (b) aerodynamische Belastungen.

8.2 Beschreibung Granitztunnel und installierte Messtechnik

Der Granitzaltunnel befindet sich auf km 75,812 (Nordportal Gleis 1) der Strecke 40101 westlich von St. Paul im Lavanttal. Es handelt sich um einen zweiröhrigen, eingleisigen Eisenbahntunnel mit einer Gesamtlänge von 6.106 m (Abbildung 2). Der lichte Tunnelquerschnitt beträgt im Bereich der Lüftungszentrale (ausgeführt in offener Bauweise über die Länge $L = 606$ m) 46 m^2 und im restlichen Bereich (Tunnel Langer Berg und Tunnel Deutsch Grutschen) 41 m^2 . Der Tunnel wurde für eine maximale Fahrgeschwindigkeit der Züge von 250 km/h geplant und ausgeführt.

Zur Ermittlung der tatsächlich bei Zugfahrten auftretenden aerodynamischen Belastungen wurden vor Beginn der Inbetriebnahmefahrten im Februar 2025 in der Südröhre des Tunnels (Gleis 1 mit Fahrtrichtung Graz) an insgesamt fünf Messquerschnitten Luftdrucksensoren installiert (Abbildung 2). Die Messquerschnitte MQ1 bis MQ4 befinden sich innerhalb der Tunnelröhre und bei jedem Messquerschnitt wurden aus Redundanzgründen zwei Luftdrucksensoren an der Tunnelwand installiert. Zusätzlich erfolgte am Ort des Messquerschnittes 1 die Installation eines Zugdetektionssystems am Schienenstrang. Mit diesem System konnten die exakten Einfahrtsgeschwindigkeiten der Züge ermittelt und eine automatisierte Detektion des Zugtypes durchgeführt werden. Der Messquerschnitt 5 befindet sich in einer Entfernung von 25 m zum Nordportal und dort wurde neben den Luftdrucksensoren auch ein Schallpegelmessgerät zur möglichen Detektion von Mikrodruckwellen und Schallereignissen (Sonic Boom) installiert. Im vorliegenden Artikel liegt der Fokus auf der Untersuchung und Beurteilung der tatsächlichen Größe der zuginduzierten aerodynamischen Belastungen innerhalb des Tunnels, d.h. auf der Analyse der an den Messquerschnitten 1 bis 4 aufgezeichneten Luftdruckdaten.

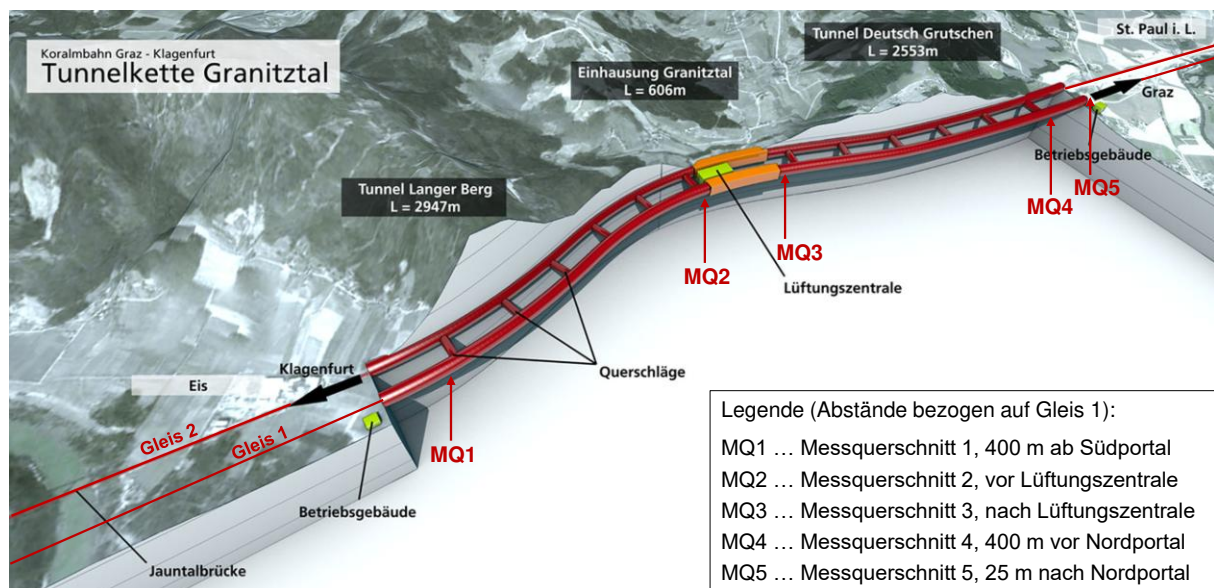


Abbildung 2 Zweiröhriger, eingleisiger Granitzaltunnel, Messquerschnitte MQ1 bis MQ5.

8.3 Aerodynamische Belastungsansätze für Tunnleinbauten

Die infolge Zugfahrten in Eisenbahntunnel auftretenden druckwellen- und strömungsinduzierten aerodynamischen Belastungen sind vom lichten Tunnelquerschnitt A_T , der Zuggeschwindigkeit v_{ZUG} , der aerodynamischen Form des Zuges, der Zuglänge und dem Versperrmaß abhängig. Dabei ist das Versperrmaß als Verhältnis zwischen der in die vertikale Ebene projizierten Ansichtsfläche des Zuges A_{ZUG} zur lichten Tunnelquerschnittsfläche A_T definiert.

Zur Festlegung der druckwelleninduzierten Belastungen als Grundlage für die Bemessung von Tunnleinbauten in Neubauprojekte der ÖBB-Infrastruktur AG wurden im Jahr 2014 in Österreich in bestehenden Eisenbahntunnel wie z.B. dem zweiröhrigen, eingleisigen Wienerwaldtunnel umfangreiche Messungen der tatsächlich auftretenden Drucklasten durchgeführt. Zur Verallgemeinerung der gemessenen Drucklasten für unterschiedliche Tunneltypen (zweiröhrig eingleisig und einröhrig zweigleisig), Tunnelquerschnitte, Tunnellängen, Zugstypen und Zuggeschwindigkeiten sowie der Untersuchung des zu berücksichtigenden Lastfalles „Hintereinanderfahren von Zügen in langen Tunneln“ wurden zusätzlich zu den Messungen numerische Simulationen der Zugfahren in Eisenbahntunnel mit der Software NUMSTA [5] durchgeführt und die Rechenmodelle wurden mit den vorliegenden Messwerten an die Realität angepasst. In den Simulationsberechnungen wurde zur Abdeckung aller möglichen (auch zukünftiger) Betriebszüge der TSI-Bemessungszug Klasse 2 gemäß TSI LOC&PAS [6] angesetzt. Mit den Ergebnissen der umfangreichen Simulationsberechnungen wurden schließlich die charakteristischen Drucklasten für unterschiedliche Tunnelarten, Tunnelquerschnitte, Tunnellängen und Zuggeschwindigkeiten ermittelt [7]. Dabei wurden die charakteristischen aerodynamischen Belastungsansätze für den Tragsicherheits- und Ermüdungsnachweis unterschiedlich definiert. Die aufgrund der stoßartigen Charakteristik der Drucklasten sich gegenüber einer statischen Belastung ergebende erhöhte dynamische Verformung des belasteten Bauteils wurde durch Hinzufügen des in [2] abgeleiteten Stoßfaktors $\varphi_{dyn} = 1,40$ berücksichtigt.

Mit Anwendung der Formel (1) können nach Einsetzen der abgeleiteten Referenzwerte für den minimalen und maximalen Druck (Sog) bei dem Referenztunnelquerschnitt $A_T = 40 \text{ m}^2$ die bei der Bemessung von Tunnleinbauten auf Tragsicherheit anzusetzenden maximalen und minimalen druckwelleninduzierten aerodynamischen Belastungen ermittelt werden (Hinweis: Die Formel (1) gilt für Zuggeschwindigkeiten $160 \text{ km/h} < v_{ZUG} \leq 250 \text{ km/h}$):

$$p_{max,min} = p_{max,min,40m^2} \left(\frac{40}{A_T} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \varphi_{dyn} \quad (1)$$

p_{max}	maximale druckwelleninduzierte Belastung (maximaler Druckwert) in Pascal
p_{min}	minimale druckwelleninduzierte Belastung (maximaler Sogwert) in Pascal
$p_{max,40m^2}$	Referenzwert für maximalen Druck bei $A_T = 40 \text{ m}^2$ in Pascal ($p_{max,40m^2} = 7215 \text{ Pa}$)
$p_{min,40m^2}$	Referenzwert für minimalen Druck bei $A_T = 40 \text{ m}^2$ in Pascal ($p_{min,40m^2} = -8460 \text{ Pa}$)
A_T	Lichter Tunnelquerschnitt in m^2
φ_{dyn}	Dynamischer Stoßfaktor ($\varphi_{dyn} = 1,4$)

Für den Granitzaltunnel ergeben sich bei Anwendung der Formel (1) und Heranziehung des lichten Tunnelquerschnittes $A_T = 41 \text{ m}^2$ die folgenden Größen für die bei der Bemessung der Tunnleinbauten anzusetzenden druckwelleninduzierten Belastungen: $p_{max} = 9.700 \text{ Pa}$ und $p_{min} = -11.400 \text{ Pa}$. Zur Ermittlung der druckwelleninduzierten aerodynamischen Belastungen, die bei dem Ermüdungsnachweis anzusetzen sind, wird auf [7] verwiesen.

Die Festlegung der zusätzlich zu den druckwelleninduzierten aerodynamischen Belastungen bei Zugfahrten in Eisenbahntunnel auftretenden strömungsinduzierten Belastungen erfolgte als Grundlage für die Bemessung der Tunnleinbauten nach der DB-Richtlinie 853 [8]. Dabei wurde zur Berücksichtigung der stoßartigen Belastungswirkung ebenfalls auch hier der dynamische Stoßfaktor $\varphi_{dyn} = 1,40$ hinzugefügt. Mit der Formel (2) kann die maximale strömungsinduzierte Drucklast rechnerisch ermittelt werden:

$$q_{max} = 0,04726 \cdot u^{*2} \cdot v_{ZUG}^2 \cdot \varphi_{dyn} \quad (1)$$

u^*	dimensionslose Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom lichten Tunnelquerschnitt A_T gemäß DB-Richtlinie 853 [8]
v_{ZUG}	Zuggeschwindigkeit in km/h
φ_{dyn}	Dynamischer Stoßfaktor ($\varphi_{dyn} = 1,4$)

Für den Granitzaltunnel ergibt sich bei Anwendung der Formel (2) und Heranziehung des lichten Tunnelquerschnittes $A_T = 41 \text{ m}^2$ sowie $u^* = 1$ gemäß DB-Richtlinie 853 und $v_{ZUG} = 250 \text{ km/h}$ die folgende Größe für die bei der Bemessung der Tunnleinbauten anzusetzende strömungsinduzierte maximale Drucklast: $p_{max} = 4.135 \text{ Pa}$. Diese wurde bei der Bemessung aller nicht druckdichten (umströmbaren) Bauteile im Granitzaltunnel wie z.B. der Signalschilder, Hektometertafeln, Hängesäulen für die Deckenstromschiene, etc. angesetzt. Die druckwelleninduzierten Belastungen müssen für diese Bauteile nicht überlagert werden, da es infolge der allseitigen in gleicher Größe einwirkenden Druckwelle zu einem Druckausgleich kommt. Bezüglich der Ermüdungsbemessung wird angemerkt, dass

die maximale Drucklast gemäß Formel (2) zu ermitteln und die Dauerfestigkeit gemäß ÖNORM EN 1993-1-9 [9] mit 5 Millionen Lastspielen nachzuweisen ist. Bezüglich der Anwendungsgrenzen der Formel (2) ist zu beachten, dass mit dieser nur die strömungsinduzierten aerodynamischen Belastungen im Luftspalt zwischen dem fahrenden Zug und der Tunnelwand in Fahrtrichtung des Zuges berechnet werden. Diese Belastungswirkungen können somit für die Tragsicherheits- und Ermüdungsbemessung aller sich im Luftspalt befindlichen Tunneleinbauten, welche in oder entgegen der Fahrtrichtung des Zuges angeströmt werden, herangezogen werden. Es hat sich bei der Anwendung jedoch gezeigt, dass die sich ergebenden aerodynamischen Belastungswerte für die Bemessung quer zur Fahrtrichtung angeströmter Tunneleinbauten wie z.B. der Telekom-Strahlerkabel zu einer hohen Überschätzung der tatsächlich auftretenden strömungsinduzierten Belastungen führen. In Österreich hat man sich daher im Jahr 2021 dazu entschieden, in-situ Messungen bei Einbauten in bestehenden Eisenbahntunneln zur Ermittlung der tatsächlich auftretenden strömungsinduzierten Belastungen quer zur Fahrtrichtung des Zuges durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in [4] dokumentiert und dargestellt.

8.4 Messung tatsächliche aerodynamische Belastungen im Granitzaltunnel

Zur messtechnischen Ermittlung der bei Zugfahrten im Granitzaltunnel tatsächlich auftretenden aerodynamischen Belastungen wurden vor Beginn der Inbetriebnahmefahrten der Koralmbahn im Februar 2025 an insgesamt fünf Messquerschnitten im Tunnel Luftdrucksensoren installiert (siehe Beschreibung der installierten Messtechnik in Abschnitt 1.2 und Position der 5 Messquerschnitte in Abbildung 2). Ziel der Messungen war die Verifikation der vorrangig auf theoretischen Überlegungen festgelegten Belastungsansätze für die druckwellen- und strömungsinduzierten Belastungen, die bei der Bemessung der Tunneleinbauten für alle Tunneln auf der Koralmbahn angesetzt wurden (siehe Abschnitt 1.3). Zudem sollte ein Vergleich zwischen den theoretischen und gemessenen Belastungswerten durchgeführt werden, um die Konservativität und das Sicherheitsniveau der aerodynamischen Belastungsansätze bewerten zu können. Bei den Inbetriebnahmefahrten der Koralmbahn wurden im Juni 2025 die in Bezug auf aerodynamische Belastungen im Granitzaltunnel relevanten Fahrten mit Geschwindigkeiten bis zu 233 km/h durchgeführt. Dabei wurden in der mit Luftdrucksensoren instrumentierten Südröhre des Granitzaltunnels auf Gleis 1 die in Tabelle 1 gelisteten Fahrten messtechnisch erfasst und die höchsten Druckwerte haben sich bei der Zugfahrt Nr. 12 für den DANI-Zug ergeben.

Zugfahrt	Zugtyp	Datum, Uhrzeit	Geschwindigkeit [km/h]
1	Railjetgarnitur 35 mit	10. Juni 2025, 08:54:15	181
2	Triebfahrzeug 1216 /	10. Juni 2025, 10:33:45	201
3	Steuerwagen vorne	10. Juni 2025, 15:06:55	231
4	Railjetgarnitur 35 mit	11. Juni 2025, 08:52:02	181
5	Triebfahrzeug 1116 /	11. Juni 2025, 10:45:21	201
6	Steuerwagen vorne	11. Juni 2025, 12:34:38	231
7	Railjetgarnitur 35 mit Triebfahrzeug 6193 / Steuerwagen vorne	12. Juni 2025, 08:55:15	182
8		12. Juni 2025, 10:44:30	202
9		12. Juni 2025, 12:30:47	230
10		12. Juni 2025, 14:31:07	232
11	Tfz 1116.235 mit	13. August 2025, 08:34:00	201
12	DANI-Tagzuggarnitur /	13. August 2025, 11:30:21	233
13	9-teilig	13. August 2025, 14:16:42	232
14	Tfz 1216.235 mit CD-	21. August 2025, 09:06:52	199
15	ComfortJet (9-teilig /	21. August 2025, 11:39:08	230
16	Garnitur 12)	21. August 2025, 14:07:21	233

Tabelle 1 Übersicht zu gemessenen Railjet Fahrten, Granitzaltunnel Gleis 1 (Südröhre).

Abbildung 3 zeigt die bei Messquerschnitt MQ1 gemessenen maximalen und minimalen Drucklasten in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit der Züge. Man erkennt, dass bei MQ1 bei der höchsten Fahrgeschwindigkeit von 233 km/h (Messfahrt Nr. 12) ein Maximalwert von ca. 3.600 Pa und ein Minimalwert von ca. -1.800 Pa gemessen wurde. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Drucklasten ist im Diagramm sehr gut erkennbar.

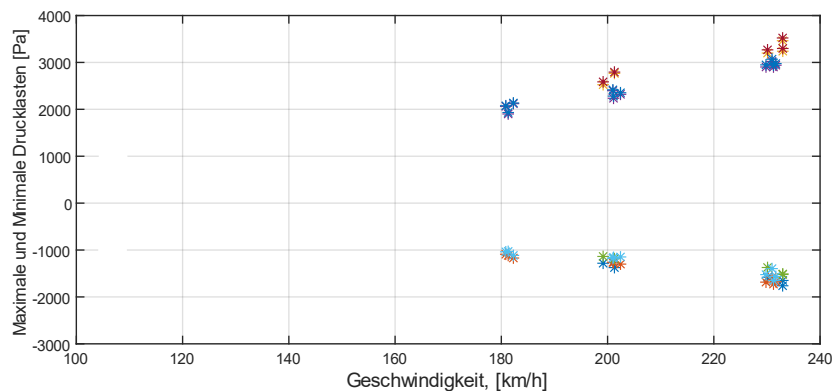


Abbildung 3 Gemessene maximale und minimale Drucklasten in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit der Railjets im Tunnel am Messquerschnitt MQ1.

