

Die Prüfstelle ist „Assoziierter Partner
von EISENBAHN-CERT“ und vom
Eisenbahn-Bundesamt anerkannt.

Prüfstelle
Pionierstraße 10
D - 32423 Minden

Untersuchungsbericht

Aerodynamische Detailuntersuchung der Maßnahmen zur Beherrschung der Mikrodruckwellen-Thematik am Boßlertunnel

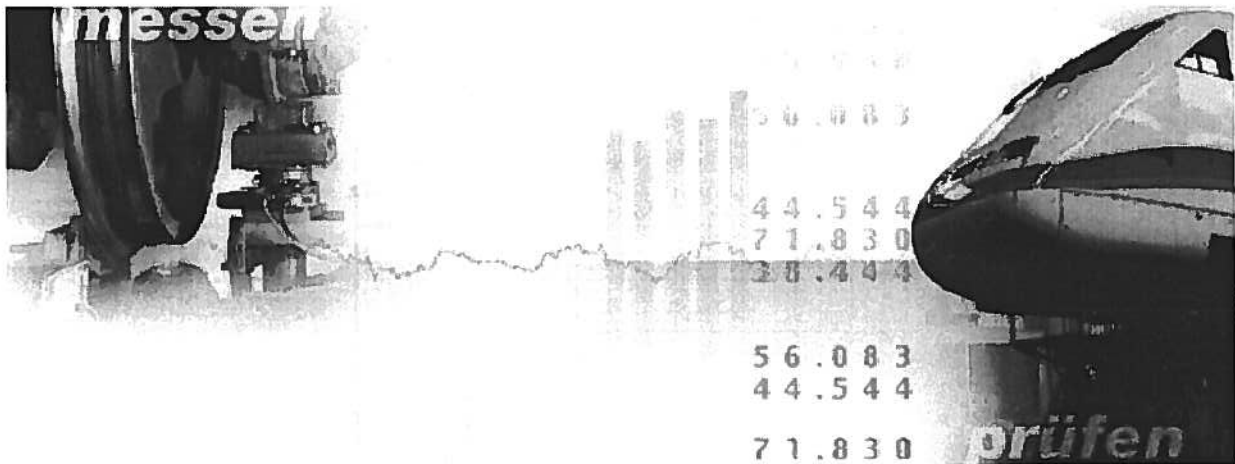


Foto: Contact TIEM

Dokument: 09-P-10633-TTZ 113-MDWNachweisAero-Boßler
Datum: 19.10.2009

Fachabteilung: Verbund und Fahrbahntechnik
Aerodynamik und Klimatechnik
Völckerstraße 5
80939 München

Zertifizierter Bereich:
Technik/Beschaffung



Anwendung eines durch die DQS GmbH
Deutsche Gesellschaft zur Zertifizierung von Managementsystemen
zertifizierten Qualitätsmanagementsystems

Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Untersuchungsbericht beschriebenen Untersuchungsgegenstände. Dieser Untersuchungsbericht darf nicht ohne schriftliche Genehmigung des Auftraggebers veröffentlicht werden. Eine auszugsweise Vervielfältigung bedarf zusätzlich der Zustimmung der Fachabteilung.

| Inhaltsverzeichnis | | Seite |
|---------------------------|---|--------------|
| 1 | Angaben zum Auftrag | 7 |
| 2 | Beschreibung des Untersuchungssachverhalts | 8 |
| 2.1 | Bisheriges Auftreten von Mikrodruckwellen-Phänomenen | 8 |
| 2.2 | Ziel und Einordnung dieser Untersuchungen | 9 |
| 3 | Aerodynamische Untersuchung | 10 |
| 3.1 | Eingangsgrößen Tunnelgeometrie | 10 |
| 3.2 | Eingangsgrößen Betrieb | 10 |
| 3.3 | Modellansätze für die verschiedenen MDW-Teilmechanismen | 11 |
| 3.3.1 | Generierung der Einfahrdruckwelle | 11 |
| 3.3.2 | Aufteilung der Einfahrdruckwelle | 13 |
| 3.3.3 | Emission der Mikrodruckwelle | 14 |
| 3.4 | Vorgehen bei der Untersuchung | 15 |
| 4 | Ergebnisse | 15 |
| 4.1 | Maßnahmenkonzept | 15 |
| 4.2 | Generierung der Einfahrdruckwelle | 17 |
| 4.3 | Aufteilung der Einfahrdruckwelle | 18 |
| 4.4 | Emission der Mikrodruckwelle | 19 |
| 5 | Zusammenfassung | 20 |
| 6 | Unterschriften | 21 |

Verzeichnis der Anlagen

| | | Seite |
|-----|---|-------|
| A1 | Westportal Lageplan | 22 |
| A2 | Westportal Portalansicht | 22 |
| A3 | Westportal Längsschnitt | 23 |
| A4 | Ostportal Lageplan | 24 |
| A5 | Ostportal Portalansicht | 24 |
| A6 | Ostportal Längsschnitt | 25 |
| A7 | Westportal Überfahrtsbauwerk 01 | 26 |
| A8 | Westportal Überfahrtsbauwerk 02 | 26 |
| A9 | Einfahrdruckwellen bei -15°C | 27 |
| A10 | Einfahrdruckwellen bei 35°C | 27 |
| A11 | Aufsteilung bei -15°C - Einfahrt ins Westportal | 28 |
| A12 | Aufsteilung bei -15°C - Einfahrt ins Ostportal | 28 |
| A13 | Aufsteilung bei 35°C - Einfahrt ins Westportal | 29 |
| A14 | Aufsteilung bei 35°C - Einfahrt ins Ostportal | 29 |
| A15 | MDW Emissionen bei -15°C | 30 |
| A16 | MDW Emissionen bei 35°C | 30 |

Verzeichnis der Abkürzungen

| Größe | Symbol | Einheit | Wert / Bemerkungen |
|---|---------------|-------------|--|
| Querschnittsfläche | A | m^2 | |
| Schallgeschwindigkeit | c | m/s | Normalluftschallgeschwindigkeit: $c_0 = 343,5 \text{ m/s}$ |
| Hydraulischer Durchmesser | d_h | m | $= 4 \cdot \text{Querschnitt} / \text{Umfang}$ |
| Druckgradient | dp/dt | Pa/s | |
| Druck | p | Pa | |
| Portalabstand des Messorts in Gleisrichtung | r | m | |
| Zeit | t | s | |
| Temperatur | T | K | |
| Geschwindigkeit | v | km/h | |
| Temperatur | ζ | $^{\circ}C$ | Atmosphärische Normallufttemperatur: $\zeta_0 = 20 \text{ }^{\circ}C$ |
| Verblockung | Φ | - | $= 1 - (A_{zug}/A_{tun})$ |
| Kopf- und Portalformfaktor | η | - | wird empirisch bestimmt |
| Korrekturfaktor für die Abstrahlung | γ_{em} | - | |
| Raumwinkel für die Abstrahlung (Emission) | Ω | rad | |
| Dichte | ρ | kg/m^3 | Atmosphärische Normalluftdichte: $\rho_0 = 1,204 \text{ kg/m}^3$ |
| Integrationsvariable für Gedächtnisintegral | τ | s | |

Indizes

| | |
|-------------------------------------|-----------------|
| am Einfahrportal bzw. Normalzustand | l_0 |
| bezogen auf Position 1, 2 bzw. 3 | l_1, l_2, l_3 |
| bezogen auf den Tunnel | l_{tun} |
| bezogen auf das Fahrzeug | l_{zug} |

Quellenverzeichnis/Literaturverzeichnis

- [Ad08] **Adami S., Kaltenbach H.-J.:** *Sensitivity of the wave-steepening in railway tunnels with respect to the friction model.* Proceedings of the 6th International Colloquium on: Bluff Body Aerodynamics and Applications, Milano, Italy, 2008.
- [Be02] **Bellenoue M., Kageyama T.:** *Train/tunnel geometry effects on the compression wave generated by a high speed train.* TRANSAERO, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol. 79, pp. 276-288, Springer, 2002.
- [BRD90a] **BlmSchG:** *Bundes-Immissionsschutzgesetz – Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge.* Fassung vom 14. Mai 1990.
- [BRD90b] **16. BlmschV:** *Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BlmSchV).* Fassung vom 12. Juni 1990.
- [CEN06] **EN 14067-5:2006:** *Railway Applications – Aerodynamics – Part 5: Requirements and Test Procedures for aerodynamics in tunnels.* Europäische Norm, CEN, Brüssel, 2006.
- [DB06a] **Deutsche Bahn AG:** *Beurteilung von Mikrodruckwellen-Ereignissen im Bereich der Tunnel Euerwang und Irlahüll der Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt.* DB Systemtechnik, Sachverständigenorganisation (SVO). Nicht-öffentliches Gutachten des Gutachters Dr. Degen, Minden, Mai 2006.
- [DB06b] **DB Netz AG:** *NBS Nürnberg-Ingolstadt – Besprechung „Mikrodruckwelle“ vom 24.05.06: Erklärung zur Inbetriebnahmegenehmigung (Selbstverpflichtungserklärung).* Nicht-öffentliches Schreiben an den Präsidenten des Eisenbahn-Bundesamtes vom 26.05.06.
- [DB06c] **Deutsche Bahn AG:** *Projektstudie Beherrschung der Mikrodruckwellen-Thematik (PS BEMT).* Nicht-öffentlicher Bericht 06-P-4663-TZF13, DB Systemtechnik, TZF 13 Aerodynamik und Klimatechnik, München, Oktober 2006.
- [Hie09] **Hieke M., Kaltenbach H.-J., Tielkes T.:** *Prediction of micro-pressure wave emissions from high-speed railway tunnels.* Proceedings of the 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, New Brunswick, USA, 2009, BHR Group, pp. 487-501.
- [EG02] **TSI HS RST 2002:** *Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems (TSI Rolling Stock).* Veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 245/402 vom 12.9.2002.
- [EG03] **Richtlinie 2003/10EG:** *Richtlinie 2003/10/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Februar 2003 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Lärm).*
- [EG08] **Revision TSI HS RST:** *Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems (TSI Rolling Stock).* Veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L84/132 vom 26.03.2008. In Kraft ab 01.09.2008.
- [Ho00] **Howe M.S., Iida M., Fukuda T.:** *Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal.* Journal of Fluid Mechanics, Vol. 425 (2000), pp. 111-132.
- [Ho04] **Howe M.S.:** *On the design of a tunnel-entrance hood with multiple windows.* Journal of Sound and Vibration, Vol. 273 (2004), pp. 233-248.
- [Hr03] **Herb J., Deeg P., Tielkes Th.:** *Assessment of possible sonic boom effects in German high-speed railway tunnels – experimental and numerical data for the wave steepening*

