

Wirksamkeit von Druckentlastungsschächten beim Hochgeschwindigkeitsbahnverkehr in Tunneln

Dr.-Ing. Bernd Hagenah, Dr. sc. tech. Peter Reinke, Dr. Jonathan Shaha,
Dipl.-Ing. Stig Ravn, HBI Haerter AG, Bern / Schweiz

Kurzfassung

Durch Druckentlastungsschächte können die von Hochgeschwindigkeitszügen ausgelösten Druckwellen während Tunneldurchfahrten reduziert werden. Der Druckkomfort von Reisenden wird verbessert, und die Einhaltung von Druckkomfortkriterien kann gewährleistet werden.

Die Wirksamkeit von Druckentlastungsschächten konnte während der Inbetriebsetzungsphase der Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist in der Schweiz gemessen werden. Am Beispiel des zweigleisigen Tunnels Emmequerung wird gezeigt, dass durch die Verwendung von 2 Druckentlastungsschächten (je 12.25 m² freie Querschnittsfläche) der Tunnelquerschnitt von $A_{\text{Tunnel}} = 105 \text{ m}^2$ auf 76 m², bei gleichem Druckkomfort für Zugreisende, reduziert werden kann.

Kleinere Tunnelquerschnitte führen in der Regel zu geringeren Baukosten. Zudem können die Schächte mit anderen Funktionen kombiniert werden (Entrauchung, Klimaverbesserung, etc.). Diese Vorteile müssen mit den möglichen Nachteilen abgewogen werden (Lärmemissionen nach aussen, erhöhte lokale Luftströmungen im Tunnel, Schächte nur unter bestimmten Randbedingungen wirksam und sinnvoll).

1. Ausgangslage

Durch den Ausbau des Hochgeschwindigkeitsbahnverkehrs in Europa treten zunehmend Fragen zum Komfort der Reisenden und des Personals in den Vordergrund. Hierzu zählt der Druckkomfort, der bei Tunneldurchfahrten von Bedeutung ist. Druckschwankungen bei Tunneleinfahrten werden individuell sehr unterschiedlich wahrgenommen. Dieses kommt z.B. in den unterschiedlichen Definitionen und Vorgaben in verschiedenen Ländern zum Ausdruck.

Der Umfang und die Art der Maßnahmen zur Verbesserung des Druckkomforts der Reisenden sowie des Tunnelpersonals sind beeinflussbar durch:

- Festlegung der Druckkomfortkriterien (z.B. geringe oder grosse Druckschwankungen pro Zeit)
- Umsetzung von Maßnahmen am Rollmaterial (z.B. Dichtigkeit, Unterhaltungsumfang)
- Festlegung von betrieblichen Maßnahmen (z.B. Fahrgeschwindigkeiten, Fahrplan)
- Umsetzung von Maßnahmen an den Tunnelbauwerken (z.B. Querschnitte, Öffnungen)

2. Druckschwankungen und Druckkomfortkriterien

Ursachen von Druckschwankungen

Druckschwankungen am Zug treten auf, wenn sich der umgebende freie Querschnitt eines Zuges ändert, wie es bei einer Tunnelein- oder Tunnelausfahrt sowie bei Querschnittssprüngen im Tunnel der Fall ist (vgl. [4]). Druckwellen breiten sich im Tunnel mit Schallgeschwindigkeit aus und werden an den Portalen und Querschnittsänderungen (teil-)reflektiert. Zusammen mit dem Druckabfall längs eines Zuges verursachen die Druckwellen eine komplexe Veränderung der Drücke am und im Zug.

Grenzwerte für Druckschwankungen in Reisezügen – Druckkomfortkriterien

Häufige und starke Druckschwankungen in Zügen können den Komfort von Reisenden einschränken und im Extremfall sogar gesundheitliche Schäden verursachen. Zum Schutz von Reisenden und Zug- sowie Tunnelpersonal vor übermäßigen Druckschwankungen wurden die sogenannten Druckkomfortkriterien entwickelt. Dabei handelt es sich um Richtlinien und Empfehlungen zur Festlegung der maximal zulässigen Druckschwankungen in bestimmten Zeitintervallen.

Druckkomfortkriterium des Internationalen Eisenbahnverbandes

Durch den Internationalen Eisenbahnverband (UIC) wurde eine Richtlinie ([1]) erarbeitet, um unterschiedliche nationale Vorgaben zu harmonisieren. Die darin enthaltenen Grenzwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Druckkomfortkriterium für die Neubaustrecken der Bahn-2000-Projekte in der Schweiz

Im Rahmen des Verkehrskonzeptes Bahn-2000 wurde von den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) die Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist geplant, ausgeführt und 2004 in Betrieb genommen. Das in Tabelle 1 aufgeführte Druckkomfortkriterium wurde dabei für nicht druckertüchtigte Züge zugrunde gelegt. Begegnungsfälle wurden nicht berücksichtigt.

Medizinischer Grenzwert des Internationalen Eisenbahnverbandes

Als medizinischer Grenzwert wird eine maximale Druckschwankung von 10 kPa für die gesamte Tunneldurchquerung festgelegt (vgl. [2]).

3. Allgemeine Maßnahmen zur Gewährleistung der Druckkomfortkriterien

Auswahl der Druckkomfortkriterien

Ob und inwieweit der Komfort durch Druckschwankungen beeinträchtigt empfunden wird, hängt von Faktoren ab, wie z.B.:

- der Anzahl der Tunnel entlang einer Strecke bzw. der Häufigkeit der Über- oder Unterdruckabweichungen vom Normaldruck
- der Länge der Tunnel
- den weiteren störenden oder ablenkenden Faktoren (Lärm, Ventilation, Klima, Vibrationen, Gesundheitszustand, weiterer Ablenkungsgrad der Reisenden)

Je nach Empfindlichkeit kann es Reisende geben, die sich auch bei Einhaltung der UIC-Druckkomfortkriterien in ihrem Druckkomfort beeinträchtigt fühlen. Werden die UIC-Druckkomfortkriterien überschritten, so wird der Anteil der Reisenden zunehmen, die die Druckschwankungen als unangenehm wahrnehmen. Ob und in welchem Umfang die UIC-Druckkomfortkriterien einzuhalten sind bzw. ob Maßnahmen zur Einhaltung des Druckkomforts zu ergreifen sind, muss auch anhand von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen festgelegt werden.