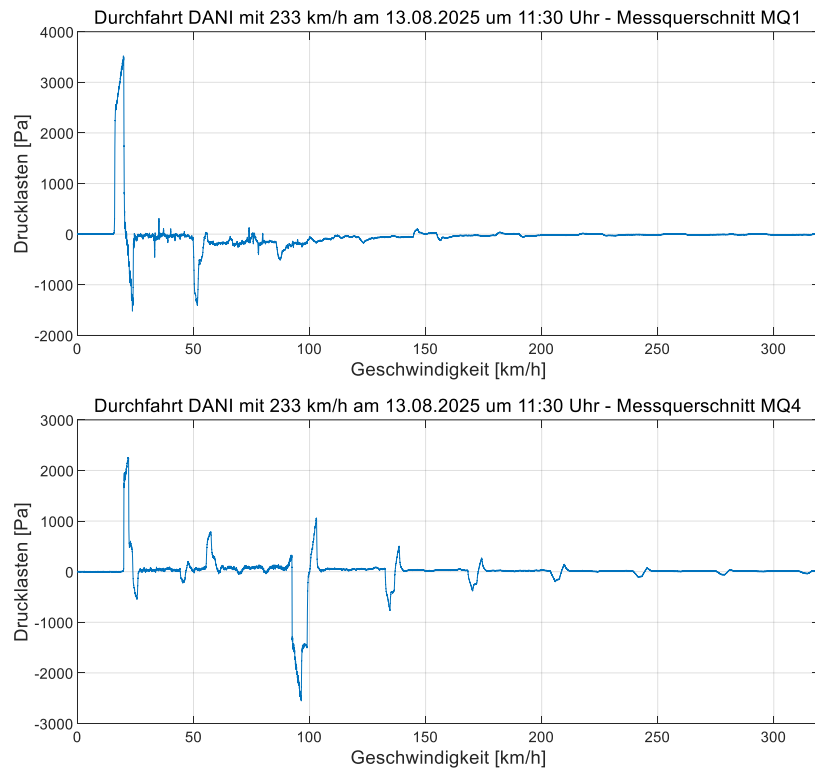


Abbildung 4 Drucklasten bei Durchfahrt der DANI-Tagzuggarntur mit 233km/h gemessen bei Messquerschnitt MQ1 (nahe Einfahrtsportal) und MQ4 (nahe Ausfahrtsportal).

In Abbildung 4 sind für die bezüglich der höchsten Druckwerte maßgebende Zugdurchfahrt am 13.08.2025 um 11:30:21 Uhr mit 233 km/h die gemessenen Zeitverläufe der Drucklasten bei MQ1 (nahe dem Einfahrtsportal) und bei MQ4 (nahe dem Ausfahrtsportal) dargestellt. Hier erkennt man sehr gut, dass mehrere Reflexionen der Druckwellen auftreten und dass bei Messquerschnitt MQ1 die größten Maximalwerte mit $p_{max} \approx 3.600$ Pa und bei Messquerschnitt MQ4 die größten Minimalwerte mit $p_{min} \approx -2.700$ Pa gemessen werden. Die größten minimalen Drucklasten treten immer in der Nähe des Ausfahrtsportales auf, und sie sind von der Tunnellänge abhängig. Für den in Abschnitt 1.5 durchzuführenden Vergleich der theoretischen Belastungsansätze zu den Messergebnissen müssen die gemessenen Drucklasten aufgrund ihres stoßartigen Charakters noch mit dem dynamischen Faktor $\varphi_{dyn} = 1,40$ multipliziert werden und dies ergibt die folgenden Vergleichsdrucklasten: $p_{max,M,\varphi} \approx 5.040$ Pa und $p_{min,M,\varphi} \approx 3.780$ Pa.

8.5 Vergleich Belastungsansätze mit Messergebnissen und Zusammenfassung

Für den Granitzaltunnel und auch für alle anderen Tunnel auf der Koralmbahn wurden zur Bemessung der gesamten druckdichten Tunnleinbauten wie z.B. der Notausgangstüren oder der Lüftungsklappen zu den Querschlägen in der Planungsphase die druckwelleninduzierten aerodynamischen Belastungen mit $p_{max} = 9.700 \text{ Pa}$ und $p_{min} = 11.400 \text{ Pa}$ festgelegt (siehe Abschnitt 1.3). Demgegenüber wurden bei den Fahrten mit der DANI-Tagzuggarnitur mit der maximalen Geschwindigkeit von 233 km/h inkl. Berücksichtigung des dynamischen Stoßfaktors die Vergleichsdrucklasten mit $p_{max,M,\varphi} = \text{ca. } 5.040 \text{ Pa}$ und $p_{min,M,\varphi} = \text{ca. } 3.780 \text{ Pa}$ ermittelt. Für die gemessenen Zugfahrten ergibt sich demnach eine Ausnutzung von 0,52 für $p_{max,M,\varphi} / p_{max}$ und 0,33 für $p_{max,M,\varphi} / p_{min}$. Die Tragsicherheit ist für die ausgeführten druckdichten Tunnleinbauten im Granitzaltunnel daher mit hoher Sicherheit erfüllt und dies ist ebenso für die Ermüdungssicherheit anzunehmen.

Literatur

- [1] Hong-qi Tian, „Review of research on high-speed railway aerodynamics in China,“ in Transportation Safety and Environment, Vol. 1, No. 1, 2019, <https://doi.org/10.1093/tse/tdz014>.
- [2] M. Reiterer und H. Kari, „Generalized shock spectrum of structures in tunnels due to aerodynamic loading,“ in Proceedings of the 13th International Railway Engineering Conference, 30th June – 1st July 2025, Radisson Blu Hotel, Edinburgh, Scotland, UK, ISBN 0.947644-80-6.
- [3] ÖNORM EN 14067-5, „Bahnanwendungen – Aerodynamik, Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel,“ Austrian Standard Institute, 2011.
- [4] M. Reiterer, „Aerodynamische Belastungen auf bahntechnischen Einbauten in schnell befahrenen Eisenbahntunnel,“ in Bautechnik 99, Heft 7, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/bate.202100097>.
- [5] NUMSTA, „NUMerical Simulation of Tunnel Aerodynamics,“ 2019, available online: <https://www.alexander-rudolf.de/NUMSTA/> (accessed on 12th December 2025).
- [6] TSI LOC&PAS, „Fahrzeuge - Lokomotiven und Personenwagen,“ Verordnung (EU) Nr. 1302/2014, 12.12.2014.
- [7] M. Reiterer, J. Schellander, H. Steiner, „Bahntechnische Einbauten in schnellbefahrenen Tunneln der ÖBB – Realitätsnahe Belastungsansätze in Theorie und Praxis,“ in Proceedings of STUVA Conference 2021, International Forum for Tunnels and Infrastructures, 24.-26.11.2021, Karlsruhe, Deutschland.
- [8] Deutsche Bahn Richtlinie 853, „Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten (Modul 853.2001A01: Aerodynamische Einwirkungen),“ DB Netz AG. Aktualisierung 1. Sept. 2018.
- [9] ÖNORM EN 1993-1-9, „Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9; Ermüdung“ Austrian Standard Institute, 2013.

9

Schalltechnische Charakterisierung des Koralmtunnels

Dipl.-Ing. Dr.techn. Sebastian Floss (Wien), Dipl.-Ing. Roland Fischer (Wien)

Vorliegender Beitrag beschäftigt sich mit den schalltechnischen Untersuchungen des Koralmtunnels. Durch eine Messinstallation an einer Railjet-Garnitur konnten die Schallemissionspegel, die während der Tunneldurchfahrt bei verschiedenen Geschwindigkeiten im Bereich des Rad-Schiene-Kontaktes entstehen, aufgezeichnet werden. Weiters wurden auch die Schallimmissionen im Zuginneren gemessen. Mit diesen konnte auch das Schalldämmmaß des Railjets im Tunnel bestimmt werden. Die Emissionsmessergebnisse dienen zum Nachweis der akustischen Wirksamkeit von Gleisabsorbern im Bereich der Tunnelportale. Die Messdaten aus dem Koralmtunnel werden dann mit den Ergebnissen aus zwei weiteren Tunneln – Wienerwald Tunnel und Gotthard-Basis Tunnel – verglichen.

9.1 Einleitung

Im Zuge der Inbetriebnahmefahrten durch den Koralmtunnel (KAT) wurden schalltechnische Untersuchungen an einer Railjet-Garnitur beim Durchfahren des Tunnels durchgeführt. In Anlehnung an die durchgeführten schalltechnischen Untersuchungen im Rahmen vorrausgegangener Messfahrten im Jahr 2012 sowie Messungen im Gotthard-Basis Tunnel (GBT) und im Wienerwald Tunnel (WWT) aus dem Jahr 2016 [1,2] wird die Wirksamkeit von Absorberplatten (Gleisabsorber, GSA) auf der Festen Fahrbahn (FF) im Tunnel untersucht. Die Charakterisierung des KAT hinsichtlich Schallemissionen, der Schallausbreitung

und der Sprachverständlichkeit wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verkehrswissenschaften der TU Wien, dem Institut für Schallforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) und mit der Abteilung Messtechnik und Fahrweganalyse der ÖBB Infrastruktur AG durchgeführt.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit der Gleisabsorber auf der FF im Bereich der Tunnelöffnungen wurden Schallpegelmessungen im und am Fahrzeug geplant.

Die Messungen, sowie die Auswertung der Daten aus dem Oberbaumesswagen wurden von VCE durchgeführt. Die Schallpegelmessung am und im Railjet mit Hilfe der geeichten Mikrofone dient dazu, die Auswirkungen der akustischen Eigenschaften durch das Befahren des Tunnels mittels an Normen angelehnter und objektiv vergleichbarer Pegelgrößen darzustellen, um dadurch die akustische Vergleichbarkeit mit den Gotthard-Basistunnel und Wienerwald Tunnel (GBT und WWT) zu ermöglichen. [3]

Es wurden die folgenden akustischen Größen ermittelt:

- I Emissionspegel im Nahbereich des Rad-Schiene Kontaktes
- I Bestimmung des Schalldämmmaß des Railjets im Tunnel
- I Vergleichswerte der gemessenen Pegel mit anderen Tunneln zur Beurteilung der akustischen Eigenschaften

Zusätzlich zu den Schallpegelmessungen wurde die Messfahrt mit zwei Webcams (WC1 & 2) aufgezeichnet. Die Videokamera im Triebfahrzeug (Vectron-Lok, VK) diente dazu, die Geschwindigkeitsanzeige zu protokollieren, da vor allem in Tunneln die Auswertung der Geschwindigkeit durch einen GPS-Datenlogger aufgrund schlechten Empfangs unzureichend ist. Die Webcams im Steuerwagen (WC2) und in der Zugmaschine (WC1) dienen dazu, die Strecke zu filmen, um etwaige Störungen bei der Auswertung zurückverfolgen zu können (siehe Abbildung 1).

Insgesamt wurden acht Tunneldurchfahrten (sechs bei konstanter und zwei bei nicht konstanter Geschwindigkeit) durchgeführt. Die gemessenen Schallpegel werden dann mit den Werten aus dem GBT (2016,[1,2]) und dem WWT (2016,[1,2]) verglichen.

9.2 Messaufbau und Messdurchführung

9.2.1 Railjet

Der Messaufbau der Messfahrten wurde in Übereinstimmung mit den vorangegangenen Messfahrten aus dem Jahr 2016 gewählt. Das Hauptaugenmerk lag dabei darauf, die Messpunkte so zu wählen, dass der für die Passagiere relevante Innenraumpegel (MP1 und MP3 in Abbildung 1) gemessen wird. Zusätzlich sollte durch Messpunkte außen am Wagen die Schallausbreitung und Akustik im Tunnel charakterisiert werden (MP2 und MP4 in Abbildung 1). Aus dem Vergleich der Messwerte Innen und Außen kann auf das Schalldämmmaß D (Formel 1) im Betrieb rückgeschlossen werden.

$$D = MP2 - MP1 + 10 \log\left(\frac{S}{A}\right) \quad (1)$$

Hier kompensiert der letzte Term $10 \log(S/A)$ den Einfluss der Raumakustik des Empfangsraums mit dem Volumen V ($V = \text{ca. } 260 \text{ m}^3$ und $S = \text{ca. } 100 \text{ m}^2$). Mit einer Nachhallzeit von 0,33 Sekunden ist dieser Term vernachlässigbar ($A = 0,16 \cdot V/T$).

Die exakte Positionierung der Sensoren ist Abbildung 1 gezeigt. Weiters ist die Lage der Videoaufzeichnung im Triebfahrzeug sowie im Steuerwagen des Railjets ersichtlich (siehe Abbildung 1 rechts). Die Videokamera (VK) im Triebfahrzeug diente dazu die Fahrgeschwindigkeit auf der Geschwindigkeitsanzeige zu protokollieren, da vor allem in Tunneln die Auswertung der Geschwindigkeit durch einen GPS-Datenlogger unzureichend ist. Die zwei Webcams (WC1 und WC2) im Steuerwagen dienten dazu, die Strecke aufzuzeichnen, um die Streckenparameter für die Auswertung bestimmen zu können.

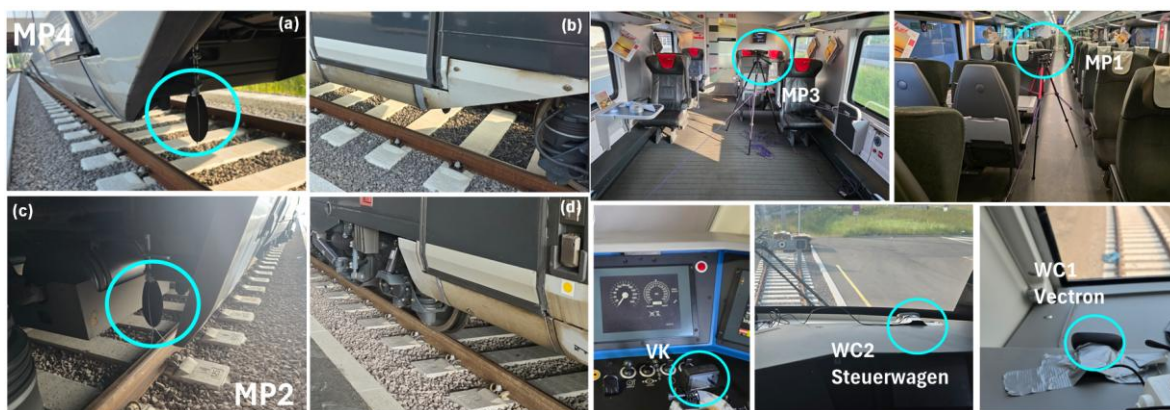


Abbildung 1 Positionierung der Schallpegel-Messgeräte (MP2 und MP4) im Außenbereich des Railjets [1]. Positionierung der Schallpegel-Messgeräte (MP1 und MP3) im Inneren sowie der Webcams (WC1, WC2) und Videokamera (VK) im Railjet [3].

Abbildung 2 zeigt, auf welcher Seite des Zugs die Außensensoren befestigt wurden. Gleis 1 bezieht sich hierbei auf die Südröhre (SR) und Gleis 2 auf die Nordröhre (NR). Im Gegensatz zum GBT ist der KAT leicht und der WWT stark asymmetrisch. Es ist kann daher akustisch von Bedeutung sein, auf welcher Seite das Mikrofon befestigt wurde. Die Ausrichtung und die Abstände der Mikrofone zu den Gleisabsorberplatten (GSA) sind aber in beiden Fällen annähernd gleich.

9.3 Akustik des Koralmtunnels

9.3.1 Mittlere Schallpegelwerte pro Fahrt

Für die akustische Charakterisierung des Tunnels anhand der Emissionspegel im Außenbereich und zusätzlich der Immissionspegel im Innenraum wurden entlang der Strecke in beiden Tunnelröhren acht Fixpunkte (P1 bis P8) nach Streckenkilometer definiert. An diesen Positionen wird ein mittlerer Schallpegel über eine Sekunde berechnet. Die Messpositionen sind an beiden Tunneleinfahrten im GSA-Bereich, in der Tunnelmitte sowie jeweils etwa im ersten und letzten Viertel der Tunnellänge festgelegt (ca. km 41.3, km 43.0, km 50.0, km 55.5, km 60.0, km 65.0, km 72.0 und km 73.3).

Daraus ergeben sich für Fahrten bei **200 km/h** über P1 bis P8 für Gleis 2 (NR) energetische Mittelwerte (EMW) bei MP1 und MP2 von **72,6 dB(A)** und **112,9 dB(A)** und für Gleis 1 (SR) energetische Mittelwerte bei MP1 und MP2 von **71,1 dB(A)** und **113,9 dB(A)**. Werte für Geschwindigkeiten von 180 km/h und 230 km/h sind in Tabelle 1 bzw. 2 hinterlegt.