- process*. Proceedings of the 11th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Luzern, Switzerland, 2003, BHR Group, pp. 775-782.
- [Nk06] **N’Kaoua J. et al.:** *A parametric study into the factors affecting the development and alleviation of micro-pressure waves in railway tunnels*. Proceedings of the 12th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Portoroz, Slovenia, 2006, BHR Group, pp. 789-803.
- [Oz91] **Ozawa S. et al.:** *Countermeasures to reduce micro-pressure waves radiating from exits of Shinkansen tunnels*. Proceedings of the 7th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Brighton, UK, 1991, BHR Group, pp. 253-266.
- [Oz97] **Ozawa S., Murata K., Maeda T.:** *Effect of ballasted track on distortion of pressure wave in tunnel and emission of micro-pressure wave*. Proceedings of the 9th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, 1997, BHR Group, pp. 935-947.
- [Ril853] **DB Netz AG:** *Richtlinie 853 (Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten)*, DB Netz AG, Frankfurt a. M., Januar 2007
- [RTRI96] **Railway Technical Research Institute:** *Definition of the tunnel geometry for the avoidance of sonic boom*. Untersuchungsbericht zu Auftragsmessungen für die Deutsche Bahn AG, Forschungs- und Technologiezentrum, ZBT 52 Aerodynamik, August 1996.
- [Sch08] **Schlämmer M., Hieke M.:** *CFD-simulations on the generation of the pressure wave when a high-speed train enters a tunnel with different portal modifications*. Proceedings of the 6th International Colloquium on: Bluff Body Aerodynamics and Applications, Milano, Italy, 2008.
- [SW02] **Schulte-Werning B. et al. (eds.):** *TRANSAERO – A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Operation*. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol. 79, Springer, 2002.
- [So96] **Socket H., Ehrendörfer K.:** *Verformung einer Druckwelle in einem Eisenbahntunnel infolge eines Schotterbetts und seitlicher Kammern*, Untersuchungsbericht im Auftrag der DB AG, März 1996.
- [Ti06] **Tielkes Th.:** *Aerodynamic Aspects of Maglev Systems*. In R. Schach, M. Witt (Eds.): *Maglev’ 2006 Germany – Proceedings of the 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. Dresden 2006, Vol. II, ISBN 3-86005.535-6, pp. 641-649.
- [Ti08] **Tielkes Th., Kaltenbach H.-J., Hieke M., Deeg P., Eisenlauer M.:** *Measures to Counteract Micro-pressure Waves Radiating from Tunnel Exits of DB’s New Nuremberg-Ingolstadt High-speed Line*. In: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Vol. 99, pp. 40-47, Springer, 2008.

1 Angaben zum Auftrag

Aufgabenstellung:

Es sollen die von den Portalen des Boßlertunnels emittierten Mikrodruckwellen als vollständige Drucksignale bestimmt werden. Diese Signale dienen als Ausgangsbasis für die nachfolgende akustische Bewertung, welche den Nachweis erbringen soll, dass die Mikrodruckwellenemissionen am Boßlertunnel die aktuellen Richtwerte einhalten. Die Beauftragung erfolgte per Leistungsvereinbarung 09-P-10633-VTZ113-MDW-Nachweis-UlmWendlingen-v3 vom 10.06.2009.

Auftraggeber:

DB Projektbau GmbH
I.BV-SW-G(2)
Räpplenstraße 17
70191 Stuttgart

Fachabteilung:

Deutsche Bahn AG
Vorstandsressort Technik, Systemverbund und Dienstleistungen
DB Systemtechnik
TTZ 113 Aerodynamik und Klimatechnik
Völckerstraße 5
80939 München

Umfang des Berichtes und der Anlagen:

30 Seiten (davon 9 Seiten Anlagen)

Verteiler des Untersuchungsberichtes:

5 x Auftraggeber
2 x TTZ 113

2 Beschreibung des Untersuchungssachverhalts

2.1 Bisheriges Auftreten von Mikrodruckwellen-Phänomenen

Im Rahmen von Versuchsfahrten auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt trat im Dezember 05 unter betrieblichen Bedingungen erstmals in Deutschland ein deutlich akustisch wahrnehmbares Mikrodruckwellen-Phänomen auf. Hierbei handelt es sich um die von einem Tunnelportal ausgehende Emission einer hörbaren Mikrodruckwelle. Das Phänomen wird umgangssprachlich auch als *Tunnelknall* oder in der englischen Sprache als *Sonic Boom* bezeichnet (Letztere Bezeichnung ist dabei eher unglücklich, da sie eine Verwechslung mit dem Überschallknall von Flugzeugen nahelegt).

Die Mechanismen, die zu einer Entstehung einer hörbaren Mikrodruckwelle (MDW) führen können, sind in der Literatur (z.B. [Oz91, NK06, SW02]) ausführlich beschrieben. Im Wesentlichen wird die Entstehung hörbarer MDW durch hohe Zugeinfahrtsgeschwindigkeiten in den Tunnel, enge Tunnelquerschnitte, große Tunnellängen sowie die Abwesenheit – sprich Feste Fahrbahn – von dem Mechanismus entgegenwirkender nennenswerter Reibung und Dispersion (wie sie in Tunnel mit Schotteroberbau vorliegt) bedingt.

Vor diesem Hintergrund ist es erklärbar, dass in den bisherigen zweigleisigen, 92 qm großen und mit einer Festen Fahrbahn versehenen SFS-Tunneln der NBS Köln-Rhein/Main keine MDW-Erscheinungen auftreten; der längste Tunnel der NBS Köln-Rhein/Main – der Schulwaldtunnel – ist mit 4500 m Länge „zu kurz“, als dass sich ein MDW-Phänomen ausbilden kann. Die bestehenden, langen SFS-Tunnel (z.B. Landrückentunnel mit mehr als 10 km Länge) auf den SFS Hannover-Würzburg und SFS Mannheim-Stuttgart sind in Schotteroberbau ausgeführt, so dass auch hier keine MDW-Erscheinungen auftreten.

Unter betrieblichen Bedingungen sind Mikrodruckwellen-Erscheinungen bisher nur aus Japan bekannt. Hier trat das Mikrodruckwellen-Phänomen erstmals 1975 mit dem Ausbau der Sanyo Shinkansen Strecke auf und ist seither ein Standardaspekt der Tunnelaerodynamik japanischer Shinkansen-Linien. In Europa sind bisher unter betrieblichen Bedingungen keine Mikrodruckwellen-Phänomene aufgetreten; Mikrodruckwellen-Erscheinungen konnten nur in speziellen Versuchen „künstlich“ (Erhöhung des Versperrungsmaßes durch Paralleleinfahrt zweier Züge) hervorgerufen werden [SW02, Hr03].

Bei den Versuchsfahrten auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt traten hingegen im Dezember 2005 erhebliche MDW-Emissionen an den Portalen der 7300 m bzw. 7700 m langen Tunnel Irlahüll und Euerwang auf [Ti06]. Diese Tunnel sind zweigleisig mit einem 92 qm-Regelquerschnitt und besitzen eine Feste Fahrbahn. Zur Minderung der MDW-Problematik dieser beiden Tunnel wurde für beide Tunnel eine Ausrüstung mit Gleisabsorbieren – die ähnlich einem Schotteroberbau dem MDW-Entstehungsmechanismus durch Reibung und Dispersion entgegen wirken – beschlossen¹. Das Maßnahmenpaket wurde im März und April 2006 erfolgreich umgesetzt und hat zu einer deut-

¹ Die NBS Nürnberg-Ingolstadt war ursprünglich mit Schotteroberbau planfestgestellt. Nach dem Entschluss eine Feste Fahrbahn zu verbauen, fand eine Neubewertung der MDW-Thematik nicht statt. Die im Frühjahr ergriffene Maßnahme der Absorberausrüstung der Tunnel ist dem damals gegebenen, noch verbleibenden Terminrahmen bis zur IBN geschuldet. Für künftige Bauvorhaben, in denen MDW-Gegenmaßnahmen zu einem früheren Zeitpunkt eingebracht werden können, werden andere, wirtschaftlichere Gegenmaßnahmen möglich sein.

lichen Minderung der MDW-Emissionen geführt. Am 28.05.06 konnte dann planmäßig der kommerzielle Betrieb auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt aufgenommen werden.

2.2 Ziel und Einordnung dieser Untersuchungen

Vor dem Hintergrund der MDW-Vorkommnisse auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt und der dort gewonnenen Erkenntnisse ist es Aufgabe dieser Untersuchung, die von den Tunnelportalen des Boßlertunnels ausgehenden MDW-Emissionen zu prognostizieren. An den zu untersuchenden Portalen sind bereits Gegenmaßnahmen, sogenannte Portalhauben, in den Planfeststellungsunterlagen ausgewiesen. Eine Neubewertung dieser Maßnahmen nach aktuellem Erkenntnisstand [Hie09] ist jedoch noch nicht durchgeführt worden und soll an dieser Stelle erfolgen. Zudem werden die bisher nur schematisch skizzierten Entlüftungsöffnungen in den Hauben detailliert bezüglich Position und Größe spezifiziert. Die Bewertung der Wirksamkeit der Hauben erfolgt in dieser Untersuchung nach neuesten Erkenntnissen, die innerhalb des bauvorhaben-übergreifenden Projekts BEMT (Beherrschung Mikrodruckwellen-Thematik, [DB06c]), erarbeitet wurden. Die Entwicklung geeigneter Werkzeuge zur Prognose der emittierten MDW innerhalb des Projekts BEMT ist abgeschlossen, gegenwärtig läuft die Abstimmung mit dem EBA über die einzuhaltenden Richtwerte und die entsprechenden Nachweisverfahren.