Druckertüchtigung von Rollmaterial

Druckschwankungen werden über Öffnungen in das Wageninnere übertragen. Große Öffnungen, wie sie z.B. zwischen einzelnen Wagen oder schlecht ausgeführten Dichtungen auftreten, bewirken eine annähernd ungedämpfte Übertragung der außen anliegenden Drücke ins Zuginnere. Die Güte der Druckertüchtigung eines Zuges wird durch den Druckdichtigkeitskoeffizienten τ beschrieben. Dieser gibt die Zeitdauer an, bis eine Druckdifferenz zwischen dem Wageninneren und der Wagenaußenseite auf ca. 37 % des ursprünglichen Wertes angeglichen ist.

Für den Fall, dass zum Zeitpunkt $t = 0$ s eine Druckdifferenz (100 %) zwischen dem Wageninneren und dem Wagenäußeren vorliegt, ist der sich ergebende Verlauf der Druckdifferenz im Wagen, für $\tau = 5, 10$ und 15 s, in Bild 1 dargestellt. Typische Druckdichtigkeitskoeffizienten für unterschiedliche Zugtypen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Im Betrieb variieren die Druckdichtigkeitskoeffizienten, da es aufgrund von Wagenkastenverformungen, durch Vibrationen und aerodynamische Kräfte zur Veränderung von Öffnungen und Volumen kommt. Darüber hinaus führen Alterungsprozesse des Rollmaterials zu einer abnehmenden Druckdichtigkeit, z.B. aufgrund spröder Dichtungen an Fenstern, Türen und Klimaanlage. Eine qualitativ hochwertige Druckertüchtigung lässt sich nur durch geeignete Wartungsarbeiten und Materialwahl aufrechterhalten. Im Übrigen variiert der Druckdichtigkeitskoeffizient in der Praxis je nach Ort im Zug, der Richtung des Druckgefälles und der Zuverlässigkeit von Klappensteuerungen der Klimaanlage sowie weiteren Faktoren.

Bahnbetriebliche Maßnahmen

Durch betriebliche Maßnahmen für die Tunneldurchfahrt lassen sich Druckkomfortkriterien einhalten. Die Einhaltung der Druckkomfortkriterien hängt im Wesentlichen ab von:

- der Fahrgeschwindigkeit, insbesondere in Portalnähe

- der Anzahl der Zugbegegnungen
- den Zugfolgezeiten

Prinzipiell ist es denkbar, diese Größen zur Verbesserung des Druckkomforts zu berücksichtigen. Allerdings kann bei Hochgeschwindigkeitsstrecken häufig nicht auf diese Aspekte Einfluss genommen werden.

Bauliche Maßnahmen

Durch geeignete Maßnahmen am Tunnelbauwerk können die Druckschwankungen im Tunnel reduziert werden. Verschiedene konstruktive Maßnahmen sind möglich, wie z.B.

- vergrößerte Tunnelquerschnitte
- Druckentlastungsschächte
- Portalaufweitungen
- geöffnete Querschläge bzw. weitere Öffnungen zwischen zwei Bahntunnelröhren

Im folgenden Abschnitt werden die aufgeführten baulichen Maßnahmen näher erläutert.

4. Bauliche Maßnahmen zur Verbesserung des Druckkomforts

In Tabelle 3 sind bauliche Maßnahmen zur Verringerung der Druckschwankungen in Bahntunnels aufgeführt. Inwiefern die angegebenen Maßnahmen sinnvoll sind, hängt von weiteren Aspekten ab, wie:

- dem Grad der Druckertüchtigung des Rollmaterials
- der Art der Druckkomfortkriterien (z.B. Länge Zeitintervalle, Berücksichtigung von Gradienten)
- dem möglichen Begegnungsverkehr (z.B. Häufigkeit)
- einer Vielzahl weitere baulicher Randbedingungen

In Bild 2 sind die möglichen baulichen Maßnahmen illustriert.

Eine bestmögliche bauliche Maßnahme zur Verringerung von Druckschwankungen kann pauschal nicht angegeben werden. Vielmehr müssen verschiedene Aspekte dazu berücksichtigt werden, wie z.B.:

- Tunnellänge und -querschnitte
- aerodynamische Kopplung zu weiteren Tunneln, falls vorhanden
- Bebauung an den Portalen sowie über dem Tunnel (z.B. Wohngebiete oberhalb des Tunnels)
- übergeordnete Sicherheitskonzepte (z.B. Tunnelentrauchung)
- Fahrpläne (z.B. Zuggeschwindigkeiten, Zugfolgezeiten, Begegnungsverkehr, etc.)
- geplante Schächte für weitere Aufgaben (z.B. zur Verringerung von Mikrodruckwellen, Schwallbauwerke, etc.)
- Bau- und Betriebskosten

5. Funktionen von Schächten in Bahntunnelbauten

Schächte können neben der Wirkung als Druckentlastungsschacht weitere Funktionen im Bereich der Tunnelaerodynamik, der Tunnellüftung und der Brandsicherheit von Bahntunneln übernehmen (vgl. Tabelle 4). Die Wirkung von Druckentlastungsschächten wurde u.a. in [5] dokumentiert.