9.3.2 Vergleich zwischen KAT, GBT und WWT

Im Folgenden werden die Messergebnisse vom GBT, WWT und KAT gegenübergestellt. Zum Vergleich werden dafür die im Bericht von 2016 [1] gekennzeichneten Fahrabschnitte herangezogen. Die Länge der damals ausgewerteten Fahrabschnitte liegt je nach Fahrt zwischen 25 und 400 Sekunden. Im KAT werden die Werte über die gesamte Tunnelfahrt ermittelt (515 bis 655 Sekunden). Dargestellt sind in Tabelle 1 die EMW.

	Schweiz (2016)		Westbahn (2016)		Differenz	Koralmbahn (2025)		Differenz
Fahrgast- raum	GBT Ri. Biasca	GBT Ri. Flüelen	WWT Ri. Tullnerfeld	WWT Ri. Hütteldorf	Min (GBT) – WWT Ri. Tullnerfeld	KAT Ri. Klagfurt (Gleis 2).	KAT Ri. Graz- (Gleis 1)	KAT – WWT Ri. Tullner- feld/Hütteldorf
120 km/h	65,1							
160 km/h	68,7	68,9	66,5		+2,4			
180 km/h	70,6	70,6	68,1		+2,5	72,2	71,1	+3,0
200 km/h	72,1	72,2	69,5	68,9	+2,7	72,6	72,1	+2,6/ +3,7
220 km/h				71,0		-	-	-
230 km/h				72,2 (*)		75,1	74,3	+2,9

Tabelle 1 Zusammenfassung der im Innenraum (MP1) gemessenen Immissionswerte – dargestellt wird der über den Auswertebereich gemittelte A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel LA,eq wobei teils über mehrere Fahrabschnitte gemittelt wurde ((*) WWT 230 km/h sehr kurze Messdauer). Für den KAT sind die energetischen Mittelwerte (EMW) von MP1 der Messpunkte P1 bis P8 gezeigt

Verglichen werden die Pegel im Fahrgastraum und im Türbereich außen. Beim KAT werden die Pegel am MP1 und MP2 verglichen, da die Mikrofonmembran an MP4 beschädigt war.

Die Auswertung bezieht sich auf die Auslegungsgeschwindigkeit im GBT von 200 km/h. Dem gegenüber kann der WWT auch mit bis zu 230 km/h befahren werden, wobei auch hier 200 km/h als repräsentativer Fahrzustand betrachtet werden. Der KAT wurde mit 180 km/h, 200 km/h und 230 km/h befahren.

Die Lage der Messpositionen bei der Messfahrt 2016 Richtung (Ri.) Hütteldorf und 2025 Richtung Klagenfurt bzw. 2016 Richtung Tullnerfeld und 2025 Richtung Graz sind vergleichbar. In Tabelle 1 fällt auf, dass die Werte Richtung Klagenfurt (Nordröhre, Gleis 2) etwas höher sind als bei der Fahrt in die andere Richtung. Dies passt gut zu dem gefundenen Trend, wonach die Schalldämmung in der Nordröhre (Richtung Graz) geringer ist als in der Südröhre. Hier können die Sekundärschallkomponenten des Innenraumpegels eine Rolle spielen, was durch unterschiedliche Schienenoberflächenzustände erklärt werden kann.

In Tabelle 2 fällt auf, dass die Werte der Außenpegel Richtung Graz (Gleis 1) etwas höher sind, was wahrscheinlich mit der Lage der Mikrofone zur Tunnelwand zusammenhängt. Bei Gleis 1 (siehe Abbildung 2) befinden sich die Mikrofone auf der Seite eines kleineren Raumvolumens; möglicherweise werden mehr Reflexionen in den Bereich des Mikrofons (MP2) eingetragen, was eine erhöhte Nachhallzeit zur Folge haben könnte.

	Schweiz (2016)		Westbahn Wien-NÖ (2016)		Differenz	Koralmbahn (2025)		Differenz
Türbereich Außen	GBT Ri. Biasca	GBT Ri. Flüelen	WWT Ri. Tullnerfeld	WWT Ri. Hütteldorf	Min (GBT) – WWT Ri. Tullnerfeld	KAT Ri. Klagfrt.(Gleis 2)	KAT Ri. Graz (Gleis 1)	KAT – WWT Ri. Tullnerfeld
120 km/h	107,0							
160 km/h	110,9	110,8	104,6		+6,2			
180 km/h	112,3	112,4	106,0		+6,4	112	112,9	+6,9
200 km/h	113,3	113,8	107,4	109,0	+5,9	112,8	113,9	+6,5/ +3,8
220 km/h				110,0		-	-	-
230 km/h				111,0 (*)		11	116,9	5,4

Tabelle 2 Zusammenfassung der im Türbereich Außen (MP2) gemessenen Immissionswerte – dargestellt wird der über den Auswertebereich gemittelte A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel LA_{eq} ((*) WWT 230 km/h sehr kurze Messdauer). Für den KAT sind die energetischen Mittelwerte (EMW) von MP2 der Messpunkte P1 bis P8 gezeigt

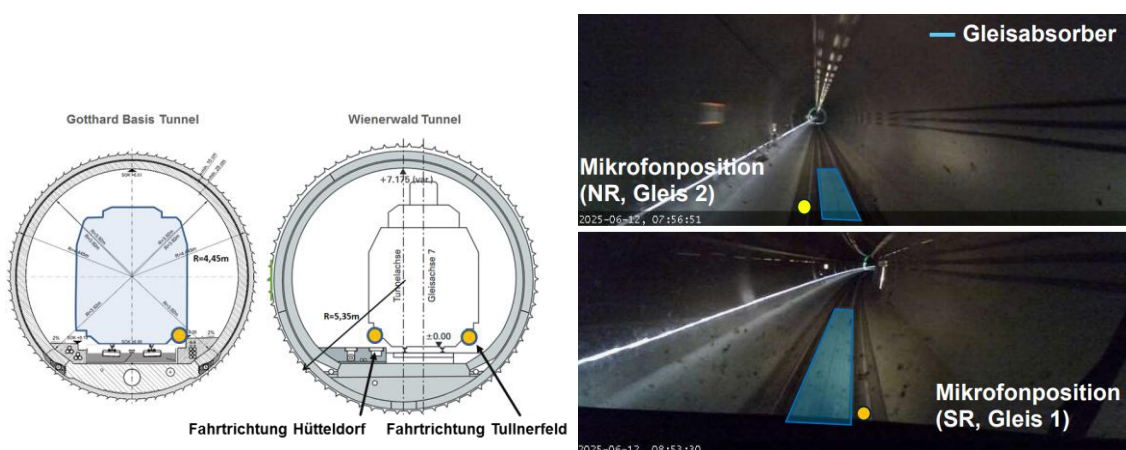


Abbildung 2 linkes: Positionierung der Außensensoren bei den Fahrten durch den GBT und den WWT; rechts: 1 Positionierung der Außensensoren bei den Fahrten durch den KAT mit abruptem Ende der Gleisabsorber (hellblau); Bilder von WC1 und WC2.

Weiters sind im KAT im Gegensatz zum WWT keine Gleisabsorber im gesamten Tunnel verbaut. Zum Vergleich dazu sind die Mikrofonpositionen bei den Messfahrten durch den GBT und den WWT in Abbildung 2 gezeigt. Beim GBT fällt die gute Übereinstimmung der Schallpegel in beide Fahrtrichtungen auf, was mit der Symmetrie der Tunnelröhren und damit der einheitlichen Nachhallzeit auf beiden Zugseiten zusammenhängen könnte.

9.4 Interpretation

9.4.1 Lage und akustische Wirksamkeit GSA

Die Bereiche mit GSA bestehen aus einem Mittelabsorber, der über der festen Fahrbahn montiert ist. Die akustischen Eigenschaften sind durch den Absorptionskoeffizienten pro Oktavband bestimmt. Der Hersteller geht von einer erhöhten akustischen Wirksamkeit ab ca. 500 Hz aus. Mit Nachhallzeitbetrachtungen über den Querschnitt des Tunnels lässt sich eine theoretische Wirksamkeit von ca. 2.0 dB(A) berechnen (42.5 m² Querschnittsfläche).

Die Bereiche mit Fester Fahrbahn (FF) und GSA gehen in beiden Röhren abrupt in Bereiche mit FF ohne GSA über (siehe Abbildung 2). Dies ist auch akustisch nachweisbar (siehe Abbildung 3).

Anhand der Einzahlwerte pro Messposition bzw. dem energetischen Mittelwert über alle Messpositionen P1 bis P8 kann zwar der Tunnel akustisch charakterisiert werden, nicht aber die akustische Wirksamkeit der Gleisabsorber (GSA) eingeschätzt werden.

Deshalb werden nun Ausschnitte aus den Messschrieben gezeigt. Darin zu sehen sind jeweils die Schallpegelwerte an den Messpunkten im und am Zug (MP1/MP3 bzw. MP2/MP4) während der Einfahrt in den Tunnel und während der Ausfahrt aus dem Tunnel.

Über die Durchschnittsgeschwindigkeit und den Aufbau des Tunnels konnten in den akustischen Messschrieben Abschnittsmarkierungen (vertikale gestrichelte Linien in Abbildung 3) gesetzt werden, die jeweils Informationen über den Tunnel bzw. eine Änderung des Oberbaus – wie Beginn und Ende der GSA – enthalten (orange: Tunnelende/-beginn, dunkelrot: Beginn/Ende GSA, gelb: Beginn/Ende Feste Fahrbahn, grün: Beginn/Ende Masse-Feder System).

In der folgenden Abbildung 3 sind die Schallpegelunterschiede beim abrupten Übergang von FF mit GSA zu ohne GSA mit dem Symbol Δ hervorgehoben.

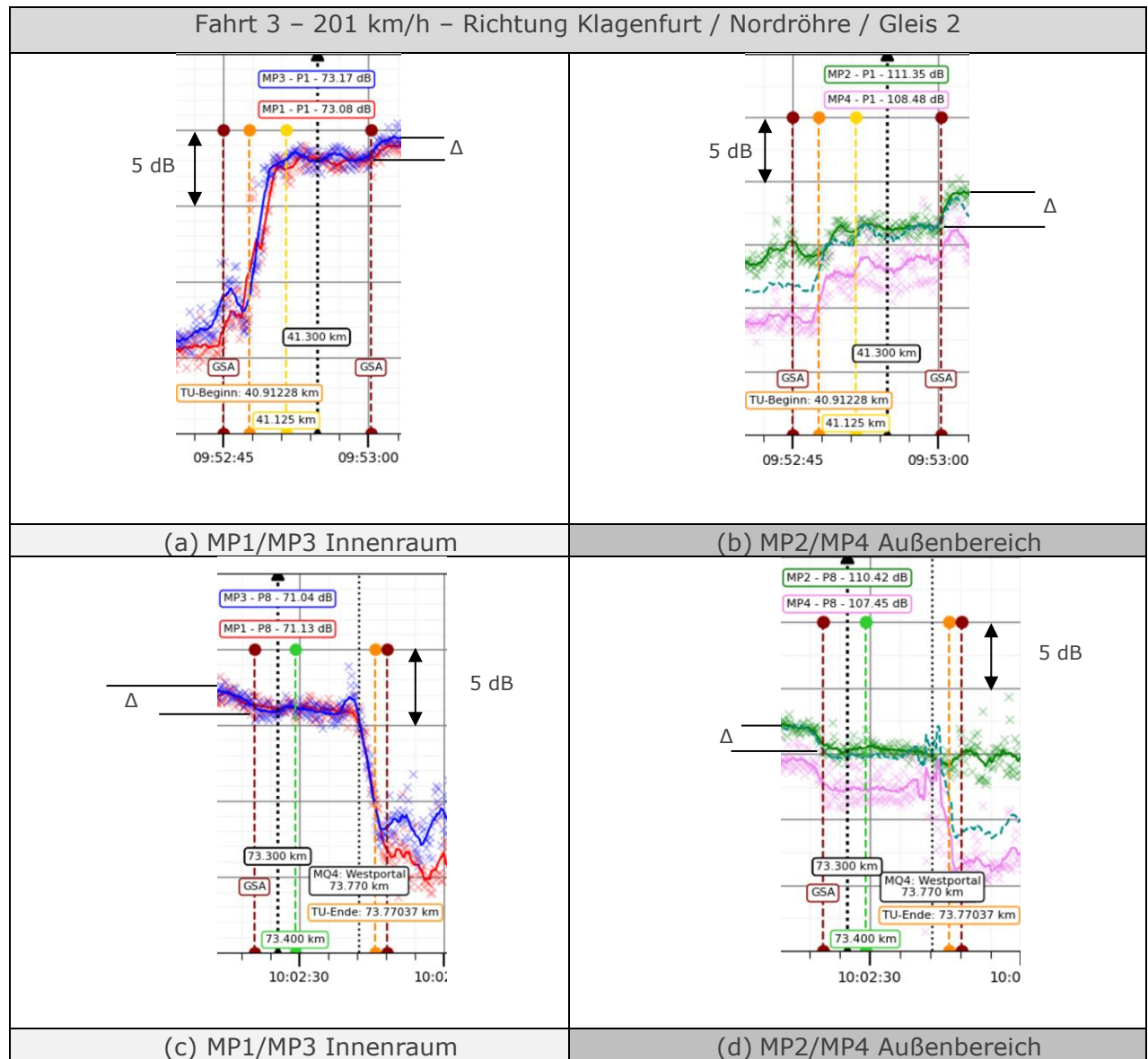


Abbildung 3 Verlauf der Schallpegelwerte im Innenraum (a) und Außenbereich (b) bei Einfahrt und bei Ausfahrt aus dem Tunnel ((c) und (d)); Messfahrt 3 bei durchschnittlicher Geschwindigkeit v_{Zug} , mittl. = 201 km/h. Zusätzlich zu sehen sind die durchschnittlichen Messwerte pro Messpunkt am Zug (MP1 bis MP4) an Messposition P1 und P8 im Tunnel; jeweils mit km-Angabe.

9.4.2 Schalldämmmaß Railjet

Zur Bestimmung des Schalldämmmaßes D des Railjets im Tunnel wird der resultierende Pegel im Senderraum MP2 und im Empfangsraum MP1 gemessen. Der im Empfangsraum (hier im Fahrgastraum) gemessene Pegel hängt dabei primär vom Schalldämmmaß der Außenhülle des Wagens und sekundär von den akustischen Gegebenheiten des Empfangsraums ab.

Im Tunnel liegt das Schalldämmmaß im Bereich von $D=40$ bis $D=42,5$ dB(A) und damit sehr deutlich unter dem Wert außerhalb des KAT (deutlich über $D=45$ dB(A)).

9.5 Zusammenfassung

Während bei den Messungen und Auswertungen mehrere relevante Geschwindigkeiten betrachtet wurden, beziehen sich die wesentlichen Analysen auf die maßgebliche Fahrgeschwindigkeit von 200 km/h:

- I Die gemessene (nicht korrigierte) Pegeldifferenz zwischen KAT und WWT im Innenraum liegt bei 3.7 dB(A); im Außenbereich liegt diese bei 6.5 dB(A).
- I Für die maßgeblichen Immissionen im Innenraum ist sowohl der resultierende Schallpegel im Tunnel reduziert um das Schalldämmmaß des Railjet als auch der sekundäre Luftschall zufolge der auf die Kabine übertragenen Vibration relevant.

Wirksamkeit der Gleisabsorber bzw. akustische Charakterisierung:

- I Die theoretische Wirksamkeit der Gleisabsorber (Mittelabsorber) beträgt ca. 2.0 dB(A). Dies konnte bei den Messfahrten bestätigt werden (1.5 bis 2.5 dB(A)).
- I Die Daten geben Hinweise darauf, dass der Mittelabsorber allein deutlich weniger wirksam ist als die Kombination aus Mittelabsorber und Randabsorber.
- I Das Schalldämmmaß im Südtunnel ist höher als im Nordtunnel; dies kann einerseits an den Sekundärschallkomponenten liegen und ist ein Hinweis darauf, dass anscheinend der Schienenzustand im Südtunnel besser ist; oder die Anordnung der Vectron-Lok als Schiebefahrzeug hat eine akustische Auswirkung.

Das Schalldämmmaß für den Railjet im KAT liegt teilweise deutlich (2.5 dB(A)) unter 43 dB(A); außerhalb des KAT bei deutlich über 45 dB(A).

Literatur

- [1] B. Weiß, G. Achs, Wirksamkeit von Gleisabsorbern, FCP ZT GmbH, Wien, Februar 2017.
- [2] B. Weiß, G. Achs, Messfahrten Gotthard-Basistunnel, FCP ZT GmbH, Wien, August 201
- [3] S. Floss, H. Töll, Verifikationsmessungen – Schallmessungen im Railjet im Koralmtunnel (KAT), FCP ZT GmbH, Wien, August 2025

10

Staub in der Bau-, Test- und Betriebsphase in einem Bahntunnel – Messungen und Ergebnisse

Dr. Daniel Fruhwirt, Dr. Helmut Steiner (Graz)

Eisenbahnen emittieren infolge von abrasiven Prozessen und Verschleiß sogenannte Nicht-Abgas-Partikel (non-exhaust particles). Diese Partikel stellen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Mensch und Umwelt sowie auf Grund ihrer leitenden Eigenschaften für den Betrieb von Eisenbahntunnel eine besondere Herausforderung dar. Um mehr Informationen über die Emissionsmengen und die Feinstaubbelastung (PM-Lasten) in Eisenbahntunneln zu erhalten, wurden umfangreiche Messkampagnen in österreichischen Eisenbahntunneln durchgeführt. Hierbei zeigten sich zufolge unterschiedlicher Tunnelcharakteristika große Unterschiede bezogen auf die auftretenden Feinstaub-Lasten. Der auftretende Feinstaub setzt sich vorwiegend aus Eisen, Kupfer und Mangan zusammen. Darüber hinaus wurde die Lebensdauer von PM-Filtern in einer In-situ-Installation bewertet. Das nominale Ende der Filterlebensdauer wurde innerhalb eines Zeitraums von zwei bis drei Monaten erreicht.