Die vorliegende Untersuchung stützt sich dabei auf folgende Grundlagen:

- die Auswertung und Interpretation der in 1:1-Versuchen auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt gewonnenen eigenen Messdaten;
- die Erfahrungen mit der Nachweisführung und Bewertungskriterien-Festsetzung zur Mikrodruckwellen-Thematik an der NBS Nürnberg-Ingolstadt und am Katzenbergtunnel (ABS Karlsruhe-Base);
- die Auswertung und Interpretation der in 1:1-Versuchen, in denen hörbare Mikrodruckwellen „künstlich“ generiert wurden, gewonnenen eigenen Messdaten;
- die Auswertung und Interpretation der in verschiedenen, beim RTRI (Japan) und bei AEA-T Rail bzw. DeltaRail (Großbritannien) im Auftrag der DB Systemtechnik, TZF 13 Aerodynamik und Klimatechnik durchgeführten, Modellversuchen gewonnenen Messdaten;
- die Auswertung und Interpretation von Simulationsrechnungen;
- veröffentlichte (japanische) Messdaten, Modellierungsansätze und Maßnahmenempfehlungen;
- unseren Erfahrungsaustausch mit dem japanischen Railway Technology Research Institute (RTRI);
- die Modellierungsvorschriften und Werkzeuge, die auf Basis dieser Erfahrungen aufgestellt und an die Bedingungen der zu untersuchenden Tunnel angepasst wurden.

Weitestgehend repräsentieren diese Grundlagen das in Deutschland, Europa und Japan vorhandene Fachwissen zur Mikrodruckwellen-Thematik.

Das Ziel dieser rein aerodynamischen Untersuchung ist ausschließlich die Bestimmung des Zeitverlaufs der MDW-Emissionen im Bereich der Portale des Boßlertunnels. Eine akustische Bewertung bzw. eine Einordnung der Emissionen bezüglich der aktuell diskutierten Richtwerte erfolgt in einer getrennten Untersuchung durch TTZ 112 „Akustik und Erschütterungen“. Die in dieser Untersuchung ermittelten Zeitverläufe werden an TTZ 112 übergeben, um aus den Signalen die geforderten Schallpegel abzuleiten und akustisch zu bewerten.

3 Aerodynamische Untersuchung

3.1 Eingangsrößen Tunnelgeometrie

Der Boßlertunnel besitzt zwei eingleisige Tunnelröhren die über Verbindungsbauwerke in einem regelmäßigen Abstand miteinander verbunden sind. Aus Gründen der Sicherheit sind die Verbindungsbauwerke mit Schleusentüren verschlossen, ein Überströmen von Luft aus einer Tunnelröhre in die andere ist somit nicht möglich. Die westliche Tunnelröhre ist 8.722 m, die östliche Röhre ist 8.788 m lang. Am Portal Aichelberg sind zwei 27,5 m lange Portalhauben geplant, am Portal Buch sind zwei 34 m lange Portalhauben in den Planungen ausgewiesen. Alle Hauben haben einen lichten Querschnitt von 90 m^2 und sind teilweise im Gelände integriert, korrespondieren aber über Entlüftungsöffnungen mit der freien Umgebung. Diese Öffnungen sind gegenwärtig nur grob skizziert und werden im Rahmen dieser Untersuchung im Hinblick auf Position und Größe genauer spezifiziert. Die Ausfahrt aus dem Portal Aichelberg erfolgt in einen Geländeeinschnitt in Troglage, im Bereich des Portals Buch mündet der Tunnel direkt auf die Filstalbrücke.

Detaillierte Ausschnitte aus den Planungsunterlagen befinden sich im Anhang (A1 bis A8). Der lichte Querschnitt der Tunnelröhren beträgt $60,5 \text{ m}^2$. Als Oberbau kommt eine Feste Fahrbahn zum Einsatz. Die Wände und Decken sind mit hydraulisch glatten Betonelementen verkleidet. Alle Berechnungen in dieser Untersuchung erfolgen in geraden Tunnelröhren konstanten Querschnitts (siehe Bild 1).

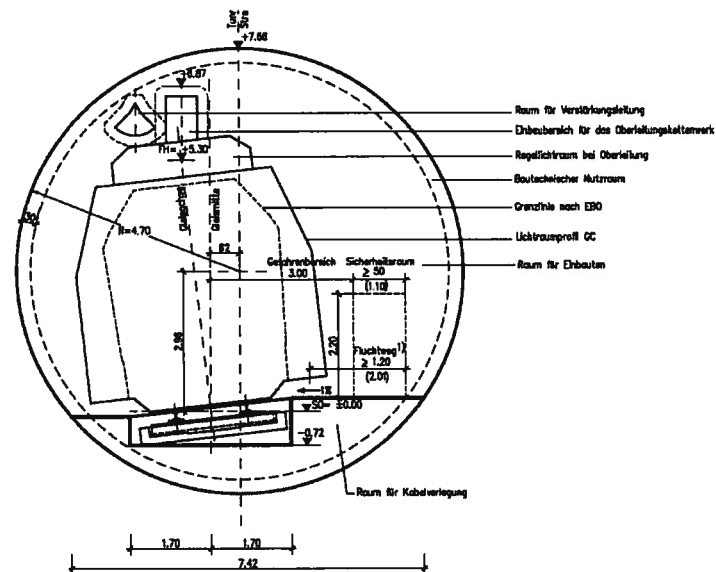


Bild 1: Regelquerschnitt der Tunnel (Zeichnung entnommen aus [Ril853])

3.2 Eingangsrößen Betrieb

Die NBS Ulm-Wendlingen wird für eine Betriebsgeschwindigkeit von 250 km/h gebaut. In beiden Röhren des Boßlertunnels ist restriktionsfreier Gleiswechselbetrieb vorgesehen. Die vorliegende Untersuchung bezieht sich damit auf 250 km/h schnellen Betrieb.

Die NBS soll die Technischen Spezifikationen für Interoperabilität erfüllen. Vor diesem Hintergrund sind die Untersuchungen nicht ausschließlich auf ICE-Züge, sondern auch auf aerodynamisch ungünstigere, aber noch zur TSI HS RST [EG02, EG08] konforme Züge zu beziehen. Die vorliegen-

de Untersuchung bezieht sich damit auf ICE3-Züge, ICE1-Züge (Kopfform identisch mit der von ICE2-Zügen) sowie auf einen aerodynamisch ungünstigen „TSI-Zug“.

3.3 Modellansätze für die verschiedenen MDW-Teilmechanismen

Die Erzeugung von Mikrodruckwellen lässt sich anhand der folgenden Darstellung gut beschreiben:

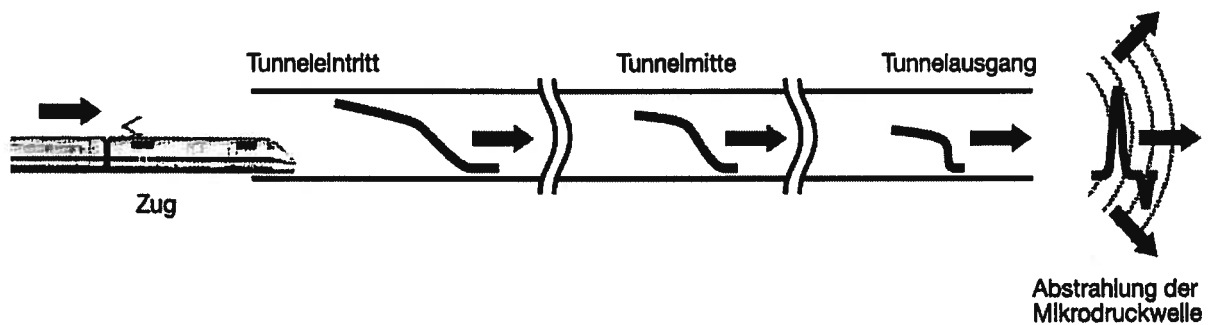


Bild 2: Prinzipskizze der verschiedenen Teilmechanismen des Mikrodruckwellen-Phänomens

Bei der Einfahrt des Zugkopfes in den Tunnel entsteht durch die plötzliche Querschnittsänderung die Einfahrdruckwelle, die dem Zug mit Schallgeschwindigkeit voraus läuft. Wenn die Reibungsverluste an Leibung und Einbauten klein sind und keine größeren „trägen“ Luftvolumina in im Tunnel verlegten porösen Materialien (Schotter) oder in Kammern und Spalten enthalten sind, stellt sich diese sogenannte Einfahrdruckwelle während ihrer Laufzeit durch den Tunnel stetig auf. Im hinteren Teil der Welle ist der Druck dann höher als im Vorderen. Damit einher geht eine etwas höhere Temperatur und daraus resultierend eine etwas höhere Schallgeschwindigkeit im hinteren Bereich der Welle. Damit bewegt sich dieser Teil schneller als der Vordere und der Druckgradient wird immer größer. Insbesondere in sehr langen Tunneln kann der Druckgradient so stark ansteigen, dass am Tunnelausgang eine hörbare Mikrodruckwelle emittiert wird, die je nach Stärke als ein dumpfer „Plopp“ oder als ein lauter Knall empfunden wird.

Die Entstehung des Tunnelknalls lässt sich vereinfacht durch drei Einzelprozesse beschreiben:

- Erzeugung der Einfahrdruckwelle bei der Einfahrt des Zuges in den Tunnel,
- Aufsteilung der Druckwelle auf ihrem Weg durch den Tunnel,
- Emission einer Mikrodruckwelle am gegenüberliegenden Tunnelausgang.

Für jeden dieser Teilprozesse werden nachfolgend die Modellansätze dargestellt, auf denen diese Untersuchung basiert. Die in vorangegangenen MDW-Untersuchungen anderer Bauprojekte verwendeten empirischen Ansätze sind inzwischen im Projekt BEMT weiterentwickelt worden und ermöglichen die Bestimmung der emittierten MDW mit dem vollständigen Druckverlauf und nicht mehr nur der maximalen Gradienten und Amplituden.

3.3.1 Generierung der Einfahrdruckwelle

Für die Berechnung des Verlaufs der Einfahrdruckwelle in dieser Untersuchung wird die Einfahrt des Zuges per Strömungssimulation [Sch08] berechnet. Zum Einsatz kommt dabei die kommerzielle Software ANSYS-CFX in der Version 12.0. Mittels ICEM-CFD in der Version 12.0 werden die

Berechnungsgitter erzeugt, mit denen die Simulationen durchgeführt werden. Für beide Portale wird ein Rechengitter erzeugt, welches die lokale Geometrie geeignet abbildet.