6. Druckentlastungsschächte am Beispiel des Tunnels Emmequerung der Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist

Der Tunnel Emmequerung befindet sich entlang der Neubaustrecke zwischen Mattstetten und Rothrist in der Schweiz. Die Grunddaten des Tunnels Emmequerung sind in Tabelle 5 wiedergegeben. Bei der SBB-Neubaustrecke wurden erstmalig in diesem Umfang bei einem europäischen Neubauprojekt systematisch Druckentlastungsschächte in einzelnen Tunneln vorgesehen, um den Druckkomfort zu verbessern.

Während der Planungsphase wurden Untersuchungen zur Einhaltung der Druckkomfortkriterien durchgeführt (vgl. [3]). Die Berechnungen zur Überprüfung des Druckkomforts sowie die weiteren aerodynamischen Simulationen wurden mit THERMOTUN ([6], [7]) durchgeführt. Das Simulationsprogramm für Tunnelaerodynamik und -lüftung nutzt ein eindimensionales

Rechenverfahren, mit dem auch vernetzte Bahntunnelsysteme unter Berücksichtigung realistischer Bahnverkehrsszenarien berechnet werden können.

Zur Auslegung der Druckentlastungsschächte wurden verschiedene Zugtypen, Fahrgeschwindigkeiten sowie Schachtpositionen, Schachtquerschnitte und unterschiedliche Anzahlen von Schächten untersucht. Zur Einhaltung des Druckkomfortkriteriums ($\Delta p_{\max} < 1.5 \text{ kPa}$ in 4 s) wurden schließlich 2 Druckentlastungsschächte geplant und ausgeführt. In Bild 3 ist die Ausführung eines Druckentlastungsschachtes schematisch dargestellt.

7. Bestätigung der Auslegung durch Messungen

Während der Inbetriebsetzungsphase der Neubaustrecke wurden Messfahrten mit verschiedenen Zugtypen und Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Wirksamkeit der Druckentlastungsschächte von 7 Tunneln wurde durch aerodynamische Messungen überprüft. Die technischen Grunddaten eines Testzuges sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Bild 4 zeigt diesen Testzug während der Tunnelleinfahrt in den Tunnel Murgenthal der Neubaustrecke.

Testfahrt und Simulation für eine Zuggeschwindigkeit von 220 km/h

Die Wirksamkeit der Druckentlastungsschächte wird am Beispiel der durchgeführten Testfahrten mit $v_{\text{zug}} = 220 \text{ km/h}$ dargelegt. In Bild 5 sind die gemessenen Druckschwankungen an der äußeren Zugwand für die zwei Messpositionen während der Tunneldurchfahrt dargestellt. Bild 5 zeigt zudem die Simulationsergebnisse für:

- den Auslegungsfall mit 2 Druckentlastungsschächten (DES) und $A_{\text{tunnel}} = 76 \text{ m}^2$
- den Fall ohne Druckentlastungsschächte und $A_{\text{tunnel}} = 76 \text{ m}^2$
- den Fall ohne Druckentlastungsschächte und $A_{\text{tunnel}} = 105 \text{ m}^2$

Die Messergebnisse stimmen mit den THERMOTUN-Berechnungen für den Auslegungsfall gut überein. Ein Tunnel Emmequerung gleichen Querschnitts und ohne Druckentlastungsschächte hätte deutlich extremere Druckschwankungen im Zug hervorgerufen. Beispielsweise wäre die extreme Druckabweichung vom Normaldruck am Zugheck ca. 2 kPa anstatt ca. 1 kPa im Fall mit Druckentlastungsschächten. Ähnlich groß sind die Unterschiede ebenfalls am Zugkopf. Eine Vergrößerung des Tunnelquerschnitts auf ca. $A_{\text{tunnel}} = 105 \text{ m}^2$ führt zu Druckschwankungen in der gleichen Größenordnung, wie für den Tunnel mit den 2 Druckentlastungsschächten und einem Querschnitt von $A_{\text{tunnel}} = 76 \text{ m}^2$.

Zur Überprüfung des Druckkomfortkriteriums werden jeweils die maximalen Druckschwankungen innerhalb des Zeitintervalls von 4 s bestimmt. In Bild 6 ist der Verlauf der maximalen Druckschwankungen innerhalb von 4 s für die Messdaten sowie für die unterschiedlichen THERMOTUN-Berechnungsfälle dargestellt. Für die Messungen und die zugrunde liegenden Simulationen wird das Druckkomfortkriterium eingehalten ($\Delta p_{\max} < 1.2 \text{ kPa}$ in 4 s). Bei Verzicht auf die Druckentlastungsschächte wird das Druckkomfortkriterium dagegen deutlich überschritten ($\Delta p_{\max} > 2.0 \text{ kPa}$ in 4 s). Eine Vergrößerung des Tunnelquerschnitts auf ca. 105 m^2 hätte ebenfalls zur Einhaltung des Druckkomfortkriteriums geführt.

In Bild 7 ist die Wirkung der Druckentlastungsschächte im Vergleich zu einem vergrößerten Tunnelquerschnitt illustriert.

8. Optimierungspotenziale

Die Auslegung der Druckentlastungsschächte für die Neubaustrecke der Bahn 2000 erfolgte ausschließlich im Hinblick auf die Verbesserung des Druckkomforts. Für zukünftige Planungen könnten darüber hinaus die nachfolgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- die mögliche Nutzung der Druckentlastungsschächte als Notausstiege in Kombination mit weiteren, die Sicherheit erhöhenden Massnahmen
- die mögliche Nutzung von Druckentlastungsschächten für Lüftungs- und Entrauchungskonzepte
- die Verringerung des Energieverbrauchs der Züge bzw. die Klimaverbesserung des Tunnels

9. Zusammenfassung

Druckentlastungsschächte können die von Hochgeschwindigkeitszügen ausgelösten Druckwellen während Tunneldurchfahrten deutlich reduzieren. Der Druckkomfort von Reisenden wird verbessert. Die Wirksamkeit von Druckentlastungsschächten konnte während der Inbetriebsetzungsphase der Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist in der Schweiz durch Messungen nachgewiesen werden.