10.1 Einleitung

Die Emissionen von Eisenbahnen sind nicht im gleichen Detaillierungsgrad wie jene des Straßenverkehrs untersucht, obwohl einige Forscher [1][2][6][9][11] Untersuchungen zur Quantifizierung der Emissionen durchgeführt haben. Die PM₁₀ Emissionsfaktoren variieren jedoch je nach angewandter Methodik um einen Faktor von 10 (0,2 g/km bis 23 g/km). Bremsen, Räder, Schienen sowie der Stromabnehmer und der Fahrdrabt stellen die Haupt-

quellen für Nicht-Abgas-Partikelemissionen im Schienenverkehr dar. In einer Tunnelumgebung ist aufgrund einer begrenzten Verdünnung der Schadstoffe mit hohen PM-Konzentrationen zu rechnen. Diese Erwartung wird durch viele Studien bestätigt, die Metrosysteme als die am stärksten verschmutzten städtischen Orte identifizierten [4][10]. Die PM-Belastung in Eisenbahntunneln wurde von [3] bewertet, der Messungen im Arlanda-Flughafentunnel in Stockholm durchführte. Während der Stoßzeit erreichte die PM₁₀-Konzentration Werte von bis zu 260 µg/km.

Lange unterirdische Bauwerke werden immer häufiger Teil der modernen Verkehrsinfrastruktur. Ein sicherer und zuverlässiger Betrieb solcher Bauwerke erfordert eine Vielzahl technischer Installationen. Einige dieser Installationen setzen erhebliche Abwärme frei, die abgeführt werden muss, um die Raumlufttemperaturen auf einem akzeptablen Niveau zu halten [5]. Daher sind Kühlsysteme erforderlich, die zur Rückkühlung zumeist Tunnelluft nutzen. Dies bedingt den Einsatz von Filtersystemen, um sensitive Komponenten vor hohen Staublasten zu schützen. Um die PM-Filterstandzeit in einer Eisenbahntunnelumgebung zu bestimmen, wurde in den letzten Jahren ein umfassendes PM-Monitoring durchgeführt. Dies umfasst das Monitoring der PM-Massenkonzentrationen, die Ableitung von PM-Emissionsfaktoren, die chemische Analyse der Partikelzusammensetzung und In-situ-Tests von PM-Filtern zur Bestimmung der Standzeit.

10.2 Versuchsorte und Messaufbau

10.2.1 Versuchsorte

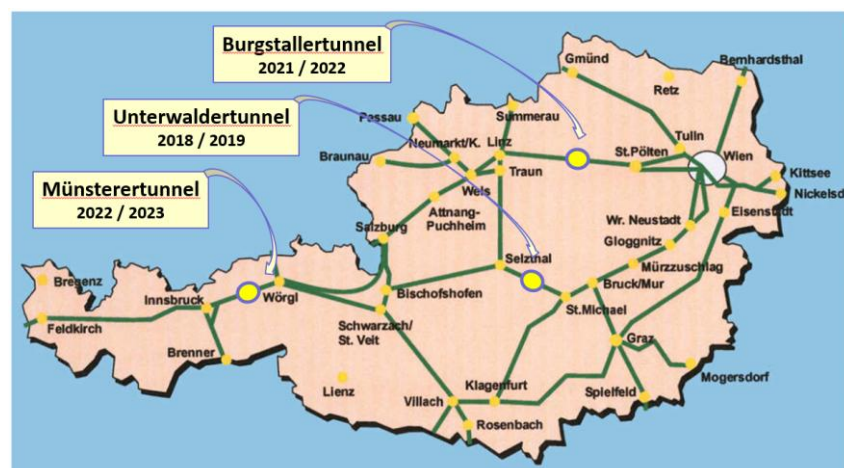


Abbildung 1 Verortung der Versuchsorte auf dem österreichischen Schienennetz. [13]

Für das PM-Monitoring wurden drei verschiedene Teststandorte ausgewählt. Die Auswahl erfolgte basierend auf den Tunneleigenschaften, die sich hauptsächlich in der Tunnellänge, dem Verkehrsaufkommen und der Geschwindigkeitsbegrenzung ausdrücken. Abbildung 1 zeigt die Verortung der Teststandorte im österreichischen Eisenbahnnetz. Tabelle 1 zeigt

die Versuchsorte einschließlich ihrer Kennwerte. Alle Tunnel sind eingleisige, doppelspurige Tunnel, die mit einer festen Fahrbahn ausgestattet sind.

10.2.1 Messaufbau

Der Messaufbau unterschied sich geringfügig zwischen den Messkampagnen. Insbesondere der Testaufbau im Tunnel Unterwald hatte ein spezielles Design, da das PM-Monitoring in das Zuluftsystem implementiert wurde, welches zu Kühlzwecken diente. Dieses System war darauf ausgelegt, Tunnelluft ($0.25 \text{ m}^3/\text{s}$) zu entnehmen und die Zuluft über Lüftungskanäle in einen speziellen Betriebsraum zu leiten. Ansonsten entsprach die Konfiguration jener, die mittlerweile im Koralmtunnel installiert ist. Zur kontinuierlichen Überwachung der TSP-Konzentration (Gesamtschwebstaubkonzentration) im Zuluftkanal wurde ein TEOM-Monitor (Tapered Element Oscillating Microbalance 1400i) eingesetzt. Der TEOM 1400i verwendet ein gravimetrisches Prinzip, um Änderungen der gesammelten Partikelmasse auf einem Filter zu bestimmen. Im Gegensatz dazu befanden sich die PM-Monitore im Burgstaller- und Münsterertunnel direkt im Eisenbahntunnel und lieferten somit präzisere Informationen über die PM-Belastungen im Tunnel. In beiden Tunneln wurden optische Partikelmonitore (EDM180) sowie gravimetrische Referenzmethoden (PartisolPlus), eingesetzt. Abbildung 2 zeigt die PM-Monitoring-Positionen im Burgstaller- als auch im Münsterer-Tunnel sowie ein Bild der installierten PM-Monitore.

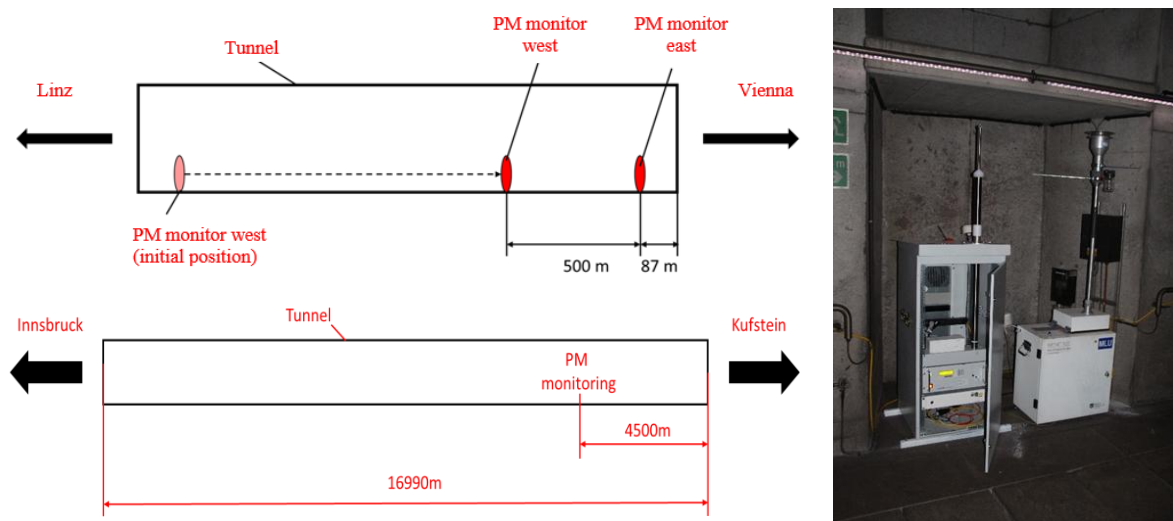


Abbildung 2 oben links – Schema des Testaufbaus im Tunnel Burgstall,
unten links – Schema des Testaufbaus im Tunnel Münster,
rechts – Einbauposition des PM Monitors im Tunnel Burgstall. [13]

Zusätzlich zur Überwachung der PM-Konzentrationen wurde auch die Lebensdauer von PM-Filtern in einer Eisenbahntunnelumgebung bewertet. Zu diesem Zweck wurde im Münsterertunnel ein Zuluftsystem installiert, das einen Zuluftventilator, Lüftungskanäle, Formstücke (Fittings) und einen zweistufigen Filter umfasste. Diese Anlage war ein halbes Jahr

lang in Betrieb und ermöglichte so die sequenzielle Erprobung von drei Filtersätzen. Diese Filtersätze (Grobstaub- und PM-Filter) waren in einem Filterkasten untergebracht. Abbildung 3 zeigt die Installation in einer Nische neben der PM-Monitoring-Station. Es gab keine Lüftersteuerung in Abhängigkeit vom Luftstrom. Der anfängliche Zuluftvolumenstrom wurde jedoch etwas höher als der Nennvolumenstrom ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) durch die Filter eingestellt. Mit zunehmender Partikelmasse auf den Filtern stieg auch die Gesamtdruckdifferenz über die Filter, was zu einer Abnahme des Luftvolumenstroms führte. Dieser Effekt war die meiste Zeit über vernachlässigbar, aber bei sehr hohen Druckdifferenzen sank der Luftstrom auf $0,85 \text{ m}^3/\text{s}$. Die beobachteten Messgrößen umfassten die Zuluftgeschwindigkeit und die Druckdifferenz über jede Filterstufe.



Abbildung 3 Tunnel Münster – Aufbau des Lüftungssystems inklusive den zwei Filterstufen. [13]

10.3 Ergebnisse

10.3.1 Partikelmassenkonzentrationen

Die PM-Konzentrationen in drei verschiedenen ÖBB-Eisenbahntunneln zeigten große Unterschiede, die sich aus unterschiedlichen Tunneleigenschaften sowie aus verschiedenen Überwachungspositionen in den Tunneln ergeben. Abbildung 4 veranschaulicht diese Unterschiede im Vergleich der täglichen durchschnittlichen Partikelmassenkonzentrationen ausgewählter Zeiträume. Zudem zeigen Daten aus dem Burgstaller- und Münsterertunnel einen Vergleich der mittleren PM₁₀-Konzentrationen, die vom EDM180 (optisch) und dem PARTISOL Plus (gravimetrisch) erfasst wurden. Die täglichen Durchschnittswerte sind in einem kurzen Tunnel (Unterwald) und an einer portalnahen Messposition (Burgstall) deutlich niedriger als an einer portalfernen Position in einem langen Tunnel (Münster). Die Konzentrationen schwankten in jedem Tunnel um einen Faktor von 10 bis 15 – hauptsächlich aufgrund täglicher Verkehrsschwankungen und Niederschlag, der Hintergrundkonzentrationen und Partikelemissionen reduziert. Bei feuchten Bedingungen lagern sich Partikel

eher auf Boden und Zugoberflächen ab, weshalb der Einfluss von Niederschlag besonders in kurzen Tunneln und Portalbereichen sichtbar ist.

Weiters zu erwähnen sind die Abweichungen zwischen optischen und gravimetrischen Messungen, die in beiden Tunneln unterschiedlich ausfielen. Während die vom EDM180 erfassten Tagesmittelwerte im Tunnel Burgstall 64 % der vom PARTISOL Plus gesammelten Partikelmasse erreichten, waren es im Tunnel Münster nur 32 %. Diese Unterschiede ergeben sich aus der effektiven Dichte der Tunnel-Aerosole. Relevant ist dabei der Einfluss der Umgebungsluft in portalnahen und portalfernen Abschnitten: Vorbeifahrende Züge drücken weniger verschmutzte Außenluft in den Tunnel, die Messstationen nahe der Portale erreicht, während Tunnelbereiche in größerer Entfernung erst später durchmischt werden. In längeren eingleisigen Tunneln mit bidirektionalem Verkehr bleibt stark verschmutzte Luft durch den Kolbeneffekt länger im Tunnel. Dadurch sind die PM-Belastungen im Durchschnitt in der Tunnelmitte höher als in Portalnähe. Dies zeigen auch die Ergebnisse in Abbildung 4: Die Belastungen im Tunnel Münster sind deutlich höher als im Tunnel Burgstall, obwohl dort das Verkehrsaufkommen üblicherweise größer ist.

Zur Quantifizierung zeigt Tabelle 2 die durchschnittliche Partikelmassen-konzentration für jeden Tunnel sowie minimale und maximale tägliche Durchschnittswerte. Die durchschnittliche PM₁₀-Konzentration im Tunnel Münster war etwa sechsmal höher als im Tunnel Burgstall und rund 19-mal höher als im Tunnel Unterwald. Der Minimalwert lag fünfmal unter dem Durchschnitt, der maximale Tageswert war etwa dreimal so hoch. Ähnliche Verhältnisse zeigten sich auch in den Tunneln Unterwald und Burgstall.

	Münster			Burgstall	Unterwald
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁	PM ₁₀	TSP
Average	407.3	215.1	126.2	70.8	22.5
Minimum	80.5	60.2	44.0	21.2	4.7
Maximum	1297.9	479.5	240.2	205.3	60.7

Tabelle 1 Vergleich der PM Tagesmittelwerte an den drei Versuchsorten.

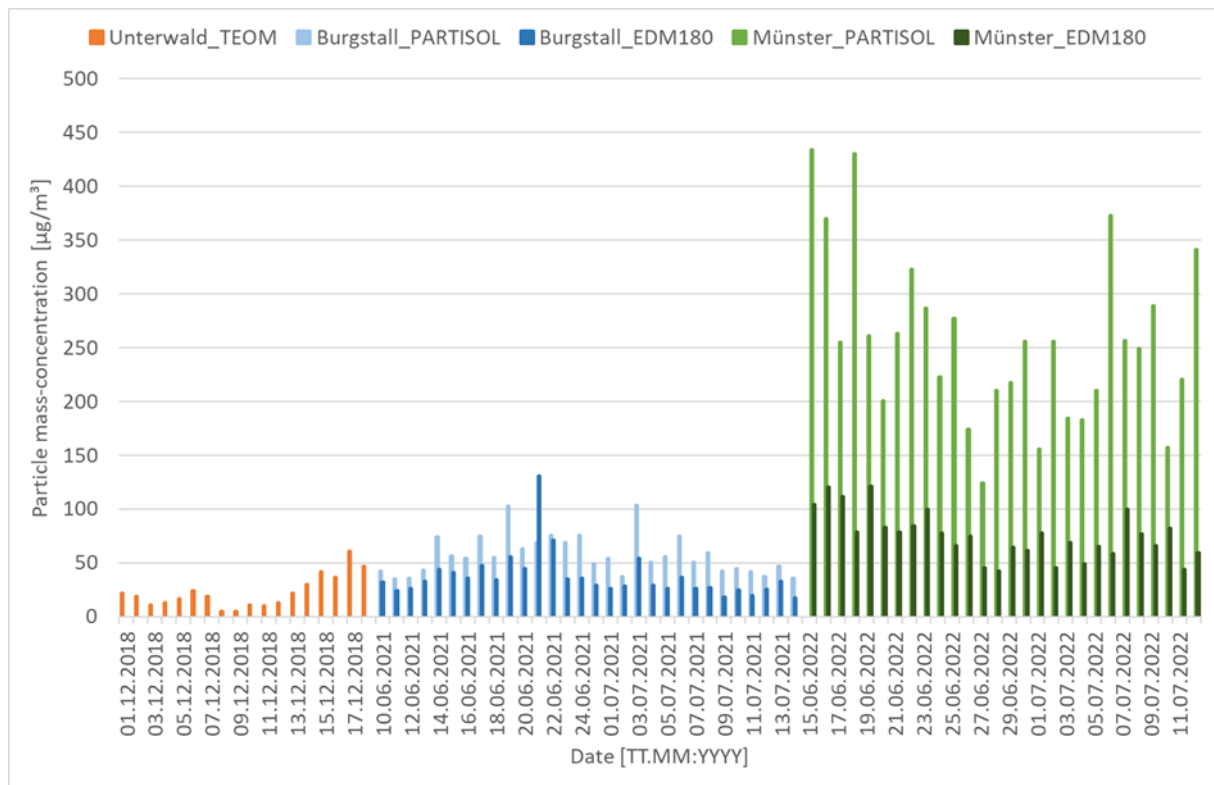


Abbildung 4 Vergleich der TSP (Tunnel Unterwald) und PM10 (Burgstall und Münster) Tagesmittelwerte. [13]

10.3.2 Partikelzusammensetzung

Schließlich wurden Filterproben, die mit dem PARTISOL PLUS Luftprobensammler gesammelt wurden, auf die darauf abgelagerte Schwermetall- und Gesamtkohlenstoffmasse analysiert. Die durch diese Analyse gewonnenen Informationen zeigen die Massenanteile ausgewählter Elemente an der gesamten PM10-Masse, die auf den Filterproben gesammelt wurde. Diese Massenanteile sind als Durchschnittswerte von 32 Filterproben für jeden Tunnelstandort angegeben. Wie anzunehmen war stellten Eisen und Kohlenstoff die Hauptanteile an der gesammelten Partikelmasse dar. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass Kupfer, Chrom, Mangan, Magnesium und Nickel kleinere Anteile der Partikelmasse ausmachen. Ein Vergleich der Massenanteile, die individuell für jeden Testtunnel bestimmt wurden (siehe Tabelle 2), zeigt jedoch Unterschiede in der Partikelzusammensetzung. Einerseits werden diese Unterschiede durch die bereits erwähnten Abweichungen im Zusammenhang mit dem Einfluss der Umgebungsluft verursacht, und andererseits kann die Emission des rollenden Materials sowie anderer Eisenbahnkomponenten (z. B. Fahrdrabt) in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien variieren.