Die Rechengitter sind zweigeteilt. Sie bestehen aus einem stationären Teil, welcher die Umgebung, den Portalbereich und den Tunnel abbildet, sowie einem beweglichen Teil, der den Zug enthält und der sich innerhalb des stationären Teils in Fahrtrichtung des Zuges longitudinal bewegen kann. Für den beweglichen Zugteil wird auf ein bereits existierendes Gitter des ICE 3 zurückgegriffen. Die grundlegenden Parameter und Randbedingungen der Simulationen sind in Tabelle 1 abgebildet:

Tabelle 1: Parameter und Randbedingungen der Strömungssimulation

| Parameter | Wert | Einheit |
|----------------------|-----------------------------|---------|
| Turbulenzmodell | SST | |
| Wandfunktionen | Automatic | |
| Wärmetransportmodell | Total Energy | |
| Advection Scheme | High Resolution | |
| Transient Scheme | Second Order Backward Euler | |
| Stoffdaten | Luft mit Idealgasverhalten | |
| Temperatur | 10 | °C |
| Zuggeschwindigkeit | 250 | km/h |
| Zeitschrittweite | 0,048 | s |
| Fahrzeug | ICE 3 | |

Die Einfahrdruckwellen im Falle von davon abweichenden Randbedingungen (beispielsweise eine andere Temperatur und damit geänderte Dichte und Schallgeschwindigkeit) sind näherungsweise skalierbar entsprechend dem Ansatz aus [Ti08]:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot v_{zug}^2 \cdot f(M, \Phi) \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = \eta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{zug}^3 \cdot f(M, \Phi) \cdot \frac{1}{d_{h,tun}} \quad (2)$$

$$f(M, \Phi) = \frac{1 - \Phi^2}{\left(1 - \frac{v_{zug}}{c_0}\right) \left(\frac{v_{zug}}{c_0} + \Phi^2\right)} \quad (3)$$

Die Einfahrdruckwelle anderer Fahrzeuge wird basierend auf der Einfahrdruckwelle des ICE 3 so skaliert, dass der maximale Einfahrdruckgradient des ICE 1 6% größer ist als der des ICE 3 und der Einfahrdruckgradient des TSI-Zuges 30% größer ist als bei der ICE 3 Einfahrt.

Der „TSI-Zug“ stellt an dieser Stelle eine Besonderheit dar, da für diesen virtuellen Zug keine eindeutigen Vorgaben zum Fahrzeugquerschnitt und zur Kopfform gemacht werden können. Die tun-

nelaerodynamischen Eigenschaften dieses Fahrzeugs sind vielmehr durch die Anforderung § 4.2.6.4 der TSI HS RST [EG08] indirekt vorgegeben. Eine Auswertung und Übertragung dieser Anforderung resultiert in dem Ansatz, dass für den „TSI-Zug“ über den Geschwindigkeitsbereich von 250 km/h bis 300 km/h ein Einfahrdruckgradient angesetzt werden kann, der dem 1,3-fachen Einfahrdruckgradienten eines ICE 3-Zugkopfes bei gleicher Geschwindigkeit entspricht.

3.3.2 Aufsteilung der Einfahrdruckwelle

Die Berechnung der Aufsteilung der Druckwelle beim Durchlaufen des Tunnels erfolgt mit dem innerhalb des Projekts BEMT neu entwickelten Programm „WAVE“ in der Version 1.4. Dieses Programm basiert auf dem in [Ad08] beschriebenen Berechnungsansatz und kann die Aufsteilung für das vollständige Zeitsignal des Druckes berechnen.

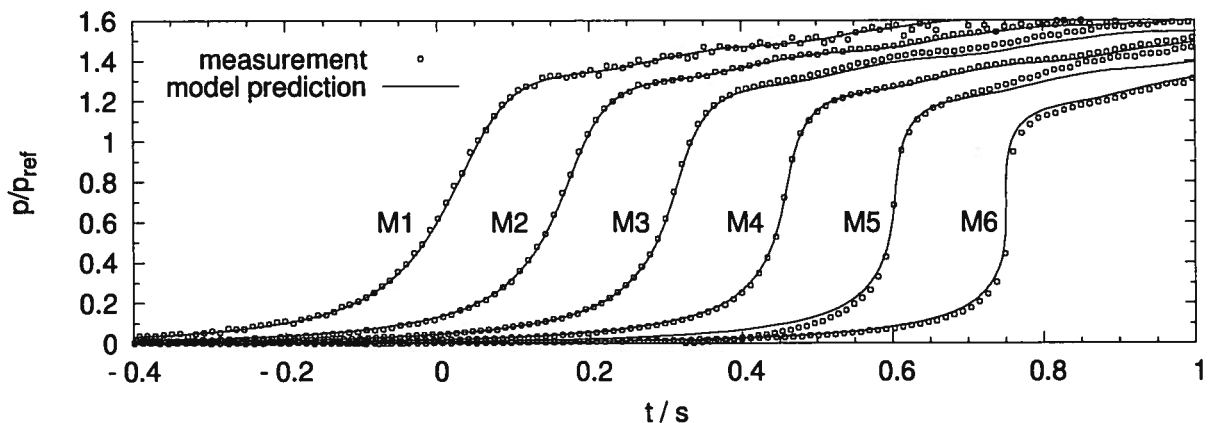


Bild 3: Vergleich von gemessenen und berechneten Druckverläufen an 6 Positionen innerhalb des Euerwangtunnels ohne akustische Absorber

Die Anwendung wurde anhand von Messungen innerhalb der Tunneln Euerwang und Irlahüll auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt kalibriert. Die innere Auskleidung (Betonschalung) dieser beiden Tunnel ist repräsentativ für neue HGV-Tunnel, so dass die aerodynamischen Eigenschaften vergleichbar mit dem Boßlertunnel sind. In Bild 3 ist ein Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Druckwellen dargestellt.

Für die Berechnung der Aufsteilung mit WAVE kommen folgende Parameter zum Einsatz:

Tabelle 2: Parameter und Randbedingungen der Aufsteilungsberechnung

| Parameter | Wert | Einheit |
|------------------------------|------------|---------|
| Bewegtes Rechengitter | An | |
| Räumliche Diskretisierung | 0,0625 | m |
| CFL- Zahl | 0,9 | |
| Nachlauf der Welle | 500 | m |
| Stationäre Reibung | An | |
| Reibungskoeffizient | 0,04 | |
| Instationäre Reibung | An | |
| Instationäres Reibungsmodell | Vardy 2003 | |
| Inst. Wichtungsfaktor | 2,5 | |

| Fortsetzung Tabelle 2 | | |
|-----------------------|---------------------|----------------|
| Parameter | Wert | Einheit |
| Tunneltemperatur | 12 | °C |
| Tunnellänge | 8800 | m |
| Tunnelquerschnitt | 60,5 | m ² |
| Hydr. Durchmesser | 8,5 | m |
| bei Unstetigkeiten | Alte Werte benutzen | |

3.3.3 Emission der Mikrodruckwelle

Wenn die dem Zugkopf voraus laufende Verdichtungswelle das Ausfahrtportal erreicht, wird sie dort fast vollständig reflektiert und läuft als Verdünnungswelle zurück in den Tunnel. Ein geringer Teil ihrer Energie wird in Form einer Mikrodruckwelle an die Umgebung abgestrahlt. Die Form der abgestrahlten MDW kann nach [Oz97] über die analytische Fernfeldlösung für eine vibrierende Scheibe (bzw. Kolben) in einer unendlich ausgedehnten Wand bestimmt werden:

$$P_{MDW}(t) = \frac{A_{tun}}{\gamma_{em} \cdot \Omega \cdot c_0 \cdot r} \cdot \left[\frac{d}{dt} p\left(t - \frac{r}{c_0}\right) + \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\pi} \cdot T_1} \cdot \int_0^{t - \frac{r}{c_0}} e^{-\frac{\left(t - \frac{r}{c_0} - \tau\right)^2}{4 \cdot T_1^2}} \frac{d}{dt} p(\tau) d\tau + \right. \tag{5}$$

$$\left. + \frac{11}{50 \cdot \sqrt{\pi} \cdot T_2^2} \cdot \int_0^{t - \frac{r}{c_0}} \left(t - \frac{r}{c_0} - \tau\right) e^{-\frac{\left(t - \frac{r}{c_0} - \tau\right)^2}{4 \cdot T_2^2}} \frac{d}{dt} p(\tau) d\tau \right]$$

Dabei bezeichnet r den Abstand vom Portal entlang der Tunnelachse und Ω den Raumwinkel, der über die Abstrahlung in die Portalumgebung charakterisiert ist. Der Faktor γ_{em} stellt eine Korrektur bzw. empirische Anpassung an Messwerte dar.

Als Höchstwert für den Raumwinkel kann der Wert $\Omega = 2\pi$ angesehen werden. Dies entspricht einem Portal, das in eine flache Umgebung ohne Hindernisse mündet. Die Druckwelle kann hier sowohl vor als auch hinter das Portal abgestrahlt werden. Ist der freie Raum in der Portalumgebung durch Trogvorbauten oder Einschnitte versperrt, muss das durch Verminderung von Ω berücksichtigt werden.

Neueste Messungen im Rahmen des Projekts BEMT am Euerwangtunnel – das südliche Ausfahrtportal liegt in einem Geländeeinschnitt – lassen Rückschlüsse auf die zu erwartenden Verhältnisse am Boßlertunnel zu. In Tabelle 3 sind verschiedene real gemessene Abstrahlenszenarien mit den entsprechend Gl. 5 berechneten Abstrahlwinkeln dargestellt:

Tabelle 3: Berechnete Abstrahlwinkel von gemessenen MDW in Abhängigkeit von der Umgebung

| Tunnel | Abstand vom Portal | $\gamma_{em} \cdot \Omega$ |
|---|--------------------|----------------------------|
| Euerwang Südportal (Schrägportal ins Freie) | 25 m | 3,2 |
| | 50 m | 3,2 |

Da der Boßlertunnel am Portal Aichelberg in einem Geländeeinschnitt ins Freie mündet, werden hier die Abstrahlwinkel vom Euerwang Südportal $\Omega = 3,2$ benutzt. Für das Portal Buch, welches

direkt auf die Filstalbrücke mündet, wird im Rahmen einer eher konservativen Abschätzung ebenfalls $\Omega = 3,2$ benutzt. Der wahre Abstrahlwinkel wird etwas größer sein, kann aber aufgrund fehlender Erfahrungswerte - bisher gibt es keine MDW emittierenden Portale die direkt auf eine Brücke münden - nicht genauer prognostiziert werden. Alle Drucksignale werden in einem Abstand von 25 m vom Portal berechnet.