Am Beispiel des zweigleisigen Bahntunnels Emmequerung wurde gezeigt, dass durch die Verwendung von 2 Druckentlastungsschächten (je 12.25 m^2) der Tunnelquerschnitt von $A_{\text{Tunnel}} = 105 \text{ m}^2$ auf 76 m^2 reduziert werden konnte, um den gleichen Druckkomfort für die Reisenden zu gewährleisten.

Kleinere freie Querschnitte mehrerer Tunnel der Neubaustrecke Mattstetten – Rothrist führten bei gleichem Druckkomfort zu verringerten Baukosten. Dieser und weitere mögliche Vorteile von Druckentlastungsschächten müssen bei zukünftigen Projekten mit den Nachteilen abgewogen werden. Unter anderen Randbedingungen könnten Druckentlastungsschächte nicht wirksam und/oder sinnvoll sein.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Verantwortlichen der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) sowie den weiteren Projektbeteiligten für die intensive Unterstützung der Planungs- und Messarbeiten.

Literatur

- [1] UIC, " Bestimmungen zur Sicherung der technischen Verträglichkeit der Hochgeschwindigkeitszüge", UIC Kodex 660, 2.Edition, 2002
- [2] EN 14067-5 (Europäisches Komitee für Normung), "Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel", 2003
- [3] J. Burri, F. Zumsteg, "Airshafts for the alleviation of pressure waves in tunnels of the new Swiss Rail 2000", 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilations of Vehicle Tunnels, Aosta-Valley, 1997
- [4] HBI Haerter AG, www.haerter.ch/d/referenzprojekte/#animationen
- [5] Figura-Hardy G.I., "Pressure relief -trends and benefits of incorporating airshafts into railway tunnels", 10th Int. Symp. Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Boston, 2000
- [6] Vardy, A. E., Reinke, P., "Estimation of train resistance coefficients in tunnels from measurements during routine operation", Journal of Rail and Rapid Transit, Proc. I Mech E Part F, Volume 213, Number 2, 1999
- [7] Vardy, A. E., "On the use of the method of Characteristics for the solution of unsteady flows in networks", Proc. 2nd Int. Conf. on Pressure Surges, BHRA Fluid Engineering, London UK, H2: 15-30, 1976

Abbildungen

Bild 1:	Verlauf der Aussen-/Innendruckdifferenz ($P_{\text{ausssen}} - P_{\text{innen}}$) bezogen auf eine sprungartige Aussendruckabsenkung für Wagen mit unterschiedlicher Druckertüchtigung ($\tau = 5, 10$ sowie 15 s).....	6
Bild 2:	Bauliche Maßnahmen an Tunnelbauwerken zur Verringerung von Druckschwankungen in Tunneln und Reisezügen.....	7
Bild 3:	Schematische Darstellung eines Druckentlastungsschachtes zur Verringerung der Druckschwankungen im Tunnel.....	7
Bild 4:	Testzug der Messfahrten – Pfeile markieren die Messpositionen (vor Tunnel Murgenthal: Nutzung des Tunnels Murgenthal für Ausrollversuche).....	8
Bild 5:	Berechnete und gemessene Druckschwankungen in der Nähe des Zugkopfes und des Zughecks ($v_{\text{Zug}} = 220 \text{ km/h}$; DES = Druckentlastungsschächte).....	8
Bild 6:	Wirksamkeit der Druckentlastungsschächte zur Einhaltung des Druckkomfortkriteriums bei einem Tunnelquerschnitt von $A_{\text{tunnel}} = 76 \text{ m}^2$; bei Verzicht auf Druckentlastungsschächte Vergrößerung des Tunnelquerschnittes auf 105 m^2 erforderlich.....	9
Bild 7:	Maßnahmen zur Erhöhung des Druckkomforts für den Tunnel Emmequering (links: 2 Druckentlastungsschächte à 12.25 m^2 , Tunnelquerschnitt $A_{\text{tunnel}} = 76 \text{ m}^2$, rechts: vergrößerter Tunnelquerschnitt $A_{\text{tunnel}} = 105 \text{ m}^2$, keine Druckentlastungsschächte).....	9