	TC	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni
Unterwald	29.20	1.38	0.45	48.16	<<	0.51	0.103
Burgstall	*	0.01	1.12	25.09	3.18	0.15	0.94
Münster	10.44	1.10	9.20	38.00	<<	0.30	0.11

* nicht analysiert

<< unter Nachweisbarkeitsgrenze

Tabelle 2 Ergebnisse der chemischen Analyse der Feinstaubzusammensetzung (Massenprozent).

10.3.3 Filterstandzeiten

Um die Standzeit eines PM-Filters zu verlängern, wird üblicherweise ein Grobstaubfilter vor dem PM-Filter angeordnet. Eine solche Anordnung wurde im Tunnel Münster getestet. Der Filterzustand wurde durch die Aufzeichnung der Gesamtdruckdifferenzen über jede Filterstufe überwacht. Abbildung 5 veranschaulicht die Entwicklung der Druckdifferenzen über jeder Filterstufe sowie die Gesamtdruckdifferenz für drei Filtersätze, die sequenziell getestet wurden. Zusätzliche Informationen werden durch die täglichen durchschnittlichen PM10-Konzentrationen während des Testzeitraums bereitgestellt. Das Ende der Standzeit wird durch eine Gesamtdruckdifferenz von 450 Pa (vom Hersteller definiert) angezeigt, welche nach 1,5 bis 2 Monaten erreicht wurde.

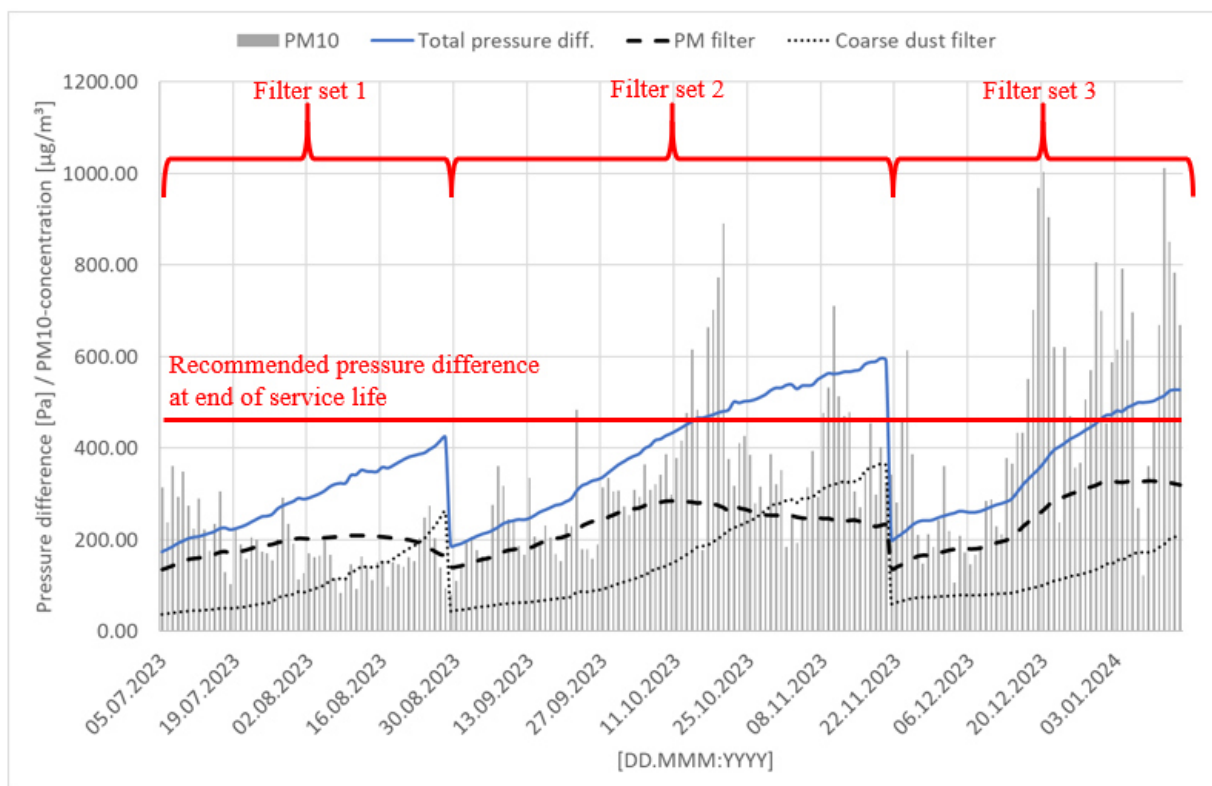


Abbildung 5 Verlauf des Differenzdrucks über die beiden Filterstufen sowie Tagesmittelwerte für PM10 während der Messperiode im Tunnel Münster. [13]

10.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Studie liefert Informationen über PM-Belastungen in Eisenbahntunneln, die durch Nicht-Abgas-Emissionen von fahrenden Zügen verursacht werden. Die bereitgestellten Daten stammen aus umfangreichen Messkampagnen in Tunneln der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB), die über mehr als fünf Jahre durchgeführt wurden. Ziel der Studie war es, die PM-Belastungen zu bestimmen, PM-Emissionsfaktoren abzuleiten (siehe [8][12]), Informationen über die Partikelzusammensetzung zu gewinnen sowie die Standzeit (oder: Lebensdauer) von PM-Filtern in einer Eisenbahntunnelanwendung zu bestimmen. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- I PM-Belastungen in Eisenbahntunneln hängen vom Verkehrsaufkommen, den Tunnelleigenschaften sowie von der Position innerhalb des Tunnels ab. Testergebnisse zeigen, dass Letzteres die anderen Parameter dominiert.
- I In portälnahen Tunnelabschnitten konnten signifikant niedrigere PM-Belastungen beobachtet werden als in Tunnelabschnitten, die eine gewisse Entfernung zu den Portalen aufweisen. Diese Schlussfolgerung gilt insbesondere für eingleisige, doppelspurige Tunnel.
- I Aufgrund signifikanter Veränderungen der effektiven Partikeldichte müssen Daten von optischen Partikelmonitoren in einer Eisenbahntunnelumgebung korrigiert werden.
- I Die Standzeit von zweistufigen Partikelfiltern bei einem Luftstrom von $1 \text{ m}^3/\text{s}$ konnte mit 1,5 bis 2 Monaten (entfernt von Tunnelportalen) bestimmt werden.
- I Die Hauptmassenanteile in der PM₁₀-Fraktion sind Eisen und Kohlenstoff. Kleinere Mengen von Kupfer, Chrom, Mangan, Magnesium und Nickel wurden ebenfalls identifiziert.

Die Partikelzusammensetzung variiert in Abhängigkeit vom Einfluss der Umgebungsluft (Position innerhalb des Tunnels) und Unterschieden in den verwendeten Materialien im rollenden Material sowie in zusätzlichen Eisenbahnkomponenten wie Schienen und Fahrdrabt.

Danksagung

Die in diesem Paper vorgestellten Forschungsaktivitäten wurden von den Österreichischen Bundesbahnen finanziert.

Literatur

- [1] Abbasi, S., Jansson, A., Sellgren, U., Olofsson, U., 2013. Particle Emissions From Rail Traffic: A Literature Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 43, 2511–2544. <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.685348>
- [2] Abbasi, S., Olander, L., Larsson, C., Olofsson, U., Jansson, A., Sellgren, U., 2012. A field test study of airborne wear particles from a running regional train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 226, 95–109. <https://doi.org/10.1177/0954409711408774>
- [3] Cha, Y., Olofsson, U., 2018. Effective density of airborne particles in a railway tunnel from field measurements of mobility and aerodynamic size distributions. *Aerosol Science and Technology* 52, 886–899. <https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1476750>
- [4] Colombi, C., Angius, S., Gianelle, V., Lazzarini, M., 2013. Particulate matter concentrations, physical characteristics and elemental composition in the Milan underground transport system. *Atmospheric Environment* 70, 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.035>
- [5] Fruhwirt, D., Sturm, P., Steiner, H.; Borchellini, R.; 2023; Development of a methodology for studying tunnel climate in long railway tunnels and for optimizing the design process of cross-passage cooling systems; *Tunneling and Underground Space Technology*, Volume 138; <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105194>
- [6] Fridell, E., Ferm, M., Ekberg, A., 2010. Emissions of particulate matters from railways – Emission factors and condition monitoring. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 15, 240–245. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.02.006>
- [7] Fruhwirt D., 2022. NON-EXHAUST PM EMISSIONS FROM RAILWAYS – IN-SITU MEASUREMENTS AND PARAMETER STUDY.; *Air Quality Conference 2023, Thessaloniki, Greece; June 2022*
- [8] Fruhwirt, D., Sturm, H., Steiner, H., 2021. Partikelemissionen des Schienenverkehrs – Ergebnisse aus in-situ Messungen in Tunnelanlagen/PM emissions from railway traffic – results of in-situ measurements in tunnels. *GrdL* 81, 225–233. <https://doi.org/10.37544/0949-8036-2021-05-06-71>
- [9] Heldestab J., Kljun N., 2007. PM10-EMISSIONEN VERKEHR Teil Schienenverkehr (No. 1492A-SYNTHESESBERICHT-070108.DOC). INFRAS AG, Bern.
- [10] Moreno, T., Pérez, N., Reche, C., Martins, V., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Minguillón, M.C., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X., Gibbons, W., 2014. Subway platform air quality: Assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design. *Atmospheric Environment* 92, 461–468. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.043>
- [11] Richter F., Schmidt Sch., Wolf P., 2012. Emissionen des Schienenverkehrs in Sachsen Schriftenreihe, Heft 2/2012. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Dresden.
- [12] Sturm, P., Fruhwirt, D., Steiner, H., 2022. Impact of dust loads in long railway tunnels: In-situ measurements and consequences for tunnel facilities and operation. *Tunnelling and Underground Space Technology* 122, 104328. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104328>
- [13] Fruhwirt, D., Steiner, H.; 2024; EXPERIENCES FROM FIVE YEARS OF PM MONITORING IN RAILWAY TUNNELS OF AUSTRIAN FEDERAL RAILWAYS (ÖBB); 12th International Conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz.

11

Realitätsnahe Ansätze für Brandlasten in Eisenbahntunnel

Ao.Univ.Prof.i.R. DI Dr.techn. Peter Sturm (Graz), DI Dr.techn. Michael Bacher (Graz)

Die Brandsicherheit von Tunnelanlagen ist ein zentraler Punkt in der Dimensionierung der Anlage. Während für Tunnelinnenschalen in der Regel Vorgaben auf nationaler Ebene vorliegen (z.B. RVE 08.01.01), ist dies für die Dimensionierung anderer sicherheitsrelevanter Komponenten, wie z.B. die Lüftungsanlage, nicht der Fall. Hier wird oft projektspezifisch entschieden, wobei immer eine technische Realisierbarkeit unter ökonomischen Gesichtspunkten zu beachten ist. Bei anderen sicherheitstechnischen Bauteilen, wie z.B. Querschlagstüren oder Klappen gibt es oft Anforderungen über die Brandschutzklasse, jedoch ist nicht klar, ob standardisierte Prüfbedingungen auch für Brandereignisse in Tunnelanlagen geeignet sind.

Dieser Beitrag beschreibt Dimensionierungsvorgaben für Eisenbahnprojekte am Beispiel des Koralmtunnel-Eisenbahntunnels und führt einen Vergleich zu internationalen Forschungen und Vorgaben für Straßentunnel an.

11.1 Einleitung

Brandereignisse in unterirdischen Verkehrsanlagen stellen immer eine Herausforderung für die Dimensionierung des Bauwerkes und der technischen Einrichtungen dar. Obwohl Brandereignisse sehr selten auftreten, stellen sie doch für den Betrieb der Anlage ein äußerst kritisches Szenario dar. Neben den thermischen Herausforderungen an das Bauwerk stellt der beengte Raum in einem Tunnel ein großes Hindernis für die Flucht und Rettung von Passagieren im Brandfall und in weiterer Folge für die Brandbekämpfung dar.

Als typische Beispiele für Brände im Straßentunnelbereich mit Personenschäden werden immer die Brände im Mt. Blanc Tunnel (1999), Tauerntunnel (1999) und Gotthardtunnel (2001) genannt. Diese fanden in Straßentunneln statt und führten zu einem gänzlichen Umdenken der sicherheitstechnischen Aspekte und der notwendigen technischen Voraussetzungen zur Entrauchung.

Im Eisenbahntunnel sind Brandereignisse mit Personenschäden bis dato eher auf unterirdische Haltestellen und den U-Bahnbetrieb beschränkt. Als negativer Höhepunkt für Brände in Tunneln mit schienengebundenen Fahrzeugen wird der Brand im Stollen der Kapruner Gletscherbahn genannt, bei dem im Jahr 2000 155 Personen durch Rauchgase und Hitze starben [1]. Dieses Ereignis passierte in einer sehr steilen Stollenbahn und ist mit Standardverkehrstunneln im Eisenbahnwesen kaum vergleichbar.

Eine Analyse der International Fire Academy (IFA) von Bränden in Verkehrstunneln in den Ländern Schweiz, Deutschland und Österreich im Zeitraum von 2012 bis 2023 ergab 439 Brandereignisse bzw. 3 Brände pro Monat [3]. Drei Viertel der Brände passieren in Straßentunneln, während sich das restliche Viertel auf die schienengebundenen Verkehrsträger im Lokal-, Nah- und Fernverkehr aufteilt. Während sich die Anzahl der Feuer in Straßentunneln im Beobachtungszeitraum fast verdoppelt hat, war dies bei Eisenbahntunneln nicht der Fall. Eine weitere interessante Information brachte die Studie der IFA zutage. Während bei Straßentunnel von den registrierten 331 Bränden 91% auf die Fahrzeuge (61% PKW, 25% LKW, Rest nicht zuordenbar) zurückzuführen waren, war die Brandursache in Eisenbahntunneln nur zu 22% den Fahrzeugen zuzuordnen. Fast zwei Drittel der Feuer in Eisenbahntunneln fielen in den Bereich der unterirdischen Regional- und Nahverkehrslinien inklusive Bahnsteigbereiche.

Die höhere Anzahl der Brandereignisse in Straßentunnel ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass im Straßenverkehr eine merklich höhere Anzahl von unmittelbaren Unfallverursachern und somit Branderregern unterwegs ist als im schienengebundenen Bereich; jedes Fahrzeug ist eine potenzielle Unfallquelle. Dem steht gegenüber, dass die Anzahl der transportierten Personen pro Fahrzeug (=Personenzug) natürlich im Schienenverkehr viel höher ist.

Die Risiken und Konsequenzen eines Brandes in einem Verkehrstunnel haben dazu geführt, dass international sehr hohe Anforderungen an die Bauwerkssicherheit und die Sicherstellung von Fluchtmöglichkeiten aus dem Brandbereich gestellt werden.

11.2 Dimensionierungsbrandlasten

Die EU-Richtlinie Nr. 1303/2014 [4] betrifft das Thema Sicherheit in Eisenbahntunnel im Kontext der technischen Spezifikationen für die Interoperabilität im Eisenbahnsystem der EU. Diese umfassende Richtlinie beinhaltet alle Teilsysteme: Infrastruktur, Energie, Fahrzeuge (Rollendes Material), Zugsteuerung/Zugsicherung/Signalgebung und Betrieb. In dieser Richtlinie werden Maßnahmen zur Minderung spezifischer Tunnelrisiken festgelegt. Unter Punkt 4.2.1.2 Brandwiderstand des Tunnelbauwerkes, SRT TSI 2014R1303 [4] finden sich qualitative Aussagen zur notwendigen Systemerhaltung der baulichen Struktur während des Zeitraumes der Selbstrettung, die Evakuierung von Passagieren und Bediensteten und den Eingriff von Notfallkräften (siehe auch „guide for application of SRT TSI“, Kapitel 2.3.5, [5]). Dimensionierungsvorgaben in Bezug auf zu berücksichtigende Brandlasten finden sich dort nicht.