3.4 Vorgehen bei der Untersuchung

Über die in Abschnitt 3.3.1 beschriebene CFD-Lösung mittels „ANSYS-CFX 12.0“ wird der zeitliche Verlauf der Einfahrdruckwelle für die verschiedenen Fahrzeuge und Umgebungsbedingungen bestimmt. Anschließend wird die durch die Tunnelröhre laufende Verdichtungswelle entsprechend dem Aufstellungsansatz 3.3.2 als vollständiges Zeitsignal bestimmt. Die Berechnung erfolgt mittels „WAVE“ in der Version 1.4. An den Tunnelportalen wird ein Teil der Verdichtungswelle als MDW in die Umgebung emittiert. Die Berechnung des vollständigen Drucksignals der emittierten MDW erfolgt analog Abschnitt 3.3.3.

Die berechneten MDW-Signale werden an TTZ 112 „Akustik und Erschütterungen“ zur Bestimmung der akustischen Pegel und für die akustische Bewertung der MDW-Emissionen übergeben. Die Vorgehensweise zur Pegelbestimmung und der Bewertung sind nicht Bestandteil dieser aerodynamischen Untersuchung und werden in einem separaten Bericht durch TTZ 112 dargestellt.

4 Ergebnisse

4.1 Maßnahmenkonzept

Die in der Planung ausgewiesenen Portalbauwerke besitzen Entlüftungsöffnungen, die bisher nur schematisch dargestellt sind. Im Rahmen dieser Untersuchung erfolgt eine Anpassung der Position und Größe dieser Öffnungen, so dass die geforderten akustischen Richtwerte eingehalten werden. Dabei werden die Öffnungen iterativ so lange modifiziert bis die Schallpegel der MDW so weit reduziert sind, dass der Nachweis für die Einhaltung der Richtwerte erbracht werden kann.

Der Nachweis erfolgt grundsätzlich für die Fahrt auf dem Regelgleis. Unter der Randbedingung eines restriktionsfreien Gleiswechselbetriebs muss die für das Regelgleis entworfene Haube inklusive der spezifischen Anordnung der Öffnungen auch am Gegengleis angebracht werden. Für beide Portale - Aichelberg und Buch - ist das ohne Einschränkungen möglich. Sollte eine Übernahme des Haubenkonzepts vom Regelgleis nicht möglich sein, muss im Falle von Gleiswechselbetrieb eine Geschwindigkeitsreduktion im Bereich des Portals erfolgen.

Für die Portale des Boßlertunnels wurde ein Konzept erarbeitet, welches die in Bild 4 dargestellten Haubenbauwerke umfasst. Die Länge der Haube am Portal Buch beträgt 34 m vom Fußpunkt der Portalschräge bis zum Querschnittsprung des Übergangs zum Tunnel. Die Portalschräge ist mit 45° ausgebildet und der lichte Querschnitt beträgt 90 m^2 . Für die Haube am Portal Aichelberg konnte keine geeignete, mit der vorliegenden Planung kompatible Lösung gefunden werden, die auf einer Länge von 27,5 m untergebracht werden kann. Eine geeignete Variante ist 34 m lang, gemessen vom Fußpunkt der Portalschräge bis zum Querschnittsprung des Übergangs zum Tunnel. Der Fußpunkt des Portals wird dabei gegenüber der Planung nicht verschoben. Die Haube verlängert sich ausschließlich unterirdisch. Der Querschnittsprung beim Übergang zum Tunnel verschiebt sich somit um 6,5 m in den Berg hinein. Unverändert bleibt die finale Geländemodellie-

rung, so dass die Außenansicht gleich bleibt. Die Öffnungen können aufgrund der geringen Überdeckung vor dem die Haube überquerenden Weg so angebracht werden, dass keine Umplanung des Geländes notwendig ist. Der lichte Querschnitt der Haube beträgt wie zuvor beim Portal Buch 90 m².

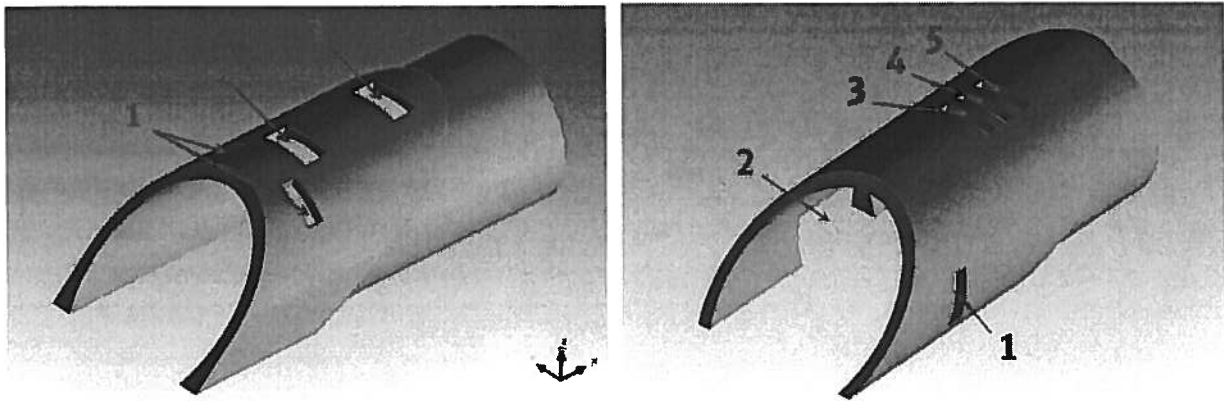


Bild 4: Detailzeichnung der Portalhauben (links: Portal Aichelberg, rechts: Portal Buch)

Die Position und Größe der einzelnen Öffnungen sind in Tabelle 4 abgebildet. Die Haube des Portals Aichelberg besitzt 4 Öffnungen, von denen die ersten beiden symmetrisch angeordnet sind. Die Haube am Portal Buch besitzt eine permanent geöffnete Durchfahröffnung für Rettungsfahrzeuge, eine kleine Öffnung gegenüber und drei Öffnungen an der Haubendecke.

Tabelle 4: Größe und Position der Öffnungen in den Portalhauben

| Portal | Öffnung | Position des Mittelpunkts hinter dem Fußpunkt des Einfahrportals in m | Breite in m | Höhe in m |
|-------------------|---------|---|-------------|-----------|
| Portal Aichelberg | 1 (2x) | 13 | 1,33 | 3 |
| | 2 | 16 | 2 | 4 |
| | 3 | 24 | 2 | 4 |
| Portal Buch | 1 | 11 | 1,25 | 4 |
| | 2 | 14,5 | 8 | 3,5 |
| | 3 | 20 | 1 | 4 |
| | 4 | 22 | 1 | 4 |
| | 5 | 24 | 1 | 4 |

Für diese beiden Haubenkonfigurationen wurde ein entsprechendes CFD-Gitter der Portale und der näheren Portalumgebung erstellt, um die Generierung der Einfahrdruckwelle simulieren zu können. In Bild 5 sind die beiden finalen Einfahrscenarien abgebildet. Zur Optimierung der Rechenzeit wurden verschiedene Vereinfachungen vorgenommen. So wurden z.B. die Öffnungen der Hauben des Gegengleises nur dann detailliert mit abgebildet, wenn sie nahe genug an den Öffnungen der Haube des Regelgleises lagen. Auch der Geländeverlauf und der Tunnel des Gegengleises wurden entsprechend vereinfacht.

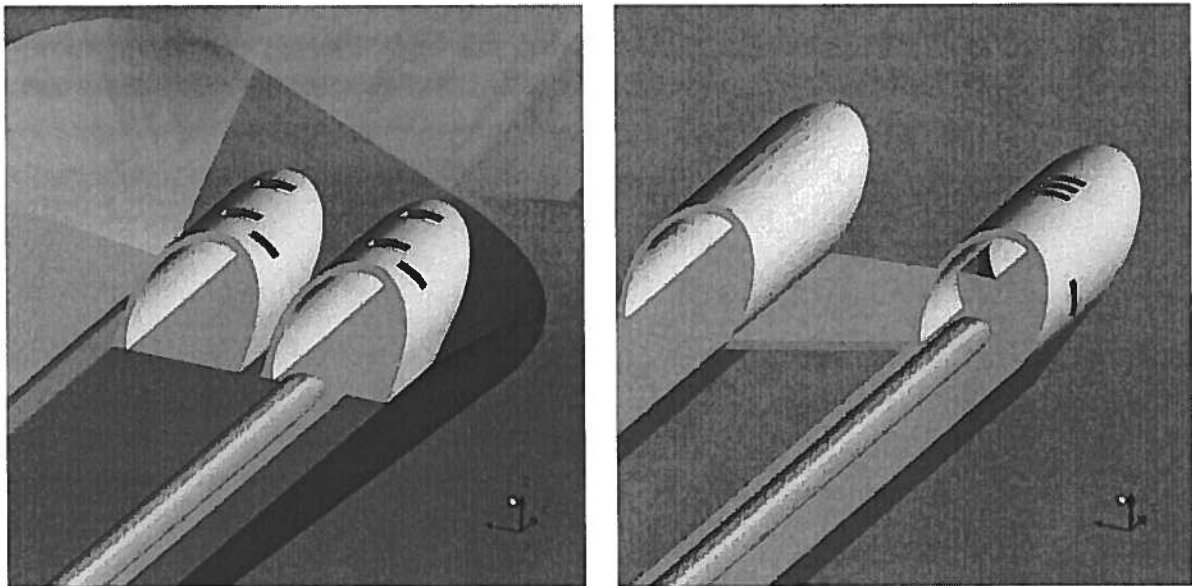


Bild 5: Einfahrscenarien für die CFD Simulation (links: Portal Aichelberg, rechts: Portal Buch)

Der nachfolgende aerodynamische Nachweis erfolgt für die Einfahrt in diese beiden Portalkonfigurationen.

4.2 Generierung der Einfahrdruckwelle

Die Einfahrten in die beiden in 4.1 dargestellten Portale des Boßlertunnels wurden mittels CFD Simulation untersucht. Für den meteorologischen Standardfall ($T_{\text{umgebung}} = 10^{\circ}\text{C}$) sind die berechneten Einfahrdruckwellen in Bild 6 dargestellt. Die Druckwellen für den Winterfall (-15°C) und den Sommerfall (35°C) sind im Anhang (A9 und A10) dargestellt.