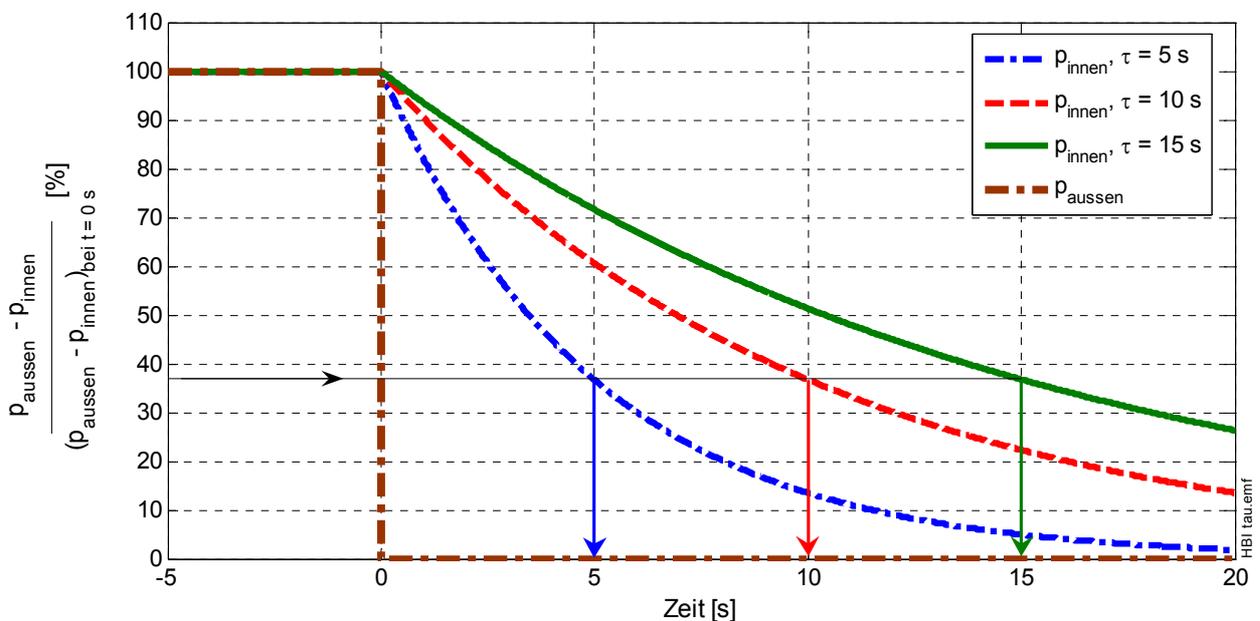


Bild 1: Verlauf der Aussen-/Innendruckdifferenz ($P_{\text{ausssen}} - P_{\text{innen}}$) bezogen auf eine sprungartige Aussendruckabsenkung für Wagen mit unterschiedlicher Druckertüchtigung ($\tau = 5, 10$ sowie 15 s)

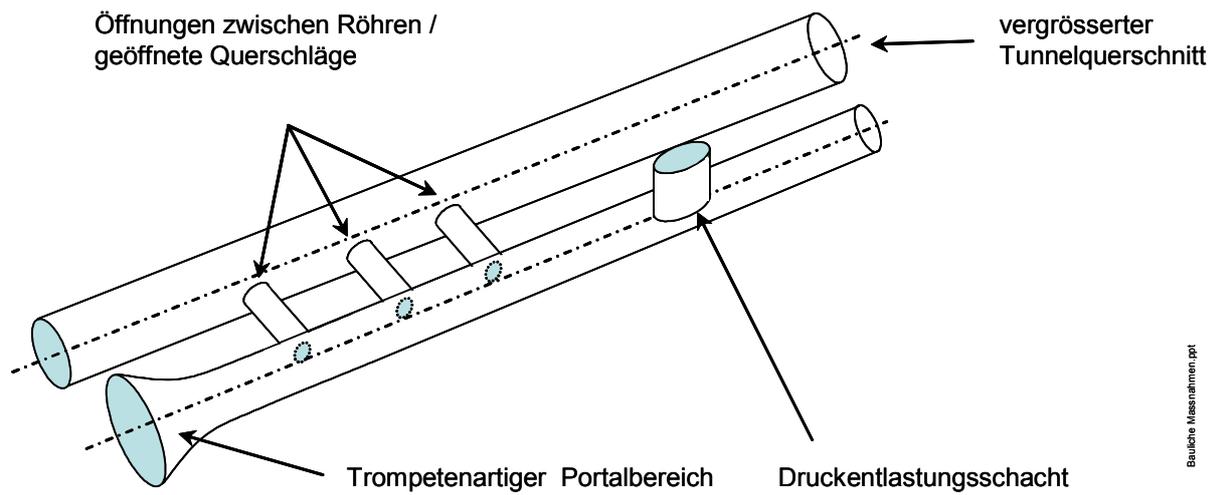


Bild 2: Bauliche Maßnahmen an Tunnelbauwerken zur Verringerung von Druckschwankungen in Tunneln und Reisezügen

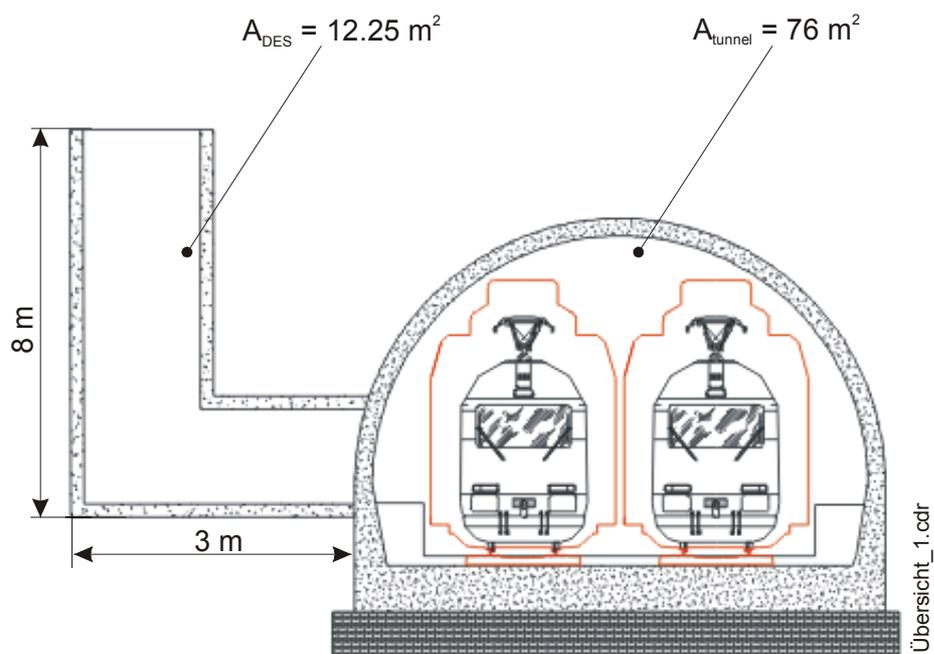


Bild 3: Schematische Darstellung eines Druckentlastungsschachtes zur Verringerung der Druckschwankungen im Tunnel