Die UIC Richtlinie IRS 70779-9 [8] behandelt die Sicherheit in Eisenbahntunneln. Dort finden sich zwar Themen, die unter anderem die Notlaufeigenschaften des rollenden Materials behandeln und die in Zusammenschau mit der TSI 2014 1303 zu dem Erfordernis von sicheren Evakuierungsplätzen in langen Eisenbahntunneln führen. Diese technischen Richtlinien geben aber ebenfalls keine Dimensionierungsvorgaben zur Berücksichtigung von Brandereignissen vor.

Im Straßenbereich gibt es Vorgaben im Bereich von Brandlasten zur Dimensionierung von mechanischen Lüftungsanlagen, die in Form von unverbindlichen Richtlinien auf internationaler Ebene (z.B. [9]) bzw. verbindlichen Richtlinien auf nationaler Ebene (z.B. [10]) vorliegen.

Bereits der Begriff Dimensionierungsbrandlast ist nicht eindeutig festgelegt. Im Prinzip sollte ein real auftretendes Brandereignis in Form eines Zeitverlaufes der Wärmefreisetzungsrates von Beginn des Brandes bis zu einem gewünschten Endzeitpunkt wiedergegeben werden. Um ein sicheres Bauwerk und eine sichere Nutzung zu gewährleisten, ist der Brandschutz auf plausible Brandszenarien auszulegen.

Abbildung 1 rechts zeigt beispielhaft die zeitlichen Verläufe von Oberflächentemperaturen, die typischerweise zur Bemessung von tragenden Baukörpern herangezogen werden. Traditionell findet für Bauteilprüfungen oft die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) gem. ISO 834 Verwendung. Für Tunnelinnenschalen werden die Anforderungen in manchen Fällen

höher gesetzt. Die RWS (*Rijkswaterstaat*) Kurve stellt derzeit die obere Grenze der Dimensionierungsbrandlasten dar und findet dann Verwendung, wenn von sehr hohen Brandlasten ausgegangen werden muss. Anmerkung: diese Kurve wurde aus einem Brandereignis eines Tanklastzuges mit 50 m³ Benzin und einer abgeschätzten maximalen Wärmefreisetzungsrate von 300 MW abgeleitet.

Während der strukturelle Brandschutz auf Ereignisse zur Berücksichtigung maximaler Bauwerkssicherheit abzustellen ist, ist dies bei Vorgaben bezüglich der Sicherheit von Nutzern eher auf wahrscheinliche Ereignisse zu beziehen. Nach Auftretenswahrscheinlichkeit sind Brände in Reisezügen sehr wohl möglich, ein gleichzeitiger Vollbrand mehrerer mit Treibstoff beladener Güterwaggons eher nicht, bzw. wären bei derartigen Bränden die notwendigen Maßnahmen zur Bewältigung der Rauchmengen und Eindämmung des Brandes unverhältnismäßig hoch. Abbildung 1 links zeigt den bei den beiden Tunnelprojekten Koralmtunnel und Semmering-Basistunnel zur Lüftungsdimensionierung verwendeten Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bei einem Brand eines Reisezuges.

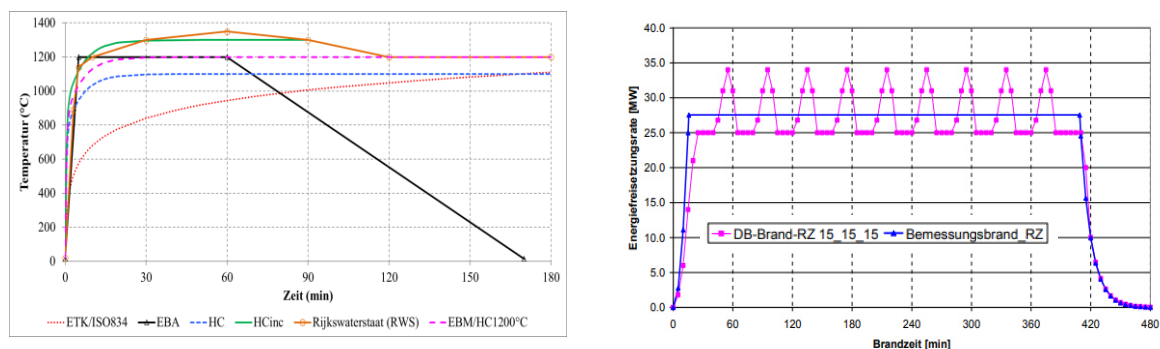


Abbildung 1 Wärmefreisetzungsrate als Funktion der Zeit, links: Temperaturverlauf für Bauwerke und Einbauten, rechts: Wärmefreisetzungsrate für Lüftungsdimensionierung

Bei Dimensionierungsvorgaben für Lüftungsanlagen wird in der Regel der zeitliche Verlauf einer Wärmefreisetzungsrate negiert und ein Maximalwert stationär vorgegeben. Die Brandlast ist stark abhängig vom betrachteten Fahrzeug. Tabelle 1 zeigt die Bandbreite von maximalen Wärmefreisetzungsraten in Abhängigkeit der Brandquelle.

Fahrzeug	Max. Wärmefreisetzungsrate	Quelle	Anmerkung
PKW	3-5 MW	PIARC 0	
Bus	20 – 30 MW	PIARC 0	
LKW	30 – 50 MW	PIARC 0, RVS 0	
LKW	bis 100 MW	RE-Ing 0	Nur bei sehr hohem LKW Anteil
Tanker	200 MW	NL, USA 0	
Personenzug-Waggon	7 – 43 MW	Ingason et al. 0	
Hochgeschwindigkeitszug	30 – 36 MW	Zhu et al. 0	
Güterzug-Waggon	bis 250 MW		Tankwagen Brand
Reisezug Waggon	30 MW	RVE 0	

Tabelle 1 Maximale Wärmefreisetzungsraten von Fahrzeugen

Die meisten der in Tabelle 1 genannten Angaben finden bei der Dimensionierung von Straßentunnel Verwendung und sind auch national in Richtlinien (z.B. RE-Ing [11], RVS 09.02.31 [10] oder NFPA 502 [12]) festgelegt.

Im Eisenbahnbereich sind die Vorgaben für Lüftungstechnische Dimensionierungen eher projektspezifisch. Für den Personenschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken gibt z.B. die RVE 08.01.01 [7] einen Wert von 30 MW (Personenzugwagen) als maximale Wärmefreisetzungsrate, stationär über den Zeitraum der Selbst- und Fremddrettung (Nachweiszeit), vor. Anders ist dies beim Objektschutz. Hier wird gemäß dieser RVE auf das Schutzniveau abgestellt. Bezüglich thermischer Einwirkung wird dann von einem Mischverkehr mit einer zugehörigen maximalen Wärmefreisetzungsrate von 210 MW ausgegangen. Als Temperatur-Zeitkurve wird der Verlauf der HC_{1200°C} Kurve (ÖNORM EN 1991-1-2:2013) vorausgesetzt.

Tabelle 2 enthält Wärmefreisetzungsraten, die bei Eisenbahntunneln zur Bemessung der Belüftung herangezogen wurden.

Tunnel	Max. Wärmefreisetzungsrate	Anforderung
Gotthard-Basistunnel	20 MW 40 MW	Personenzugbrand, – dimensionierungsrelevant, gleichzeitig 2 Wagons
	250 MW	Szenario Brand Rollende Landstraße – 45 Min Rauchabsaugung muss möglich sein
Koralm Tunnel, Semmering-Basistunnel	28 MW 100 MW	ICE-Reisewagen (Bemessungsbrandlast Lüftung) Triebfahrzeug Diesellok (brandschutztechnische Spezifikation Klappen, Türen)

Tabelle 2 Maximale Wärmefreisetzungsraten bei Lüftungsdimensionierungen und anderen technischen Einrichtungen

11.3 Brandschutztechnische Anforderungen an Türen und Lüftungstechnische Bauteile in den Querschlägen

Da Fluchtwege ein wesentlicher Bestandteil der Sicherheit von Eisenbahntunneln sind, erfordern die Fluchttüren selbst besondere Aufmerksamkeit. Die Türen müssen so stabil sein, dass sie den hohen Druckschwankungen des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs standhalten und zudem hohen Temperaturen trotzen.

Wie in den obigen Kapiteln angeführt, definieren verschiedene Vorschriften die Temperaturanforderungen, z.B. für Betonoberflächen. Diese Anforderungen legen Temperaturwerte und Einwirkzeiten in Form von Zeit-Temperatur-Kurven fest. Da es keinen einheitlichen

internationalen Standard gibt, werden derartige Anforderungen weitgehend projektbezogen auf Basis des gegenwärtigen Wissensstandes festgelegt. Dabei ist immer eine Abwägung zwischen technisch Möglichem und ökonomisch Umsetzbaren anzustellen.

Im Zuge der Planung des Koralmtunnels wurden bereits im Vorfeld derartige Untersuchungen angestellt [14]. Um eine realistische Temperaturanforderung für Tunneltüren zu definieren, wurden numerische Untersuchungen durchgeführt, wobei eine maximale Wärme-freisetzungsrate von 100 MW (siehe Tabelle 2) als thermische Randbedingung diente. Gleichzeitig erfolgte ein Vergleich mit Temperatur-Zeit-Verlauf Kurven aus Realbrandversuchen. Die Brandquelle wurde in unmittelbarer Nähe stromaufwärts der Fluchttüre gesetzt. Diese erfolgte unter der Rahmenbedingung, dass Fluchttüren im direkten Bereich des Brandherdes nicht genützt werden. Abbildung 2 zeigt das Ergebnis nach 10 min Brandentwicklung. Während im Tunnelinneren die maximalen Temperaturen auf über 1700°C als Spitzenwert ansteigen, liegt die Spitzenbelastung an der nächsten Querschlagstüre außen bei 1095°C. Dies sind jedoch nur punktuell auftretende Temperaturen.

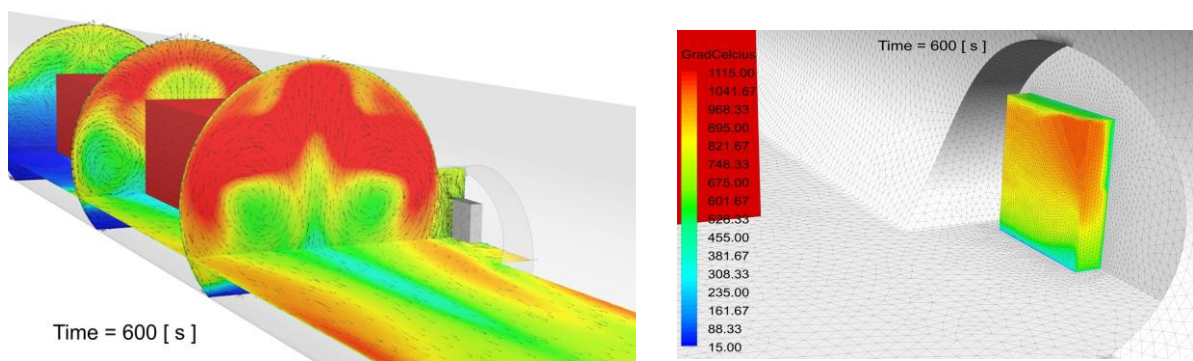


Abbildung 2 Temperaturverteilung aus CFD Simulation eines 100 MW Brandes, links Fahr-
raum, rechts Detail Querschlagstüre

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturentwicklung an der Oberfläche der Querschlagstüre im Vergleich zu den Testbedingungen nach ETK, HC oder HC_{inc}. Dargestellt ist der Verlauf der berechneten maximalen Temperatur (CFD-T_{max}) sowie der sogenannten „flächengemittelten“ (auf die Türfläche bezogenen) Temperaturen (CFD-T_{average}) [14]. Es ist ersichtlich, dass die flächengemittelte Gastemperatur an der Türoberfläche ab einer Einwirkzeit von 30 Minuten unterhalb der ETK zu liegen kommt. Der Maximalwert der flächengemittelten Temperatur an der Türaußenseite liegt bei 860°C und somit unter dem ETK Wert von 1000°C.

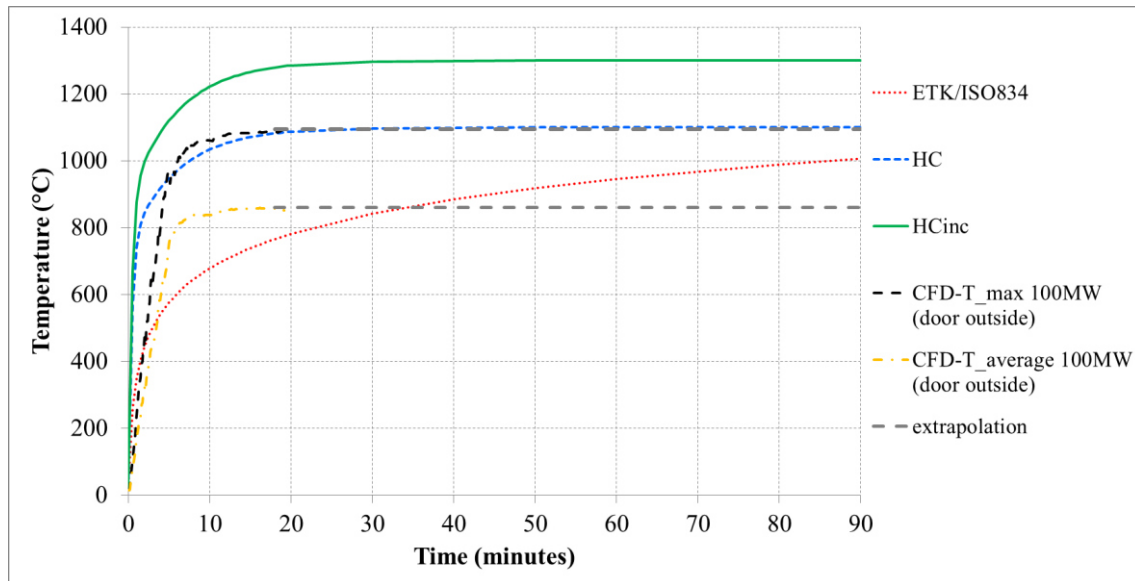


Abbildung 3 Vergleich typischer Temperatur-Zeit -Verlauf Kurven mit der zeitabhängigen Gas Temperatur an der Oberfläche der Querschlagstür bei einer Brandlast von 100 MW

Tabelle 3 zeigt Kennwerte der Temperaturbelastung der Querschlagstüre gemäß unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Verlauf Kurven sowie das Ergebnis der 100 MW CFD Belastung. Betrachtet man die relevanten Größen, wie den spezifischen Wärmeeintrag und die maximale flächengemittelte Temperatur, so erkennt man, dass die ETK/ISO 834 Kurve den 100 MW Brand sehr gut abbildet.

	Spez. Wärmeeintrag (zeitgemittelte Temperaturerhöhung)	Max. flächengemittelte Temperatur	Max. lokal auftretende Temperatur
HC _{inc}	1249 K	1300°C	1300°C
HC	1054 K	1100°C	1100°C
ETK	838 K	1000°C	1000°C
100 MW Türe außen	816°K	860°c	1095°C

Tabelle 3: Temperaturbelastung der Fluchttüre für unterschiedliche Brandkurven und der durchgeführten Berechnungen [14]

Durch den Einbau entsprechender Brandschutztüren der Klassifikation Ei 90 ($v_e, i_{\leftrightarrow 0}$) S gemäß ÖNORM EN 13501-3:2009 und einer Feuerwiderstandsprüfung nach DIN 1366-2:2015 unter den Beflammungsbedingungen der Einheits-Temperaturzeitkurve nach ÖNORM EN 13501-3:2009 wird ein adäquater Raumabschluss sichergestellt.

Am Koralmtunnel kommen neben Fluchttüren bei jedem Querschlag auch Druckschutzklappen mit einer Klappenblattfläche von ca. 0,125 m² zum Einsatz. Diese Druckschutzklappen können aus technischen Gründen nicht mit einem isolierten Klappenblatt ausgeführt werden. Um eine Selbstzündung von Anlagenteilen im Querschlag auszuschließen, ist

daher nachzuweisen, dass die Strahlungsflussdichte des Klappenblattes $\leq 15 \text{ kW/m}^2$ in einem Abstand von 1 m zum nächsten – hinter der Türe im Querschlag liegenden – Anlagenteil beträgt.

Die Wärmestrahlung wird von der heißen Oberfläche entsprechend dem Stefan-Boltzmann-Gesetz $P = \epsilon \sigma T^4$ an die Umgebung abgegeben. Dabei ist ϵ der Emissionsgrad und σ die Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$). Da sich die abgestrahlte Energie im Raum verteilt, trifft in einem Meter Entfernung nur ein Teil davon auf benachbarte Bauteile. Eine einfache Abschätzung der Strahlungsleistung lässt sich mit der Kombination aus Stefan-Boltzmann-Gesetz und geometrischer Näherung nach Formel (1) durchführen:

$$E \approx \frac{\sigma \cdot \epsilon \cdot T^4 \cdot A}{\pi \cdot r^2} \quad (1)$$

Hierbei steht A für die Fläche der strahlenden Quelle und r für den Abstand. Bei einer heißen Oberfläche mit $T = 1000^\circ\text{C} = 1273 \text{ K}$, einem Emissionsgrad $\epsilon = 0,9$ (angenommen) und einer Klappenfläche (= strahlende Quelle) von $A = 0,125 \text{ m}^2$ ergibt sich bei einem Abstand von 1 m eine Strahlungsflussdichte von etwa $E \approx 5,4 \text{ kW/m}^2$.

