

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.

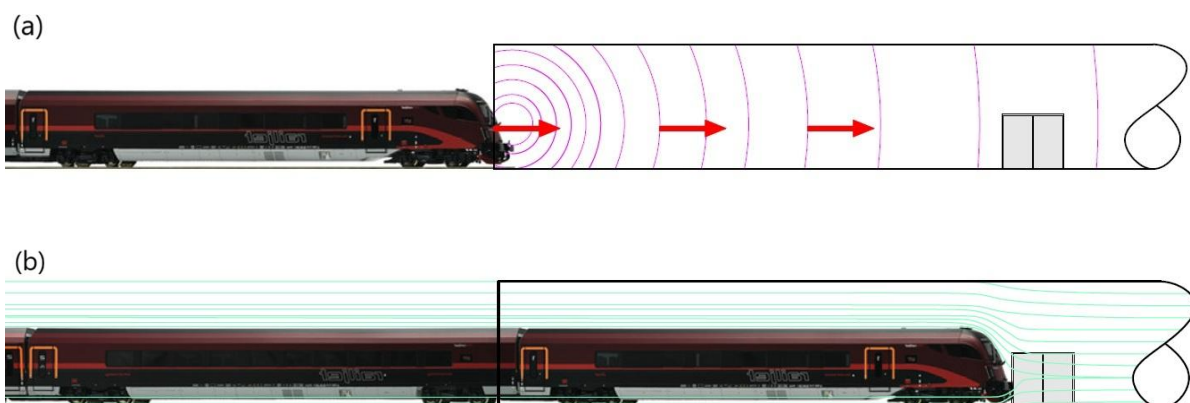


Abbildung 1 Druckwellen-(a) und strömungsinduzierte (b) aerodynamische Belastungen.

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.

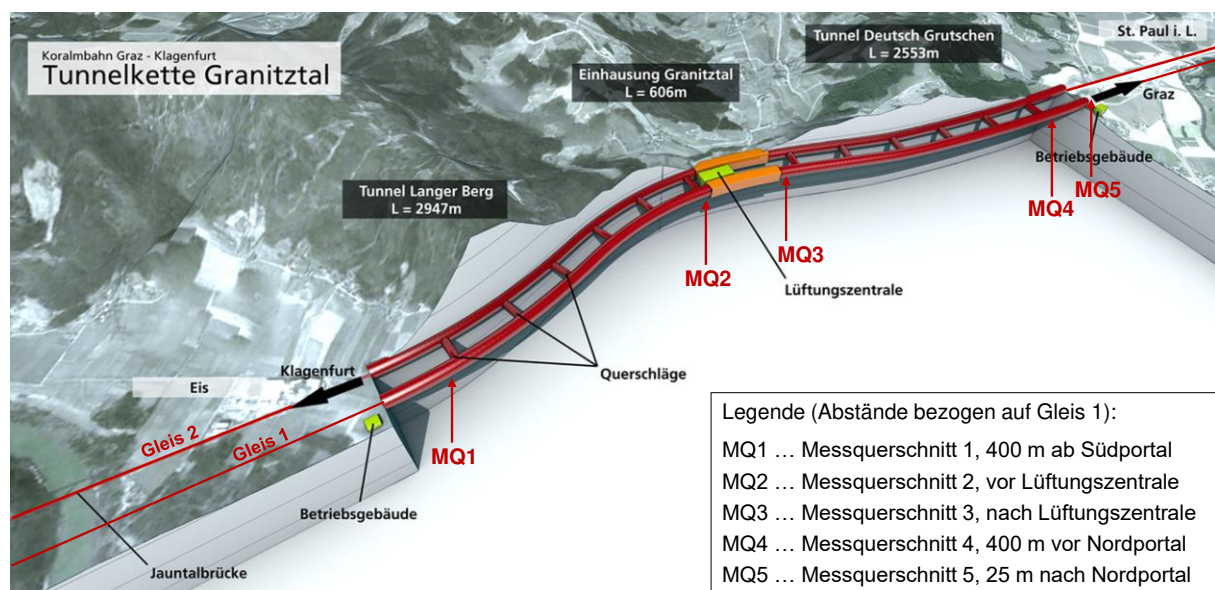


Abbildung 2 Zweiröhriger, eingleisiger Granitzaltunnel, Messquerschnitte MQ1 bis MQ5.