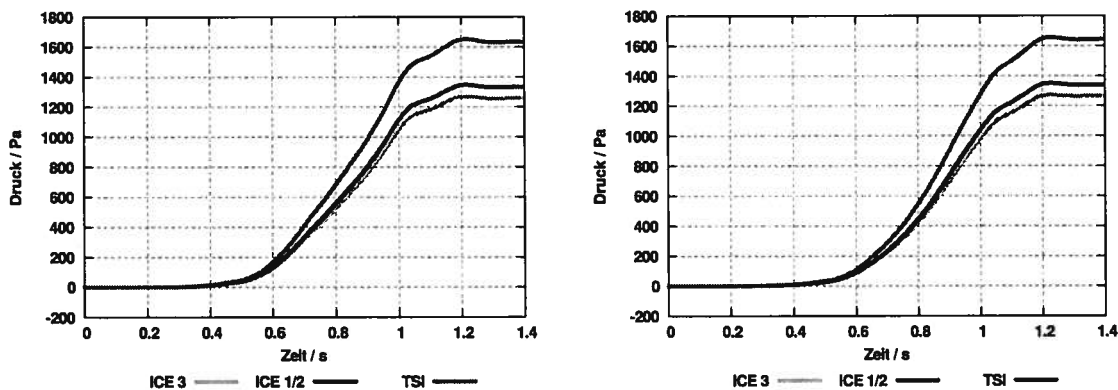


Bild 6: Berechnete Druckwellen bei der Einfahrt verschiedener Fahrzeuge mit 250 km/h in den Boßlertunnel (links: Einfahrt Portal Aichelberg, rechts: Einfahrt Portal Buch)

Ein gleichmäßiger linearer Anstieg bis zum maximalen Druck wäre der Idealfall. In diesem Fall sind die Einfahrdruckgradienten am kleinsten. Mit den in dieser Untersuchung vorgeschlagenen Entlüftungsöffnungen kann sich diesem Ziel hinreichend genähert werden, um die geforderten Richtwerte einhalten zu können. Die maximalen Einfahrdruckgradienten sind für alle Fahrzeuge, alle meteo-

rologischen Randbedingungen und für die Einfahrt auf dem Regelgleis in beide Portale in Tabelle 5 aufgelistet:

Tabelle 5: maximale Einfahrdruckgradienten

| Szenario | Fahrzeug | Einfahrt Portal Aichelberg in Pa/s | Einfahrt Portal Buch in Pa/s |
|-----------------|----------|------------------------------------|------------------------------|
| 10°C (Standard) | ICE 3 | 3046 | 3026 |
| | ICE 1/2 | 3228 | 3207 |
| | TSI | 3959 | 3933 |
| -15°C (Winter) | ICE 3 | 3350 | 3328 |
| | ICE 1/2 | 3551 | 3527 |
| | TSI | 4354 | 4326 |
| 35°C (Sommer) | ICE 3 | 2793 | 2774 |
| | ICE 1/2 | 2960 | 2941 |
| | TSI | 3630 | 3606 |

Die maximalen Einfahrdruckgradienten steigen im Winter analog Gleichung (2) und (3), da die Dichte und die Schallgeschwindigkeit bei tiefen Temperaturen zunehmen. Im Sommer sind die maximalen Gradienten geringer.

4.3 Aufteilung der Einfahrdruckwelle

Die Aufteilung der Einfahrdruckwelle wurde mittels „WAVE“-Simulation berechnet. Konservativ wurde die Wellenausbreitung mit einer Tunnellänge von 8.800 m berechnet. In Bild 7 und Bild 8 sind die Ergebnisse für den Standardfall (10°C) und die Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h dargestellt.

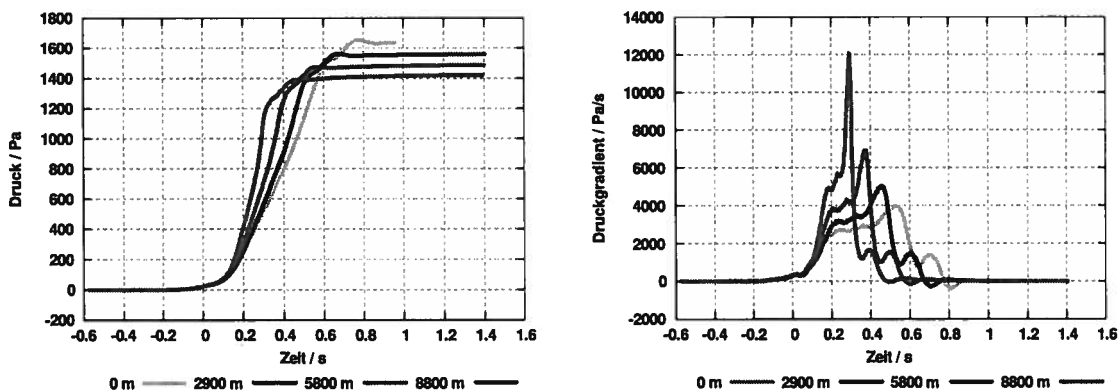


Bild 7: Aufteilung der Druckwelle nach der Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h ins Portal Aichelberg in verschiedenen Sektionen des Tunnels (links: Druck, rechts: Druckgradienten)

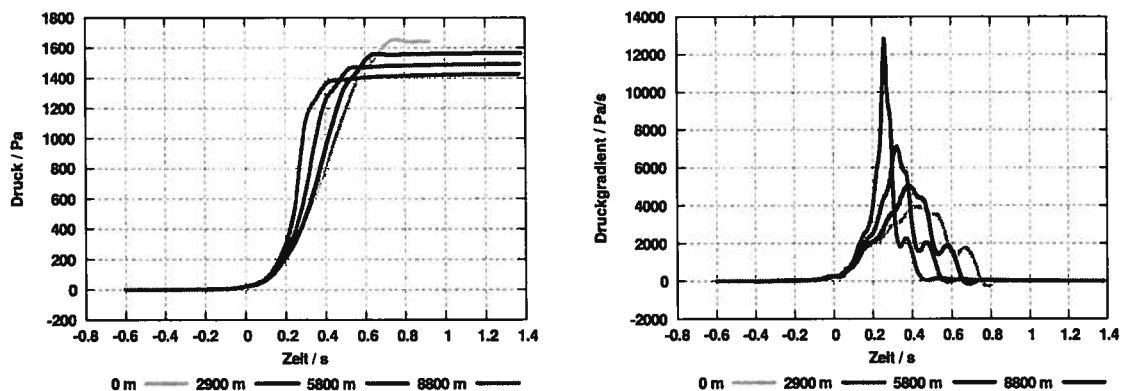


Bild 8: Aufteilung der Druckwelle nach der Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h ins Portal Buch in verschiedenen Sektionen des Tunnels (links: Druck, rechts: Druckgradienten)

Die Berechnung der Aufteilung erfolgte kontinuierlich, wohingegen in den Bildern ausschließlich die Drücke und Gradienten an 4 festen Positionen (am Einfahrportal, am Ausfahrportal und an 2 Positionen im Tunnelinneren) gezeigt werden. Weitere Ergebnisse für andere meteorologische Bedingungen sind im Anhang (A11 bis A14) abgebildet.

4.4 Emission der Mikrodruckwelle

Die an den Portalen abgestrahlte MDW wird in einem Abstand von 25 m von den Portalen berechnet. In Bild 9 sind die Emissionen für den Standardfall (10°C) und die Einfahrt im Regelbetrieb grafisch dargestellt. Die Signalverläufe für andere meteorologische Randbedingungen sind im Anhang (A15 und A16) dokumentiert.

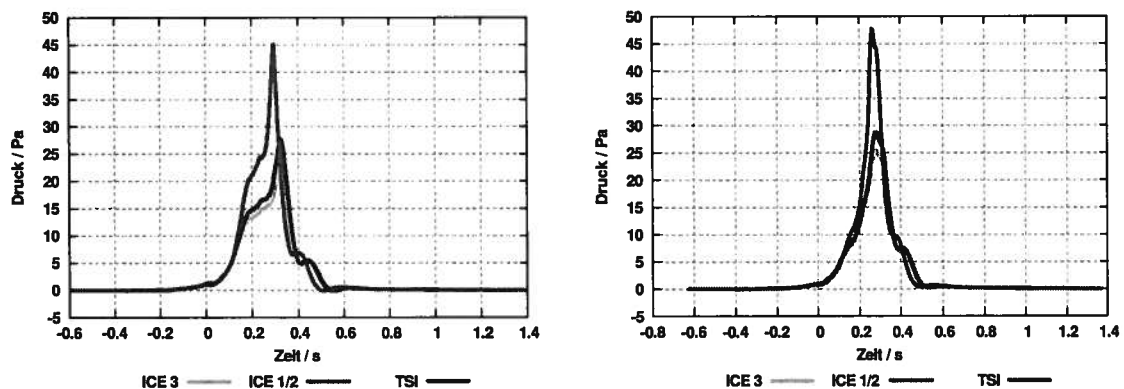


Bild 9: Emittierte Mikrodruckwellen in 25 m Abstand vom Ausfahrportal für die Einfahrt verschiedener Fahrzeuge (Links: Emissionen am Portal Buch, Rechts: Emissionen am Portal Aichelberg)

Diese Zeitverläufe werden für die Berechnung der akustischen Schallpegel und für die akustische Bewertung an TTZ 112 übergeben und an dieser Stelle nicht weiter diskutiert.

Die maximalen Amplituden der MDW werden noch einmal am gegenwärtigen aerodynamischen Richtwert von 20 Pa in 50 m Abstand vom Portal gespiegelt. Dies ist rein informativ und hat keinen Einfluss auf die akustische Bewertung der Emissionen. In Tabelle 6 sind hierzu die maximalen Drücke der MDW in einem Abstand von 50 m vom Portal abgebildet.