Dieser Wert liegt deutlich unter der maximal zulässigen Strahlungsflussdichte von 15 kW/m^2 , sodass keine Selbstzündungsgefahr für angrenzende Anlagenteile besteht und auch in diesem Fall ein sicherer Abschluss zur Brandröhre besteht.

11.4 Zusammenfassung

Die Brandsicherheit von Tunnelanlagen ist ein zentraler Punkt in der Dimensionierung der Anlage. Während für Tunnelinnenschalen in der Regel Vorgaben auf nationaler Ebene vorliegen (z.B. RVE 08.01.01, HC₁₂₀₀ Kurve), ist dies für die Dimensionierung anderer sicherheitsrelevanter Komponenten, wie z.B. die Lüftungsanlage, nicht der Fall. Hier wird oft projektspezifisch entschieden, wobei immer eine technische Realisierbarkeit unter ökonomischen Gesichtspunkten zu beachten ist. International hat sich gezeigt, dass z.B. Lüftungsanlagen für die Personenrettung ausgelegt werden, wobei die Brandlasten um die 20 bis 40 MW schwanken. Gleichzeitig werden auch Szenarienbetrachtungen angestellt, die punktuell höhere Brandlasten betrachten (z.B. einzelne Güterzugwaggons oder Diesellokomotiven), aber in der Regel nicht dimensionierungsrelevant sind. Betrachtet man Komponenten wie Querschlagstüren, so konnte nachgewiesen werden, dass mit Prüfbedingungen nach Vorgaben der Einheits-Temperatur-Zeit-Verlauf Kurve (ETK) in der Regel das Auslangen gefunden werden kann.

Literatur

- [1] fireworld.at, <https://www.fireworld.at/2020/11/11/geschichte-die-seilbahn-katastrophe-von-kaprun-am-11-november-2000/> (Zugriff 20.10.2025)
- [2] BMIMI: Bericht über Brände und Unfälle in Tunnelanlagen 1999 – 2023, Bericht gemäß § 3 Abs 8 STSG beziehungsweise EU-Direktive 2004/54/EG, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMIMI), 2024
- [3] IFAB, Tunnel fires from 2012 to 2023 – International Fire Academy analyses media reports, September 2024: <https://www.ifa-swiss.ch/en/magazine/detail/tunnel-fires-from-2012-to-2023-statistics-from-media-reports>
- [4] EU Nr. 1303/2014 der Kommission vom 18.11.2014, Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der Sicherheit in Eisenbahntunneln im Eisenbahnsystem der Europäischen Union, Version vom 29. Jänner 2024, ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/1303/2024-01-29>, Zugriff: 20.10.2025
- [5] EAR, Guide for the application of the SRT TSI. In accordance with Article 19(3) of Regulation (EU) 2016/796 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016, www.era.europa.eu (Zugriff 28.10.2025)
- [6] EAR, Guide for the application of the CCS TSI In accordance with Article 19(3) of Regulation (EU) 2016/796 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016, www.era.europa.eu (Zugriff 28.10.2025)
- [7] FSV: RVE 08.01.01 Tunnel und tunnelähnliche Bauwerke, Baulicher Brandschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, Dezember 2018
- [8] UIC 70779-9: Safety in railway tunnels, Union Internationale des Chemins de Fer, 01.06.2021
PIARC: Design fire characteristics for road tunnels; technical Report 2017R01EN, ISBN: 978-2-84060-471-6, 2017
- [9] FSV: RVS 09.02.31 Tunnelausrüstung Belüftung Grundlagen, Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr, Wien, 2014
- [10] RE-ING: Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten (RE-ING), 2023/03, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Deutschland
- [11] NFPA: NFPA 502, Standards for Road Tunnels, Bridges, and other Limited Access Highways, 2026
- [12] H. Ingason, Y.Z. Li, A. Lönnemark: Tunnel fire dynamics, Springer Verlag ISBN 978-1-4939-2198-0, 2015
- [13] H. Steiner, M. Beyer, P. Sturm: Requirements for escape doors in the tunnels of the Koralm railway line – special focus on thermal loads during fire, in 9th Symposium Tunnel Safety and Ventilation, June 2018, Graz Austria, ISBN: 978-3-85125-606-2, https://tunnel-graz.at/assets/files/tagungsbaende/Tunnel-Safety-and-Ventilation-GRAZ-09_2018.pdf (Zugriff 3.11.2025)
- [14] Y. Zhou, H. Wang, B. Haiquan, L. Xiaoxia und G. Qilin, "Heat release rate of high-speed train fire in railway tunnels," Tunnelling and Underground Space Technology, Jg. 2020, Nr. 105, S. 1–13, 2020, doi: 10.1016/j.tust.2020.103563

12

Die Zukunft der Bahn mitgestalten – F&E bei der ÖBB-Infrastruktur AG

Dr. Vesna Micić Batka (Wien), Dr. Thomas Petraschek (Wien)

Die ÖBB-Infrastruktur AG (ÖBB-Infra) spielt eine entscheidende Rolle bei der Mobilitätswende. Das Unternehmen strebt eine Erhöhung der Kapazitäten für den Umstieg auf die Schiene, eine Stärkung des ökologischen Wettbewerbsvorteils sowie eine Steigerung der Produktivität und Effizienz der Bahn an. Dabei unterstützt Forschung und Entwicklung (F&E) die Suche nach innovativen Lösungen, um das volle Potenzial der Eisenbahn auszuschöpfen. In Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Akteuren aus Wissenschaft und Industrie erforscht und demonstriert die ÖBB-Infra Wege zur Erhöhung der Kapazitäten, u. a. durch Simulationen im Digitalen Zwilling, KI-unterstützte und automatisierte Steuerung auf freier Strecke und im Vershubknoten. Mithilfe von Smart-Sensorik und Robotik erforscht die ÖBB-Infra, wie sich die Instandhaltungsmaßnahmen der Infrastruktur in eine präventive bzw. vorausschauende Instandhaltung umwandeln lässt, um die Produktivität zu steigern. Dazu erforscht die ÖBB-Infra Lösungen (inklusive Materialien, Verfahren, Design und Planung), die die Schlüsselkomponenten der Bahninfrastruktur verbessern und die Treibhausgasemissionen beim Infrastrukturbau reduzieren können. Im Mittelpunkt der F&E-Aktivitäten stehen auch die Erhöhung der Klimaresilienz der Infrastruktur durch die Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung von Versagens- und Schadensrisiken sowie von Verkehrsunterbrechungen durch vom Klimawandel verursachte Extremwetterereignisse. Entsprechend der in ihrer Strategie verankerten Ziele ebnet die F&E der ÖBB-Infra den Weg für die Zukunft der Bahn.

12.1 Einleitung

Die ÖBB-Infra steht im Zentrum der Mobilitätswende in Österreich und gestaltet aktiv die Zukunft des Bahnverkehrs. Als Rückgrat eines nachhaltigen, leistungsfähigen und kundenorientierten Mobilitätssystems übernimmt sie eine Schlüsselrolle bei der Transformation des Verkehrssektors. Durch die Bereitstellung effizienter, sicherer und umweltfreundlicher Transportmöglichkeiten trägt sie zur Erreichung der europäischen Klimaziele bei [1].

Um ihre Rolle verantwortungsbewusst auszufüllen, verfolgt die ÖBB-Infra im Rahmen ihrer Grundsatzstrategie #INFRA.Mobilitätswende [2] folgende strategische Ziele: eine Erhöhung der Kapazitäten für den Umstieg auf die Schiene sowie die Stärkung des ökologischen Wettbewerbsvorteils und Steigerung von Produktivität und Effizienz der Bahn. Dabei werden hohe Sicherheits- und Pünktlichkeitsstandards eingehalten.

Die Forschung und Entwicklung (F&E) leistet einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung dieser Ziele. Sie fördert nicht nur ein zukunftsorientiertes System Bahn, sondern treibt auch innovative Lösungen voran, um das volle Potenzial der Eisenbahn auszuschöpfen.

Die aktuelle F&E-Strategie der ÖBB-Infra, #INFRA.F&E_fit30 [3], bildet dazu die Grundlage für die Weiterentwicklung der Eisenbahn in Österreich. Für das System Bahn stellt sie ein Zielbild bereit – mit einer Perspektive bis 2030. Der Fokus liegt dabei auf den Tophemen zur Erreichung der Ziele der ÖBB-Infra entlang der Dimensionen Kapazität, Produktivität, Qualität und Dekarbonisierung.

Die F&E der ÖBB-Infra übernimmt dabei die Rolle eines Impulsgebers für das künftige System Bahn. Der Weg zur Verwirklichung der Zukunft der Bahn erfolgt durch die Erreichung der folgenden, in der #INFRA.F&E_fit30-Strategie verankerten Ziele:

- I Die europäisch harmonisierte, hochautomatisierte Steuerung des Systems Bahn auf freier Strecke und im Vershubknoten.
- I Zuverlässige, integrationsfähige Bahninfrastruktur und dazugehörige Vorhersagemodelle sowie Automatisierungslösungen.
- I Reduktion der CO₂-Emissionen der Bahninfrastruktur und Erhöhung der Resilienz des Systems Bahn gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels.

Zur Realisierung dieser strategischen F&E-Ziele wurden folgende Stoßrichtungen definiert, die Themenbereiche für F&E-Initiativen und Projekte beinhalten:

- I Intelligentes Kapazitätsmanagement
- I Vershub & Zugvorbereitung
- I Smart Assets & Predictive Maintenance
- I Schlüsselkomponenten der Infrastruktur

- I Emissionsreduktion & Klimaresilienz der Bahninfrastruktur
- I Simulation im Digitalen Zwilling

Aktuell werden zahlreiche F&E-Projekte sowohl auf internationaler als auch nationaler Ebene durchgeführt. Die F&E-Landkarte der ÖBB-Infra (Abbildung 1) gibt einen Überblick, über die Themenbereiche, an denen F&E mitwirkt.

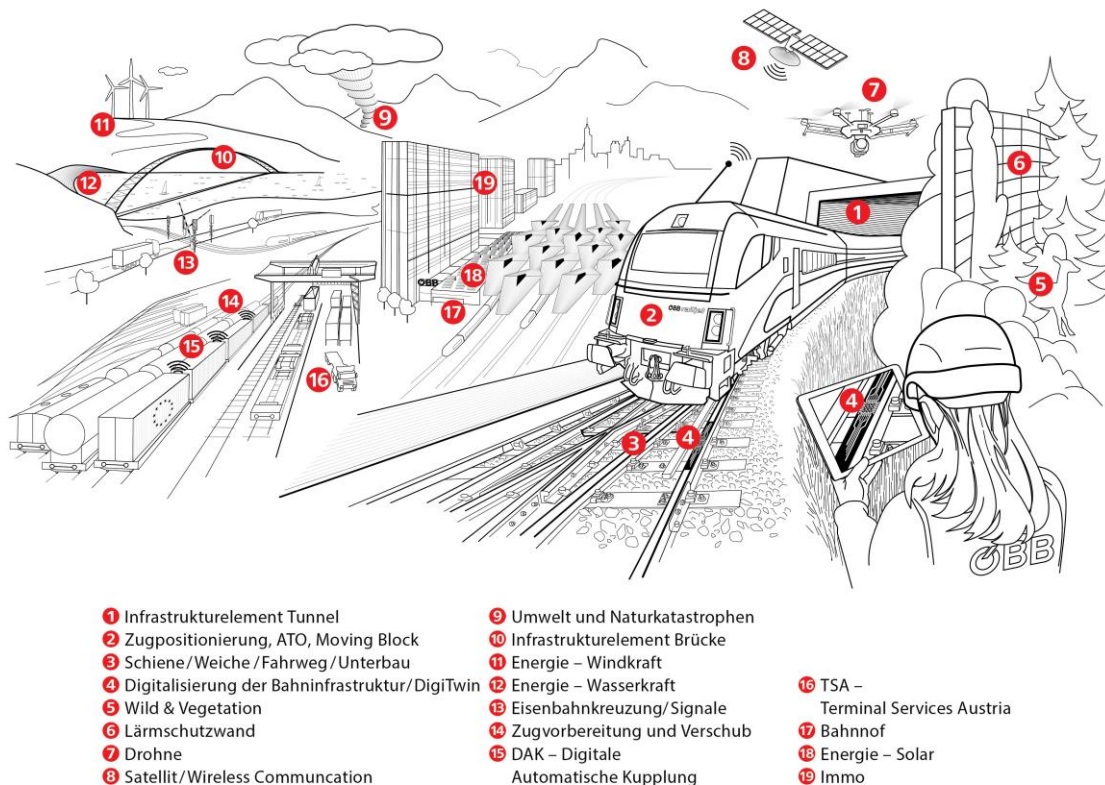


Abbildung 1 F&E-Landkarte der ÖBB-Infra (adaptiert aus [4]).

Um F&E-Projekte erfolgreich umzusetzen, baut die ÖBB-Infra ein leistungsfähiges F&E-Ökosystem auf und setzt dabei auf Kooperationen mit nationalen und europäischen Stakeholdern und Partnern aus den Bereichen Wissenschaft, Industrie sowie fördernden und regulierenden Stellen. Gleichzeitig strebt die ÖBB-Infra nach Exzellenz in ihren F&E-Vorhaben. Als Gründungsmitglied ist die ÖBB federführend im größten europäischen Forschungsprogramm für das System Bahn, dem „Europe’s Rail Joint Undertaking“ (ERJU).

12.2 Intelligentes Kapazitätsmanagement

Diese Stoßrichtung umfasst die folgenden Vorhaben:

- I Optimierung des Traffic-Management-Systems (**TMS**) mithilfe von Künstlicher Intelligenz (**KI**). Anders als bei traditionellen TMS, das auf vordefinierten Regeln und

festgelegten Fahrplänen basiert, sollte durch den Einsatz von KI eine Echtzeitanalyse der Betriebssituation ermöglicht werden. Das KI-optimierte TMS soll auf Basis umfangreicher Daten und intelligenter Algorithmen präzise Vorhersagen über mögliche betriebliche Konflikte treffen, Trassen priorisieren und ungewünschte Situationen, wie etwa Verspätungen schnell lösen.

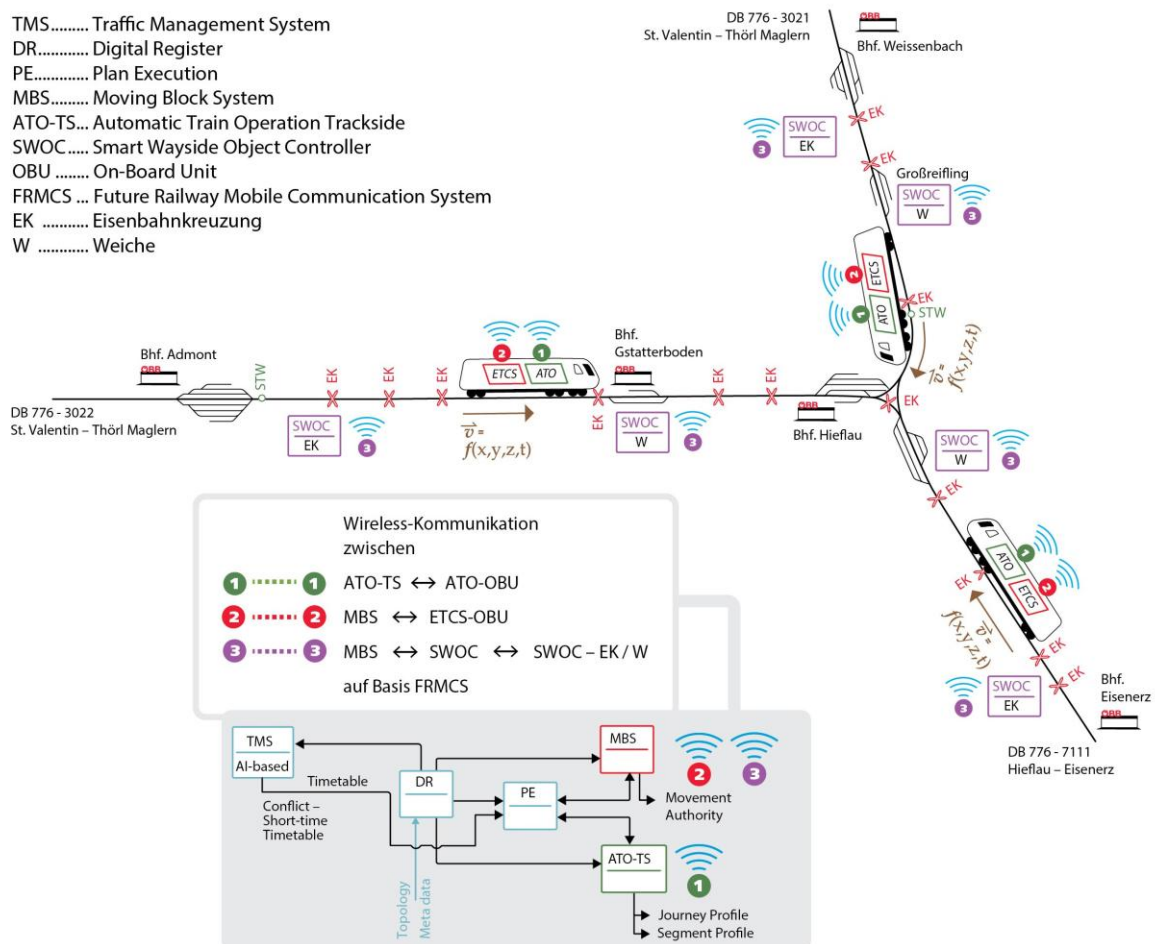
- I Einführung des European-Train-Control-Systems (ETCS)-Moving Block (oder Moving-Block System, **MBS**). Im Gegensatz zum starren „Fixed Block“-System, bei dem die Strecke in feste Abschnitte unterteilt ist, und jeder Abschnitt nur von einem Zug befahren werden kann, was die Streckenkapazität stark begrenzt, bietet das MBS die Möglichkeit die Kapazität erheblich zu steigern. Das MBS ermöglicht dynamische Abstände zwischen den Zügen, die auf Grundlage der aktuellen Geschwindigkeit und der Bremswege berechnet werden, sodass Züge dichter hintereinanderfahren können.
- I Einführung des automatischen Zugbetriebs („Automatic Train Operation“, **ATO**) auf einer gewissen Automatisierungsstufe X („Grade of Automation X“, **GoA X**). Aktuell erfolgt die Steuerung der Züge vollständig manuell durch die Lokführer. Menschliche Faktoren bei der Überwachung der Geschwindigkeit, beim Bremsen und bei der Einhaltung des Fahrplans beeinflussen die Pünktlichkeit, den Energieverbrauch und können ein Sicherheitsrisiko darstellen. ATO GoA X, das automatische Zugbetriebssystem, soll die fehlenden Optimierungen in der Fahrweise übernehmen und den Betrieb präziser steuern.