Bild 4: Testzug der Messfahrten – Pfeile markieren die Messpositionen (vor Tunnel Murgenthal: Nutzung des Tunnels Murgenthal für Ausrollversuche)

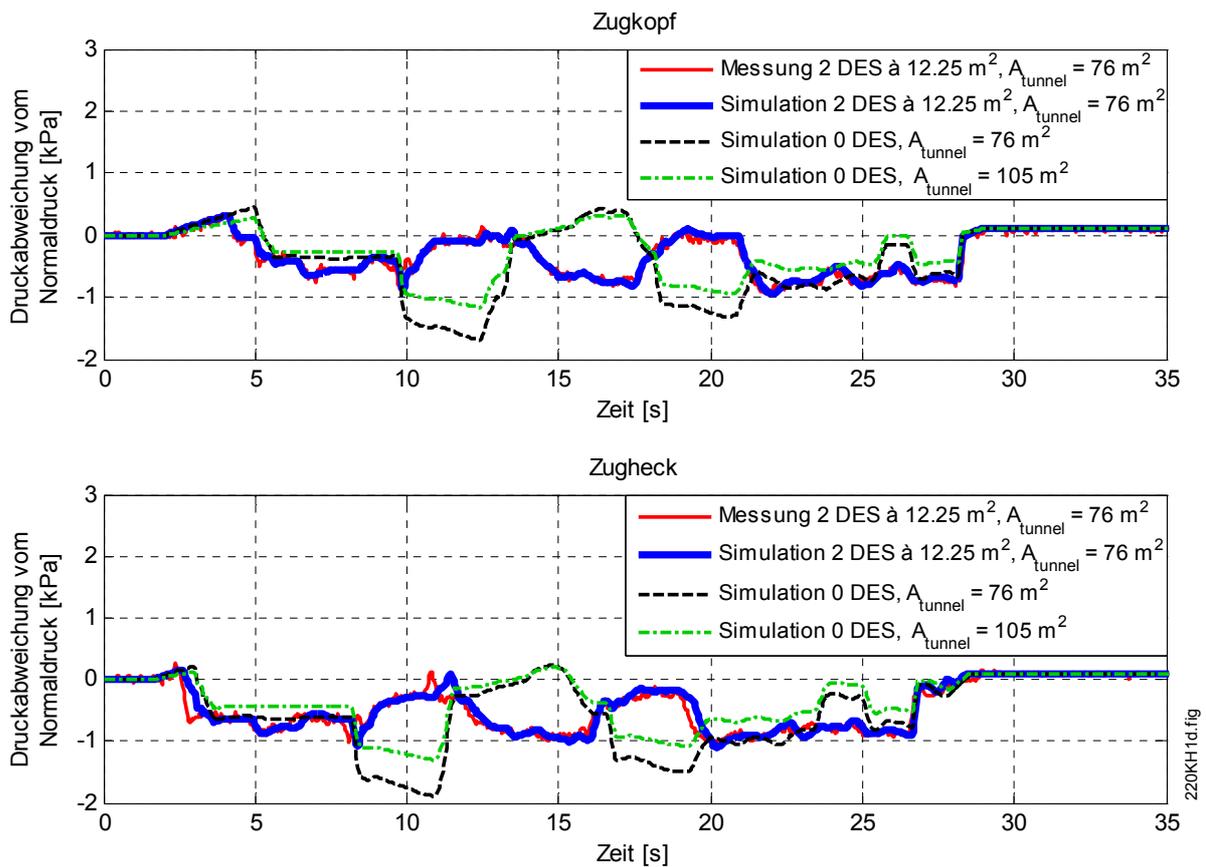


Bild 5: Berechnete und gemessene Druckschwankungen in der Nähe des Zugkopfes und des Zughecks ($v_{\text{Zug}} = 220 \text{ km/h}$; DES = Druckentlastungsschächte)