Tabelle 6: Emittierte Mikrodruckwellen in 50 m Abstand vom Portal

| Fahrzeug | Einfahrportal | Amplitude in Pa (Emissionsort) | |
|----------|---------------|--------------------------------|------|
| | | | |
| ICE3 | Aichelberg | Buch | 12,3 |
| | Buch | Aichelberg | 12,7 |
| ICE1 | Aichelberg | Buch | 13,9 |
| | Buch | Aichelberg | 14,3 |
| TSI | Aichelberg | Buch | 22,5 |
| | Buch | Aichelberg | 23,8 |

Der aerodynamische Richtwert wird im Regelbetrieb vom TSI Zug geringfügig überschritten. Relevant im Sinne der Nachweisführung sind jedoch die noch durch TTZ 112 auszuweisenden akustischen Richtwerte und nicht der aerodynamische.

5 Zusammenfassung

In dieser Untersuchung wird ein Maßnahmenkonzept für die Portale des Boßlertunnels vorgestellt und die Wirksamkeit dieses Konzepts nachgewiesen. Die vorgestellten Maßnahmen senken die zu erwartenden Mikrodruckwellen-Emissionen unter die aktuell geforderten Richtwerte.

Die in der Planung nur schematisch dargestellten Entlüftungsöffnungen wurden im Laufe dieser Untersuchung optimiert und ein geeignetes Konzept gesucht, welches die Einhaltung der akustischen Richtwerte sicherstellt. Es konnte für jedes Portal eine geeignete Lösung gefunden werden, für die der Nachweis der Wirksamkeit erbracht wird. Für das Portal Buch wurde eine 34 m lange Haube inklusive Entlüftungsöffnungen ausgewiesen, die direkt in die vorliegende Planung übernommen werden kann. Die Haube am Portal Aichelberg muss gegenüber der vorliegenden Planung auf 34 m verlängert und mit Entlüftungsöffnungen versehen werden, um die Einhaltung der akustischen Richtwerte für alle Fahrzeuge sicherzustellen. Eine rein unterirdische Verlängerung der Haube ohne eine Verschiebung des Portalfußpunkts wird vorgeschlagen.

Für einen restriktionsfreien Gleiswechselbetrieb sind die Abmessungen der Portalhauben inklusive der Position und Größe der Entlüftungsöffnungen auf das jeweilige Gegengleis zu übertragen. Ist dies nicht möglich, muss im Falle einer Einfahrt im Bereich des nicht angepassten Einfahrportals die Geschwindigkeit reduziert werden.

Die von den Portalen ausgehenden Emissionen werden als vollständige Druck-Zeit-Verläufe prognostiziert. Alle Untersuchungen basieren auf den im Projekt BEMT erarbeiteten Werkzeugen und Erkenntnissen. Diese ermöglichen eine Vorhersage des vollständigen Zeitverlaufs der Mikrodruckwellen, welche für eine akustische Pegelberechnung und eine abschließende Bewertung der Emissionen notwendig ist.

Ausgehend von der Berechnung des vollständigen Signals der Einfahrdruckwelle per CFD-Simulation wird die Aufteilung der Druckwelle im Tunnelinneren per „WAVE“-Simulation berechnet. Die an den Ausfahrportalen eintreffende Druckwelle wird schließlich umgerechnet in die emit-

tierte Mikrodruckwelle. Das Ergebnis der Berechnungen sind die vollständigen Drucksignale der emittierten MDW in einem Abstand von 25 m vom Ausfahrportal. Diese werden an TTZ 112 in digitaler Form übergeben.

Die abschließende Bewertung der MDW-Immissionen erfolgt in einem dualen Richtwertverfahren, das durch die Anwendung akustischer Richtwerte wirkungsbezogene Anforderungen mit berücksichtigt. Diese akustische Bewertung der Emissionen erfolgt in einem getrennten Untersuchungsbericht durch TTZ 112.

6 Unterschriften

geprüft:

gez. Tielkes

Dr. Thorsten Tielkes
Leiter TTZ 113

erstellt:

gez. Hieke

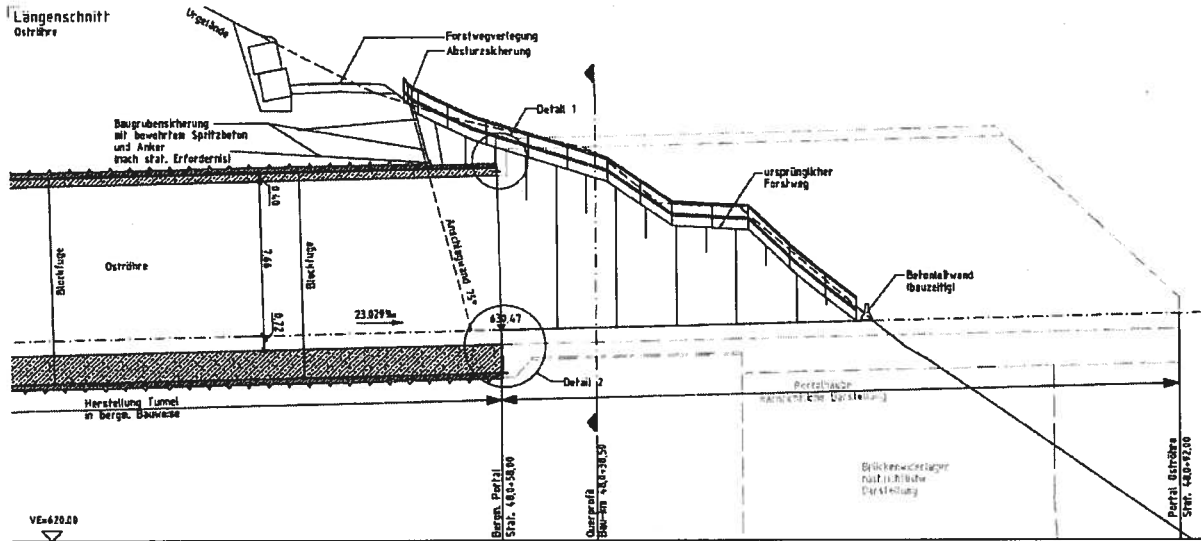
Dipl.-Ing. Michael Hieke
TTZ 113 Hie

freigegeben:

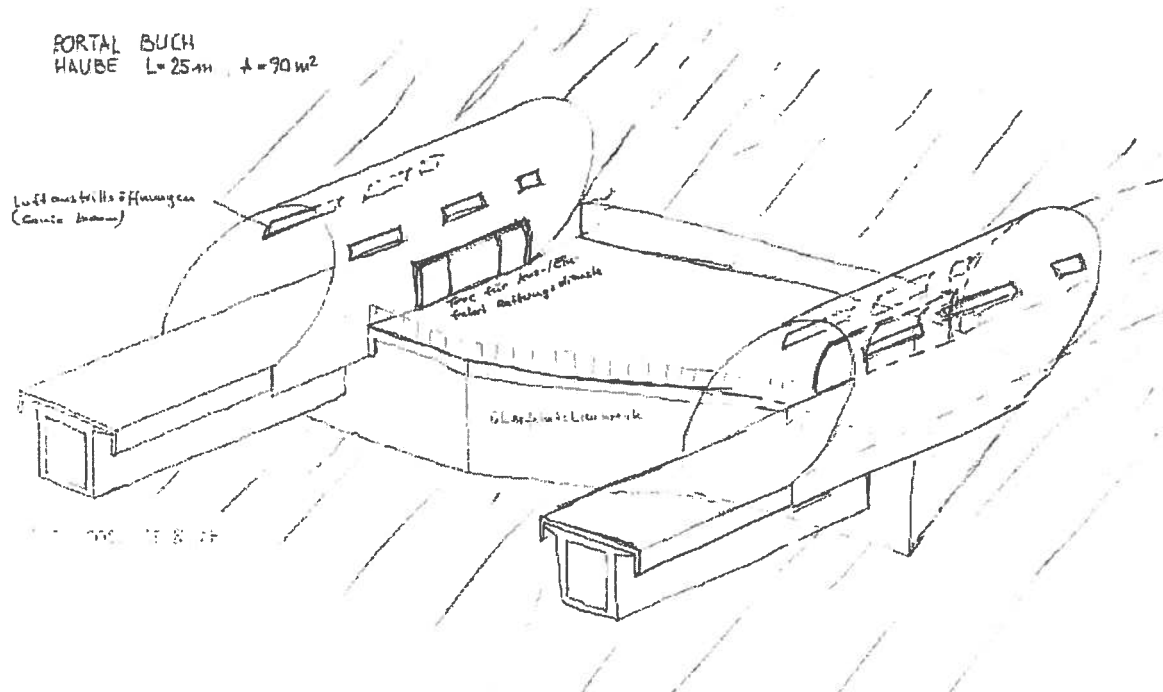
gez. Frevert

Prüfstelle

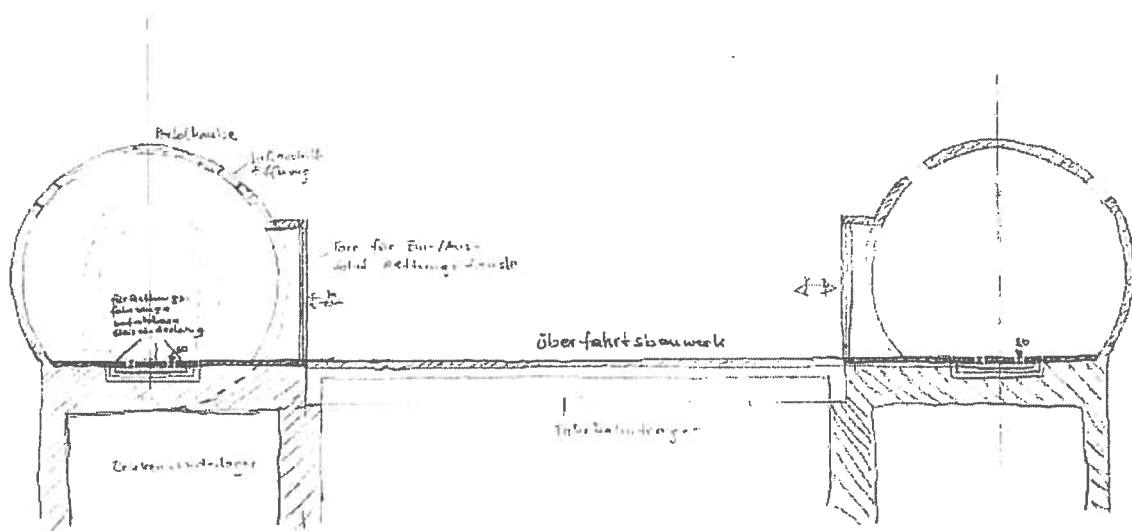
Anlage A6: Portal Buch Längsschnitt
 Quelle - „Anlage 8.3.7 Blatt 5 von 6 vom 13.03.2009“



