

# 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 PM<sub>10</sub> 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 PM<sub>10</sub>-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

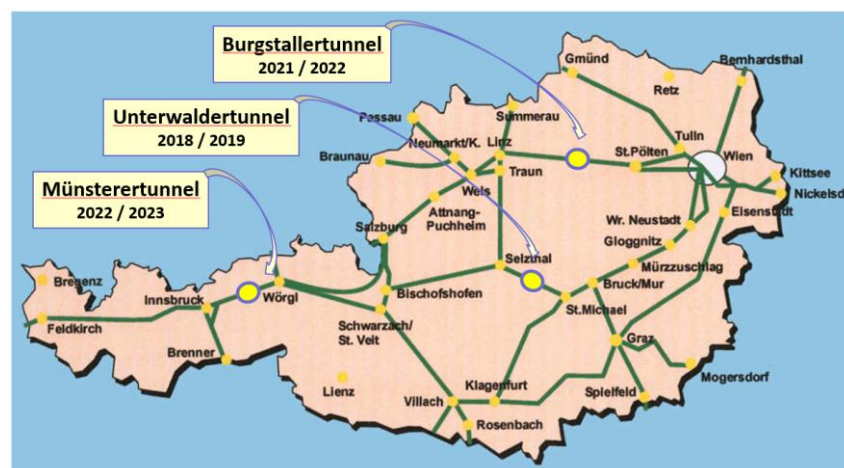


Abbildung 1 Verortung der Versuchsorte auf dem österreichischen Schienennetz. [13]

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.

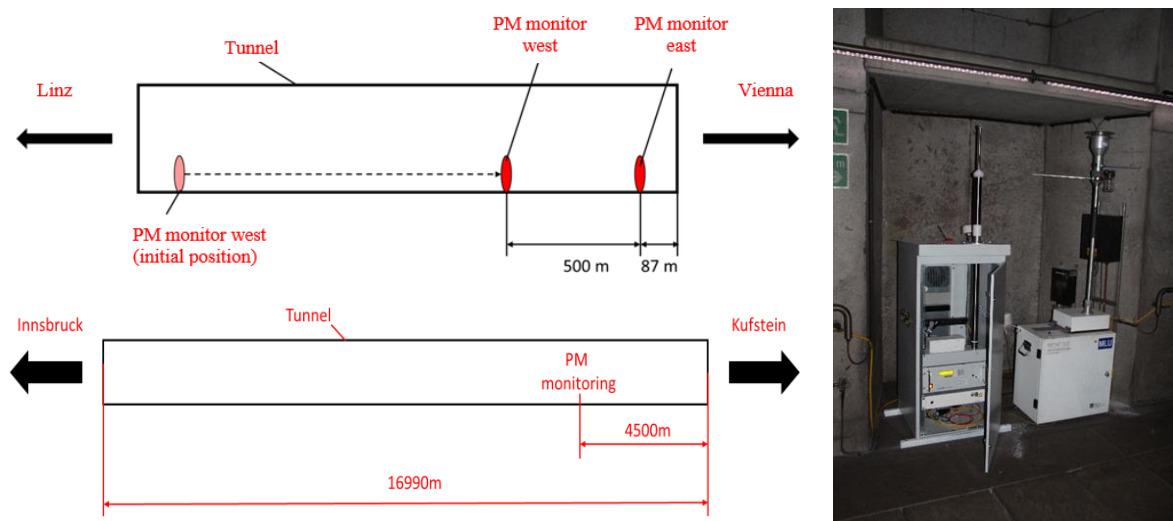


Abbildung 2 oben links – Schema des Testaufbaus im Tunnel Burgstall,  
unten links – Schema des Testaufbaus im Tunnel Münster,  
rechts – Einbauposition des PM Monitors im Tunnel Burgstall. [13]

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 PM<sub>10</sub>-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 PM<sub>10</sub>-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 <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | PM <sub>1</sub> | PM <sub>10</sub> | 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.