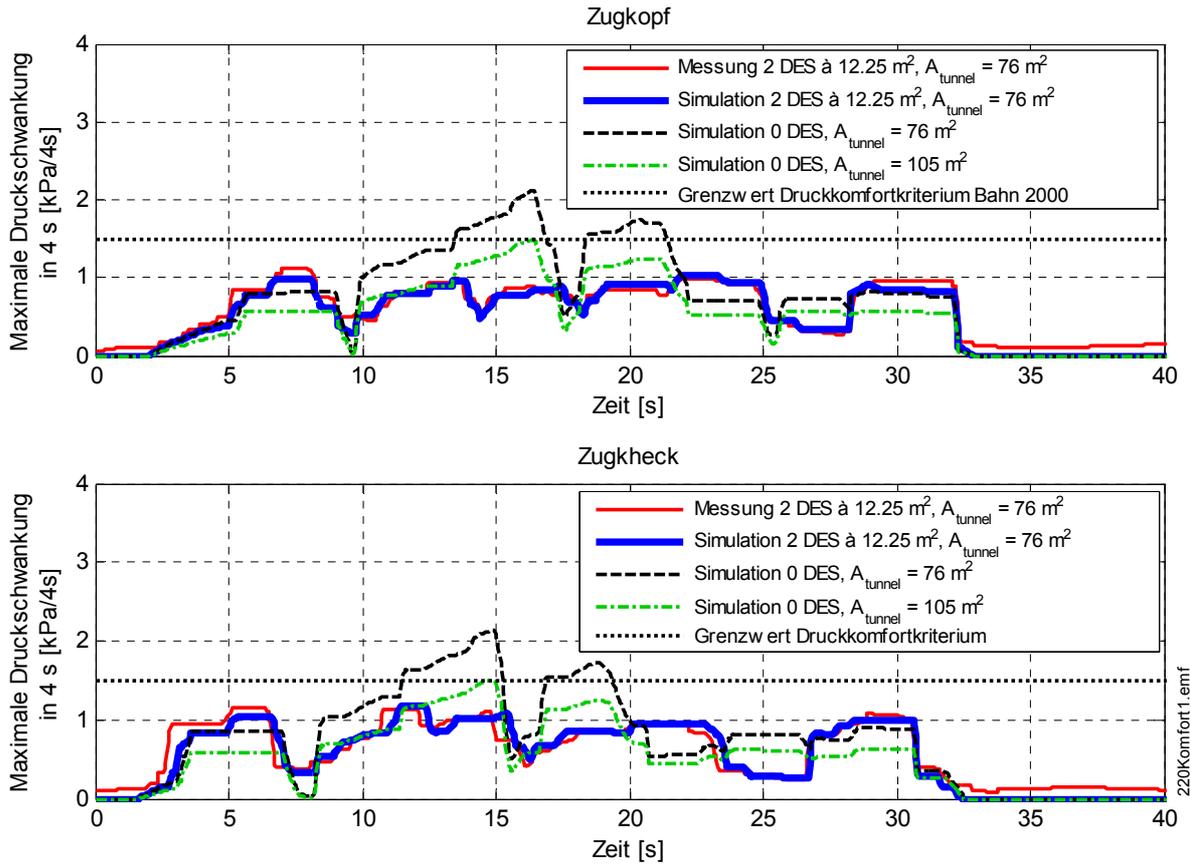


Bild 6: Wirksamkeit der Druckentlastungsschächte zur Einhaltung des Druckkomfortkriteriums bei einem Tunnelquerschnitt von $A_{\text{tunnel}} = 76 \text{ m}^2$; bei Verzicht auf Druckentlastungsschächte Vergrößerung des Tunnelquerschnittes auf 105 m^2 erforderlich

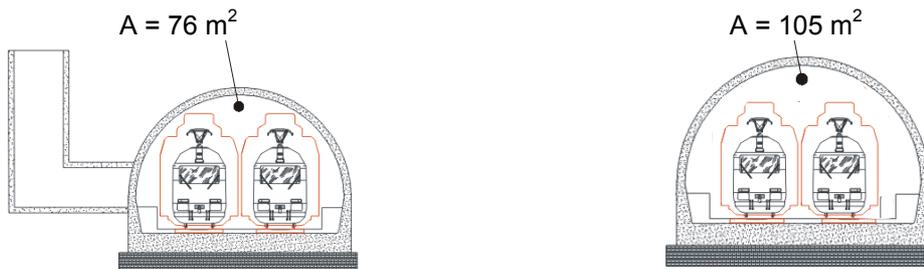


Bild 7: Maßnahmen zur Erhöhung des Druckkomforts für den Tunnel Emmeuerung (links: 2 Druckentlastungsschächte à 12.25 m^2 , Tunnelquerschnitt $A_{\text{tunnel}} = 76 \text{ m}^2$, rechts: vergrößerter Tunnelquerschnitt $A_{\text{tunnel}} = 105 \text{ m}^2$, keine Druckentlastungsschächte)

Tabellen

Tabelle 1:	Zusammenstellung der Druckkomfortkriterien der UIC und für die Neubaustrecken der Bahn-2000-Projekte in der Schweiz	10
Tabelle 2:	Vergleich der Druckertüchtigung verschiedener Zugtypen	10
Tabelle 3:	Vergleich von baulichen Maßnahmen zur Verringerung der Druckschwankungen im Tunnel	11
Tabelle 4:	Vergleich von unterschiedlichen Funktionen von Schächten in Tunneln im Bereich Aerodynamik, Klima, Lüftung.....	12
Tabelle 5:	Technische Daten des zweigleisigen Bahntunnels Emmequerung der Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist	12
Tabelle 6:	Technische Daten eines Testzuges für aerodynamische Abnahmemessungen	12

Zeitintervall [s]	UIC-Kriterium für max. Druckschwankung [kPa] in Zeitintervall	Bahn-2000-Kriterium für max. Druckschwankung [kPa] in Zeitintervall
1	≤ 0.5	-
3	≤ 0.8	-
10	≤ 1.0	-
60	≤ 2.0	-
4	-	≤ 1.5

Tabelle 1: Zusammenstellung der Druckkomfortkriterien der UIC und für die Neubaustrecken der Bahn-2000-Projekte in der Schweiz

Zugtyp	Druckdichtigkeitskoeffizient τ
nicht druckertüchtiger Zug (z.B. Regionalverkehr)	$\tau < 0.5 \text{ s}$
geringfügig druckertüchtiger Zug (z.B. Eurocity)	$0.5 \text{ s} < \tau < 6 \text{ s}$
gut druckertüchtiger Zug (z.B. ICE1, TGV)	$6 \text{ s} < \tau < 15 \text{ s}$
ausgezeichnet druckertüchtiger Zug (z.B. ICE3, Transrapid)	$\tau > 15 \text{ s}$

Tabelle 2: Vergleich der Druckertüchtigung verschiedener Zugtypen

Maßnahme / Wirkung	mögliche Vorteile	mögliche Nachteile
<i>Druckentlastungsschächte:</i> Die Amplituden der Druckschwankungen im Tunnel werden durch Teilreflexionen an den Schächten verkleinert.	<ul style="list-style-type: none"> - deutlich kostengünstiger als z.B. Querschnittsvergrößerung - ggf. auch zur Entrauchung, als Notausstiege, zur Verbesserung des Tunnelklimas nutzbar (in Kombination mit weiteren Massnahmen) 	<ul style="list-style-type: none"> - Maßnahme nur bei bestimmten Randbedingungen wirksam und machbar (z.B. nur bei geringer Überdeckung) - Lärmquelle für freie Umgebung - ggf. starke Seitenwinde am Zug - Ausseneinflüsse im Tunnel (z.B. Laubeinfall)