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 $160 \text{ km/h} < v_{\text{ZUG}} \leq 250 \text{ km/h}$):

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

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

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 $\varphi_{\text{dyn}} = 1,40$ hinzugefügt. Mit der Formel (2) kann die maximale strömungsinduzierte Drucklast rechnerisch ermittelt werden:

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

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 ($\varphi_{\text{dyn}} = 1,4$)

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 $v_{\text{ZUG}} = 250 \text{ km/h}$ 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.

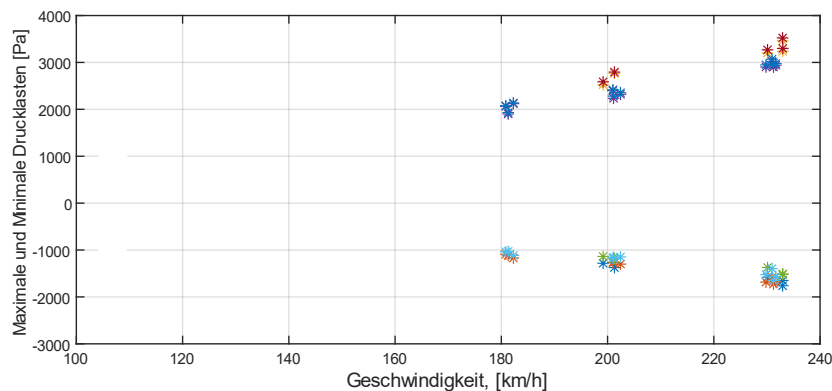


Abbildung 3 Gemessene maximale und minimale Drucklasten in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit der Railjets im Tunnel am Messquerschnitt MQ1.

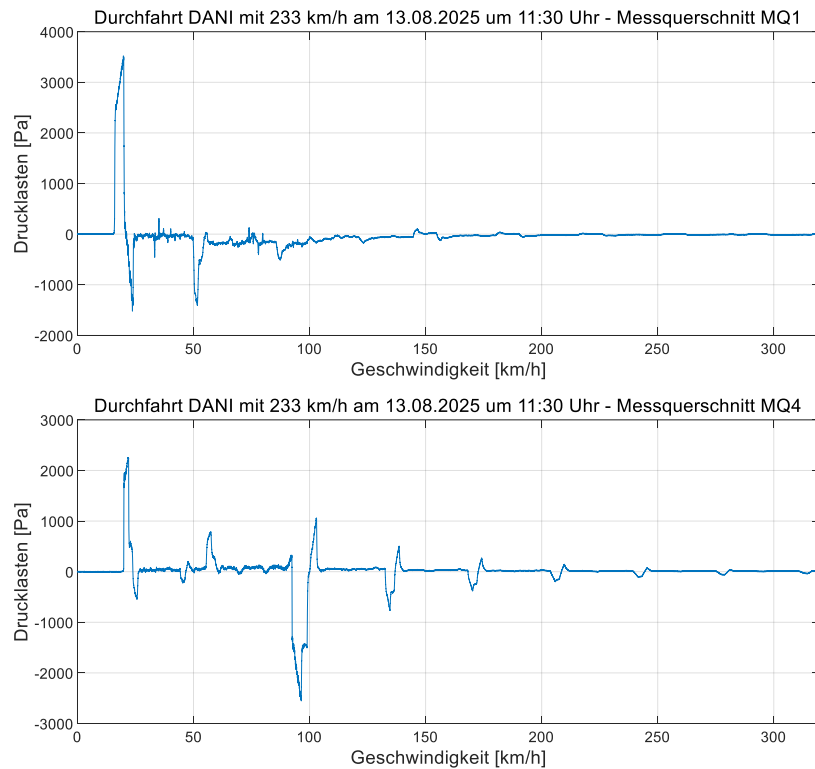


Abbildung 4 Drucklasten bei Durchfahrt der DANI-Tagzuggarnitur mit 233km/h gemessen bei Messquerschnitt MQ1 (nahe Einfahrtsportal) und MQ4 (nahe Ausfahrtsportal).

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.