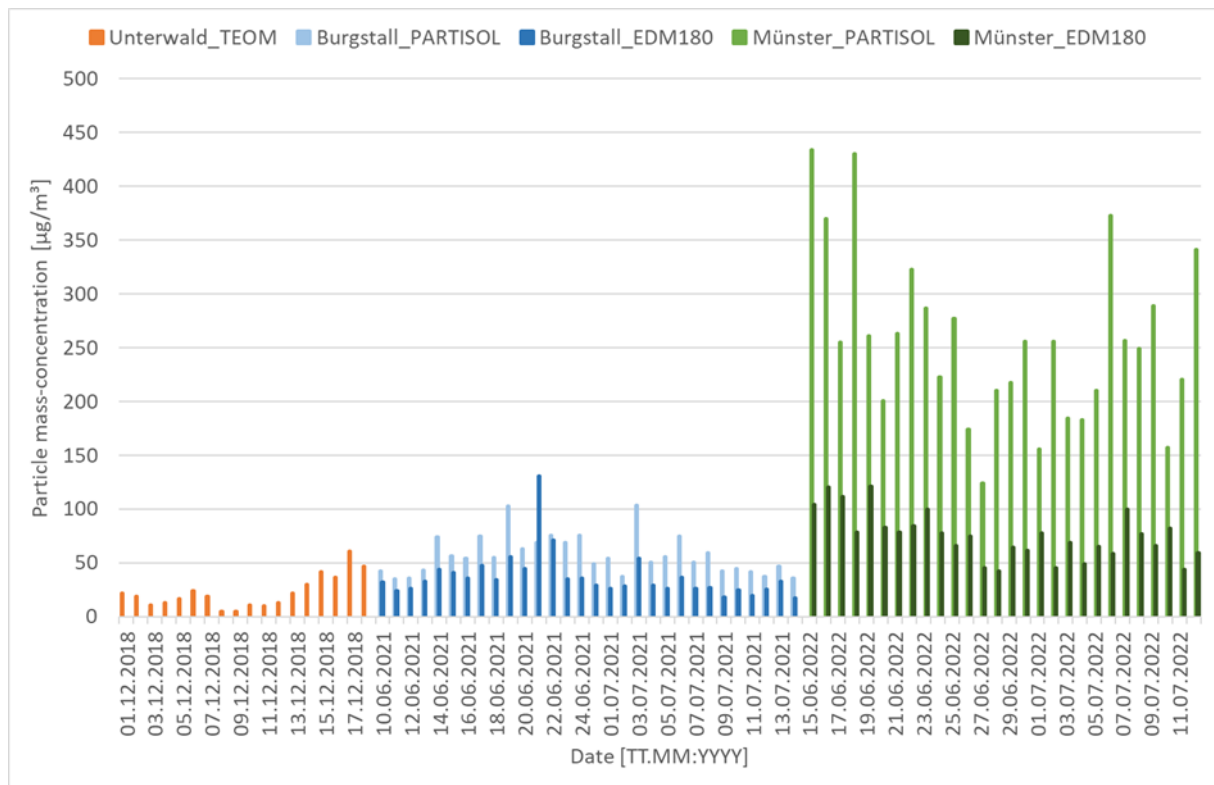


Abbildung 4 Vergleich der TSP (Tunnel Unterwald) und PM10 (Burgstall und Münster) Tagesmittelwerte. [13]

### 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

&lt;&lt; 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.

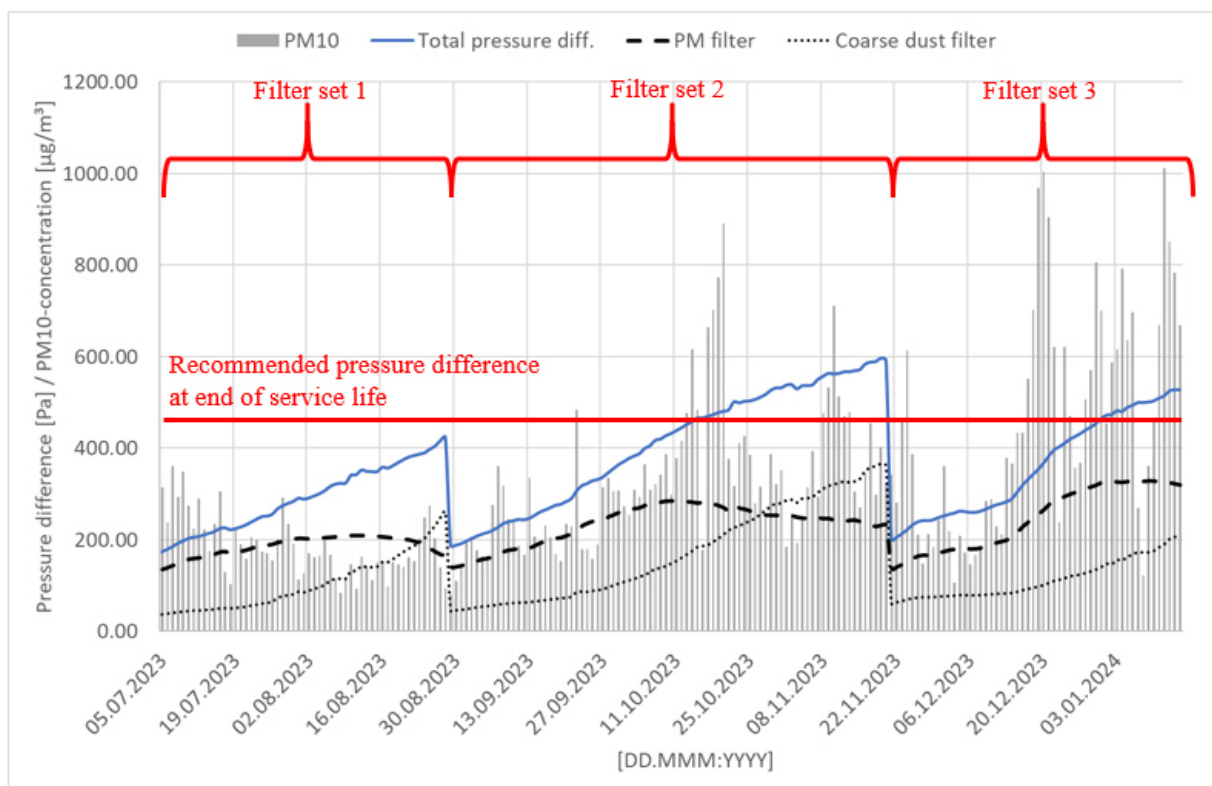


Abbildung 5 Verlauf des Differenzdrucks über die beiden Filterstufen sowie Tagesmittelwerte für PM10 während der Messperiode im Tunnel Münster. [13]

## 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 PM<sub>10</sub>-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.