Maßnahme / Wirkung	mögliche Vorteile	mögliche Nachteile
<i>Vergrößerter Tunnelquerschnitt:</i> Durch vergrößerte Tunnelquerschnitte wird das Verhältnis von Zug- zu Tunnelquerschnitt reduziert. Die Amplituden der bei der Zugeinfahrt ausgelösten Druckwellen werden reduziert.	<ul style="list-style-type: none"> – Verringerung der Druckschwankungen im Tunnel gewährleistet – weniger extreme aerodynamische Verhältnisse (geringere mechanische Beanspruchungen von Tunnel, Ausrüstung und Zügen, geringerer Energieverbrauch – mehr Platz in Bauphase 	<ul style="list-style-type: none"> – deutlich höhere Erstellungskosten – für mögliche Ventilation und Entrauchung größere Luftmengen erforderlich
<i>Portalaufweitung:</i> Die Amplitude und die Steilheit der am Portal ausgelösten bzw. reflektierten Druckwelle wird reduziert.	<ul style="list-style-type: none"> – unter Umständen kostengünstige Lösung – auch zur Vermeidung von Mikrodruckwellen (Portalknall) günstig 	<ul style="list-style-type: none"> – erhöhter Platzbedarf im Portalbereich – Portalaufweitung über mehrere 100 m erforderlich
<i>Öffnungen zwischen 2 Einspurtunneln, bzw. geöffnete Querschläge:</i> Die Amplituden der Druckschwankungen im Tunnel werden durch Teilreflexionen an den Öffnungen bzw. Querschlägen verkleinert.	<ul style="list-style-type: none"> – kostengünstige Lösung 	<ul style="list-style-type: none"> – unter Umständen aufgrund der Sicherheits- und Ventilationskonzepte weitere Massnahmen zur aerodynamischen Entkoppelung der Tunnelröhren erforderlich (Klappen, Türen, etc.) – ungünstige Überlagerungen der Druckschwankungen beider Röhren möglich

Tabelle 3: Vergleich von baulichen Maßnahmen zur Verringerung der Druckschwankungen im Tunnel

Schachttyp	Funktion	Typischer Ort des Einbaus	Typischer Querschnitt
Druckentlastungsschacht	<ul style="list-style-type: none"> – Erhöhung des Druckkomforts durch Verringerung von Druckschwankungen 	<ul style="list-style-type: none"> – mehr als ca. 500 m von den Portalen evtl. auch entlang des Tunnels. Position und Querschnitte hängen von Zugtyp, Fahrplan, Tunnelgeometrie, etc. ab. 	8 – 15 m ²
Schwallschacht bei unterirdischen Stationen	<ul style="list-style-type: none"> – Verringerung der Luftgeschwindigkeiten auf den Bahnsteigen durch Umlenkung der bewegten Luftsäule in die Umgebung – Verringerung der Traktionsleistung durch reduzierte Luftsäule vor und hinter dem Zug 	<ul style="list-style-type: none"> – unmittelbar vor einer Station zur Verringerung der Luftgeschwindigkeit 	25 – 80 m ²
Entrauchungs- und Ventilations-schacht	<ul style="list-style-type: none"> – Austausch von Frisch- und Abluft zwischen Tunnel und Umgebung 	<ul style="list-style-type: none"> – in der Nähe von Lüftungszentralen oder als passiver Lufteinlass / Rauchaustritt 	5 – 20 m ²
Mikrodruckwellenschacht	<ul style="list-style-type: none"> – Verhinderung von nicht akzeptablen Mikrodruckwellen (Portalknall) am Austrittsportal durch Verringerung von Steilheit und Amplitude der Druckwellen im Tunnel 	<ul style="list-style-type: none"> – in Portalnähe 	10 m ²

Schachttyp	Funktion	Typischer Ort des Einbaus	Typischer Querschnitt
Klimaschacht	– Verbesserung des Tunnelklimas durch erhöhten und oder gezielten Luftwechsel zwischen Tunnel und Umgebung	– in Portalnähe (z.B. als Antirezirkulationsschacht) – im Tunnel evtl. an mehreren Orten zur Erhöhung des Luftwechsels und zur Verringerung der Antriebsleistung	30 m ²
Notausstiegsschacht	– Verkürzung des Fluchtweges durch zusätzliche Zugänge (ggf. belüftet)	– im Tunnel, evtl. an den Portalen – in der Nähe der Sammelpunkte von Rettungskräften	10 m ²

Tabelle 4: Vergleich von unterschiedlichen Funktionen von Schächten in Tunneln im Bereich Aerodynamik, Klima, Lüftung

Parameter	Wert
Typ / Bauart	1 zweigleisige Röhre / Tagbau
freier Tunnelquerschnitt [m ²]	76
Länge [m]	1633
Höhendifferenz zwischen den Portalen [m]	8
Anzahl der Druckentlastungsschächte	2
Entfernung der Druckentlastungsschächte von den Portalen	ca. 500 m
freier Querschnitt eines Druckentlastungsschachtes [m ²]	12.25 (quadratisch)
Gleisbett	je 50 m Schotterfahrbahn, dazwischen feste Fahrbahn

Tabelle 5: Technische Daten des zweigleisigen Bahntunnels Emmequerung der Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist

Zugparameter	Typ / Wert
Lokomotiven / Anzahl	SBB Re460 / 2
Wagen / Anzahl	SBB Einheitswagen IV (EW IV) / 6
Länge der Zugkomposition [m]	196
Fahrgeschwindigkeiten [km/h]	160 - 220
τ [s]	< 1, d.h. keine spezifischen Massnahmen zur Druckertüchtigung

Tabelle 6: Technische Daten eines Testzuges für aerodynamische Abnahmemessungen