Im Hinblick auf diese Themen forscht die ÖBB-Infra im Rahmen der ERJU um durch Digitalisierung, Automatisierung und die Anwendung innovativer Technologien die Voraussetzungen für eine Steigerung der Kapazität und Leistungsfähigkeit des Systems Bahn zu schaffen. Dabei strebt sie an, ein KI-optimiertes TMS auf der Strecke zu demonstrieren, das mit MBS und ATO GoA X in eine gesamthafte Systemlandschaft integriert ist. Ein Konzept für einen solchen Demonstrator wurde bereits entwickelt und ist in Abbildung 2 dargestellt.

12.3 Verschub & Zugvorbereitung

Der Fokus in dieser Stoßrichtung liegt auf dem europaweit harmonisierten, hochautomatisierten Verschub und der digitalisierten Zugvorbereitung. Da der Verschub immer noch zu einem großen Teil manuell durchgeführt wird und sich die aktuellen Entwicklungen der Digitalen Automatischen Kupplung (DAK) nur unzureichend in bestehende Systeme integrieren lassen, werden umfassende europäische Lösungen erarbeitet. Diese sollen die Tätigkeiten sowohl in Infra-Knoten als auch in der Fläche automatisieren.

Mithilfe dieser Lösungen sollen durch Digitalisierung und Automatisierung die Voraussetzungen für eine Steigerung der Produktivität im Verschub sowie eine Optimierung des Personaleinsatzes geschaffen werden. Einige Forschungsaspekte werden in die in Abbildung 2 dargestellten Konzepte integriert.



12.4 Smart Assets & Predictive Maintenance

123

Die F&E-Aktivitäten konzentrieren sich hier einerseits auf die Weiterentwicklung moderner Sensor- und digitaler Schlüsseltechnologien, die Zustandsdaten in Echtzeit erfassen und analysieren können. So lassen sich potenzielle Probleme frühzeitig erkennen, bevor diese zu ernsthaften Störungen oder Ausfällen führen können. Unter anderem werden dazu sogenannte „intelligente“ Messschrauben entwickelt. Diese ermöglichen eine automatische Überwachung des Vorspannkraftzustands von Schraubverbindungen an Weichenherzstücken während des Bahnbetriebs. Eine damit mögliche Früherkennung kritischer Vorspannkraftzustände bildet die Grundlage für Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) und vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) [5].

Andererseits wird in der ÖBB-Infra an einem Übergang von visuellen und manuellen zu automatischen und womöglich autonomen, robotergestützten Inspektions- und Wartungstätigkeiten geforscht. Mithilfe dieser Lösungen soll nicht nur die Produktivität gesteigert, sondern auch der Personaleinsatz optimiert werden. So wird beispielsweise der sogenannte *Tunnel Drainage Rover* (Abbildung 3) entwickelt, ein Inspektionsroboter, der bei ungestörtem Zugbetrieb die Tunneldrainage inspizieren kann [5-6]. Er wird autonom fahren und Bildmaterial vom Inneren des Drainagerohres aufnehmen. Mithilfe von KI werden die Karbonatablagerungen („Versinterungen“) und eventuelle Beschädigungen der Drainage automatisch klassifiziert, wodurch die Erstellung zustandsorientierter und vorausschauender Instandhaltungspläne unterstützt wird.

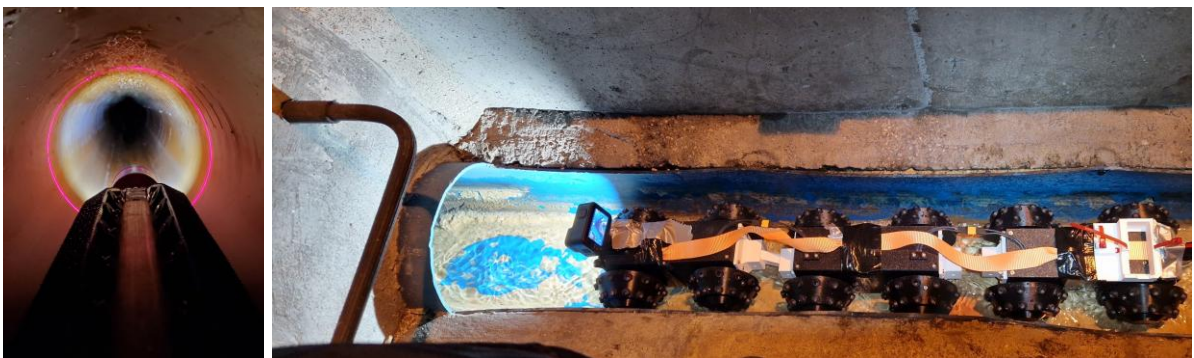


Abbildung 3 Zwei Prototypen des „Tunnel Drainage Rover - TDR“ wurden im Siebertunnel (Österreich) getestet. Links: TDR mit Kettenantrieb. Rechts: TDR mit Radantrieb. Fotos: Linz Center of Mechatronics GmbH.

12.5 Schlüsselkomponenten der Infrastruktur

In dieser Stoßrichtung werden Lösungen für Infrastrukturkomponenten wie Gleise, Oberleitungen, Steuerungstechnik, Sicherheitstechnik, Brücken und Tunnel erforscht, die an den zukünftigen Betrieb mit mehr Zügen, schwereren Gütern und höheren Geschwindigkeiten angepasst sind. Dafür werden neue hochleistungsfähige Materialien (z.B. nichtmetallische Bewehrung) und Bauverfahren (z.B. 3D-Druck) untersucht. Zudem werden die

Strukturen, Funktionalität und das Design einzelner Infrastrukturkomponenten optimiert und ihre Dauerhaftigkeit geprüft.

Weiter werden innovative Lösungen für die Regionalbahnen konzipiert und erprobt. So sollen beispielsweise kabellose und autarke Anlagen (etwa an Eisenbahnkreuzungen) sowie interoperable und modulare Energiesubsysteme für stationäre Anwendungen (beispielsweise Brennstoffzellen, Photovoltaik oder Wärmepumpen) zum Einsatz kommen.

Diese Lösungen sollten einerseits leistungsfähige Strecken durch Europa stärken, die hohen Belastungen und Schwingungen standhalten müssen, und andererseits regionale Strecken, um Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des gesamten Systems Bahn zu erhöhen.

12.6 Emissionsreduktion & Klimaresilienz der Bahninfrastruktur

Im Vergleich zu anderen Massenverkehrsmitteln sind die Treibhausgasemissionen (THG = CO₂, CH₄, N₂O und F-Gase) während des Zugbetriebs und über die Lebensdauer der Bahninfrastruktur geringer. Aufgrund des hohen Verbrauchs von Beton und Stahl bleiben die THG-Emissionen beim Bau und der Instandhaltung der Bahninfrastruktur jedoch hoch. Die F&E der ÖBB-Infra strebt daher Lösungen zur Reduktion der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus der Bahninfrastruktur an. Diese umfassen eine effizientere und strukturoptimierte Anlagenplanung mit erhöhter Materialeffizienz. Darüber hinaus wird der Einsatz von THG-reduzierten Materialien, wie beispielsweise Beton mit alternativen Bindemitteln oder Rezyklaten, erforscht.

Auch Maßnahmen zur Reduzierung unerwünschter, von Betroffenen als Lärm wahrgenommener Schallemissionen, werden weiter erforscht. Mithilfe virtueller Modelle wird die Schallausbreitung an der Quelle z.B. bei der Weiche simuliert und die Wirkung schallreduzierender Maßnahmen prognostiziert. Außerdem werden bauliche Lärmschutzmaßnahmen zur Reduzierung von Bahnlärm im Ausbreitungsweg unter Berücksichtigung der Verwendung THG-emissionsarmer Materialien untersucht.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt auf der Klimaresilienz der Bahninfrastruktur. Dazu gehört die Reduzierung der Auswirkungen der mit dem Klimawandel verbundenen Extremwetterereignisse und eine bessere Vorbereitung auf solche Ereignisse, sowie eine optimierte Risikokommunikation entlang der ÖBB-Infra. Konkret werden Sensoren, Modelle und Entscheidungstools für das Monitoring und die Vorhersage zur Früherkennung von Naturgefahren für die Bahninfrastruktur weiterentwickelt.

Mit dieser Stoßrichtung sollen generell die Voraussetzungen für die Erreichung der Dekarbonisierung und Klimaresilienz sowie für eine höhere Verfügbarkeit des Systems Bahn geschaffen werden.

12.7 Simulation im Digitalen Zwilling

Diese Stoßrichtung ist mit allen anderen Stoßrichtungen verflochten, da sie eine zentrale Grundlage für die Modellerstellung, Analyse, Validierung und Vorhersage in einer virtuellen Repräsentation der komplexen Infrastrukturnetze bildet. Diese Komplexität zeichnet sich durch n Freiheitsgrade, Nichtlinearitäten, Wechselwirkungen und Rückkopplungen aus. Die virtuelle Repräsentation der komplexen Infrastrukturnetze erfolgt durch eine strukturierte Layer-Architektur, die unter anderem die Bereiche Anlagen (z. B. Weichenperformance), Betrieb (z. B. Pünktlichkeitsperformance), Energie (z. B. Energieerzeugung) und Finanzen (z. B. Finanzierung von Instandhaltung) umfasst.

In den hochkomplexen Infrastrukturnetzen ist die Implementierung datengetriebener Entscheidungsprozesse durch Simulationen in zwei Bereichen vorgesehen: (a) systemischer Szenarien, wie der Einsatz neuer Materialien, Komponenten, Abläufe und Prozesse sowie die Entwicklung von Energienetzen, und (b) unterschiedlicher Betriebsmodi.

Zu diesem Zweck wurde eine Roadmap entwickelt, die den Weg zu Echtzeitsimulationen im komplexen System der Infrastrukturnetze aufzeigt. Die Roadmap Infrastrukturnetze stützt sich auf einen **Digitalen Zwilling**. Darauf aufbauend erfolgt der Einsatz moderner **KI-Methoden** wie Data Mining, Generative KI und Machine-Learning-Techniken, einschließlich Reinforcement Learning, um komplexe Zusammenhänge zu analysieren und Prognosen zu ermöglichen. Ein Schritt zur Skalierbarkeit rechenintensiver Analysen und Simulationen ist die Nutzung leistungsfähiger **Computing-Methoden**, darunter High Performance Computing, Quantencomputing und Cloud Computing. Parallel dazu werden optimierte **Algorithmen** entwickelt, die speziell auf die eingesetzten Computing-Methoden abgestimmt sind. Diese umfassen intelligentes Workload-Management sowie die Implementierung verteilter Berechnungsverfahren. Grundsätzlich wird das tiefe Domänen-Know-how benötigt, das sich in der **Modellbildung, Parametrierung** und im **Pre-Processing** widerspiegelt. Hier kommen beispielsweise intelligente Verfahren zur Verarbeitung von Inputdaten zum Einsatz, wobei Edge-AI genutzt wird, um Analysen und Lösungsentwicklungen direkt am Asset durchzuführen. Im Anschluss folgt das **Post-Processing**, das interaktive Benutzeroberflächen für die Steuerung von Simulationen bereitstellt. Dabei werden Echtzeitvisualisierungen und Reporting-Funktionen integriert, um eine fundierte Entscheidungsfindung zu gewährleisten.

12.8 Zusammenfassung

Die ÖBB-Infra spielt eine Schlüsselrolle bei der Transformation des österreichischen Verkehrssektors. Die F&E der ÖBB-Infra leistet einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung ihrer Ziele: Die Erhöhung der Kapazitäten für den Umstieg auf die Schiene, eine Stärkung des ökologischen Wettbewerbsvorteils sowie die Steigerung von Produktivität und Effizienz der Bahn. Die F&E-Strategie der ÖBB-Infra, #INFRA.F&E_fit30, stellt ein Zielbild für die Zukunft der Bahn bereit.

Mithilfe von Technologien wie Künstlicher Intelligenz, High Performance Computing und Cybersecurity, dem Internet of Things, automatisierten oder autonomen Technologien (Mechatronik, Robotik), Sensor-Fusion und generativem Design sowie innovativen Materialien werden in diversen Bereichen neue Wege beschritten. Diese werden im Digitalen Zwilling simuliert und anhand von Demonstratoren erprobt. Zu den Bereichen zählen die Erhöhung der Kapazitäten des Netzes, die Automatisierung des Verschubs, die vorausschauende Instandhaltung von Assets, die Leistungsfähigkeit der regionalen und europäischen Strecken und Bereitstellung einer dekarbonisierten und klimaresilienten Infrastruktur. Dafür baut die ÖBB-Infra ein leistungsfähiges F&E-Ökosystem auf, kooperiert mit nationalen sowie europäischen Stakeholdern und Partnern und strebt exzellente Lösungen für die Bahn der Zukunft an.

Literatur

- [1] European Commission: Directorate-General for Communication, The European Green Deal – Delivering the EU's 2030 climate targets, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2775/717955>.
- [2] Die Grundsatzstrategie der ÖBB-Infrastruktur AG. Herausgeber: ÖBB-Infrastruktur AG, Wien, 2021.
- [3] Die F&E-Strategie der ÖBB-Infrastruktur AG. Herausgeber: ÖBB-Infrastruktur AG, Unternehmensentwicklung, Forschung & Entwicklung, Wien, 2025.
- [4] Jahresbericht F&E 2024. Herausgeber: ÖBB-Infrastruktur AG, Unternehmensentwicklung, Forschung & Entwicklung, Wien, 2025.
- [5] Micić Batka, V., Schachinger T., Zagar, B., Dornig, P., Blanchard R., Schamberger, S., Tauschitz P., Kettl A., Haberler-Weber M. and D. Winkler, „Innovationen im Bereich der Instandhaltung“, Eisenbahntechnische Rundschau, 73. Jahrgang, Nr. 4., S. 32-37, April 2024.
- [6] Micić Batka V, Schachinger T., Schröck J., Hofer W., Wenighofer R., Galler, R. „Betriebsunabhängige Inspektion von Tunneldrainagen mittels Roboter: Der Tunnel Drainage Rover (TDR)“. Magazin Steirische Mobilität 2, S 19-21, 2025.

Monographic Series TU Graz
Railway Research

- Vol. 1** Stefan Marschnig
**iTAC – innovative Track
Access Charges**
2026
ISBN 978-3-85125-493-8
- Vol. 2** Fabian Hansmann
**The Missing Link between Asset
Data and Asset Management**
2018
ISBN 978-3-85125-567-6
- Vol. 3** Matthias Landgraf
**Smart data for sustainable Railway
Asset Management**
2018
ISBN 978-3-85125-569-0
- Vol. 4** Michael Fellingner
Sustainable Asset Management for Turnouts
2020
ISBN 978-3-85125-776-2
- Vol. 5** Ivan Vidović
**Railway Infrastructure Condition Monitoring and
Asset Management – The Case of Fibre Optic Sensing**
2020
ISBN 978-3-85125-778-6

Monographic Series TU Graz
Railway Research

- Vol. 6** Johannes Neuhold
Tamping within sustainable track asset management
2020
ISBN 978-3-85125-782-3
- Vol. 7** Martin Smoliner
The Integrated Timetable in Liberalised Railway Networks
2020
ISBN 978-3-85125-828-8

Railway Proceedings

- Vol. 1** **Koralmtunnel – Technik im Fokus**
2026
ISBN 978-3-99161-065-6

Koralmtunnel – Technik im Fokus

26.02.2026, Graz

RAILWAY PROCEEDINGS

Verlag der Technischen Universität Graz
www.tugraz-verlag.at

ISBN 978-3-99161-065-6