Anlage A7: Portal Buch Überfahrtsbauwerk 01
Quelle - „Entwurfsskizzen Haubenwerke Filstalbrücke - DB Projektbau vom 20.03.2009“

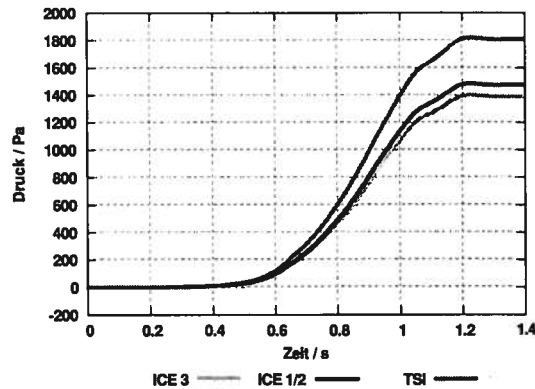
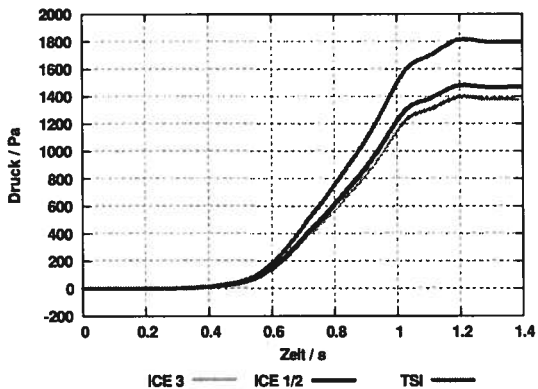


Anlage A8: Portal Buch Überfahrtsbauwerk 02
Quelle - „Entwurfsskizzen Haubenwerke Filstalbrücke - DB Projektbau vom 20.03.2009“



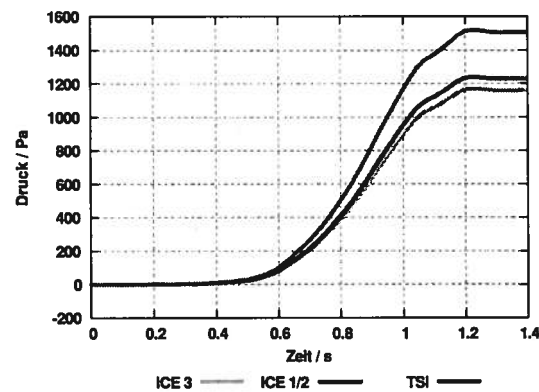
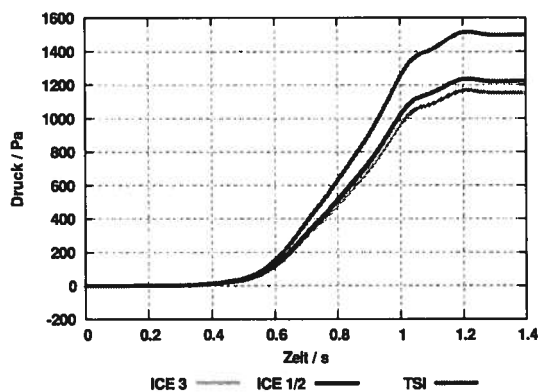
Anlage A9: Einfahrdruckwellen bei -15°C

links: Einfahrt Aichelberg mit 250 km/h, rechts: Einfahrt Buch mit 250 km/h

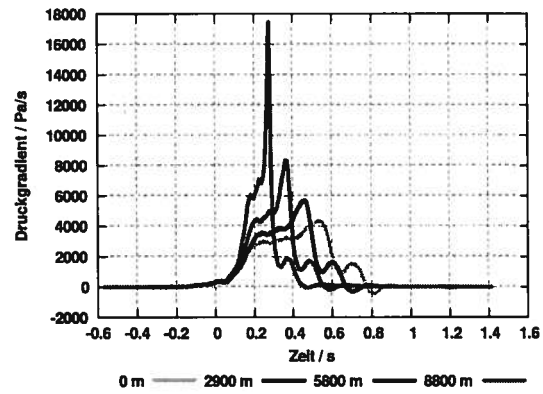
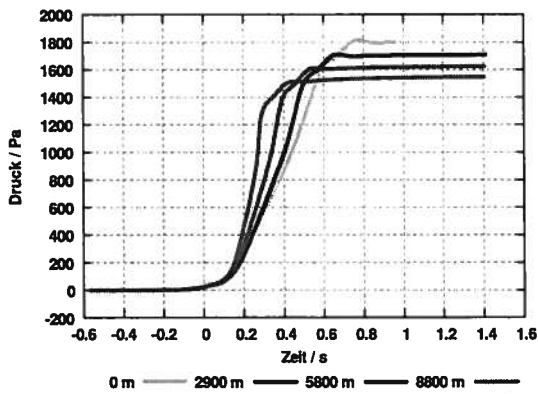


Anlage A10: Einfahrdruckwellen bei 35°C

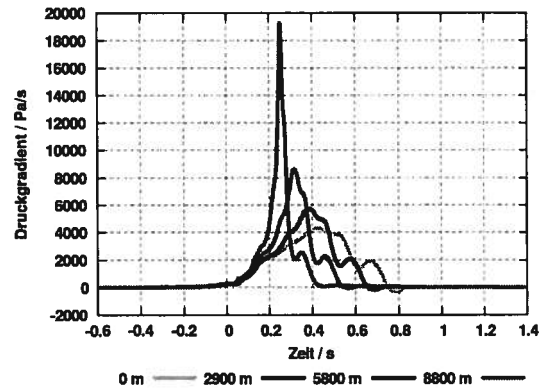
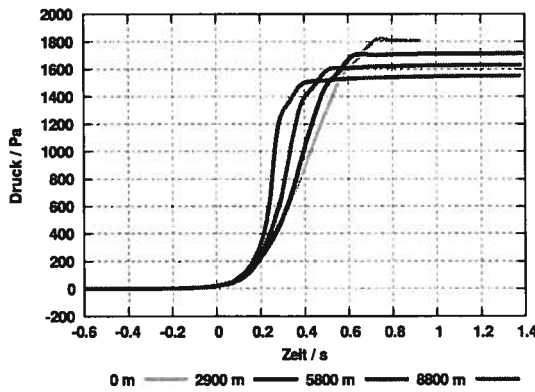
links: Einfahrt Aichelberg mit 250 km/h, rechts: Einfahrt Buch mit 250 km/h



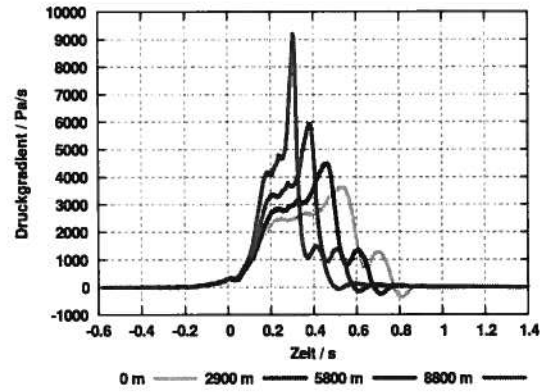
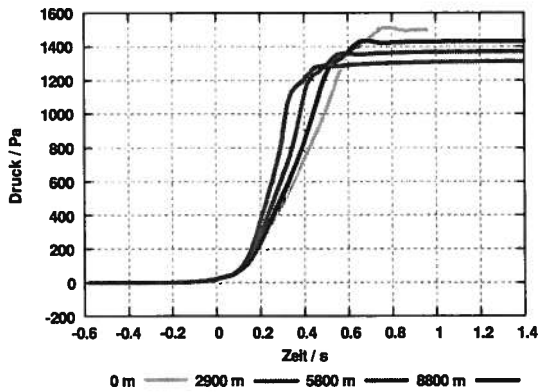
Anlage A11: Aufsteilung bei -15°C – Einfahrt ins Portal Aichelberg
 Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Druck, Rechts: Druckgradienten



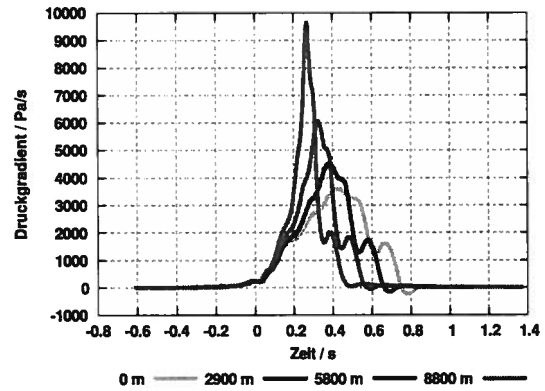
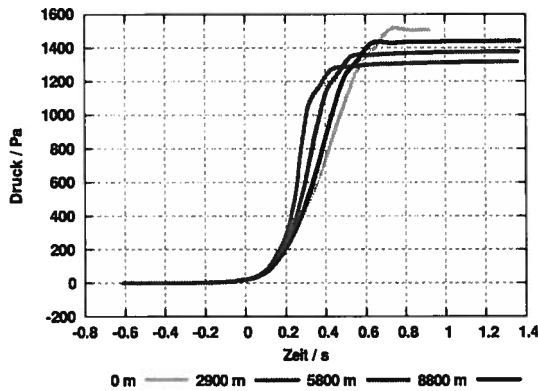
Anlage A12: Aufsteilung bei -15°C – Einfahrt ins Portal Buch
 Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Druck, Rechts: Druckgradienten



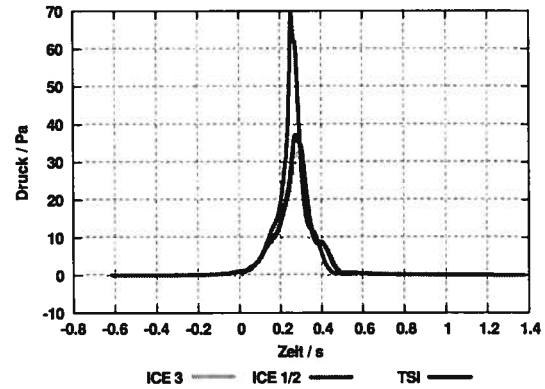
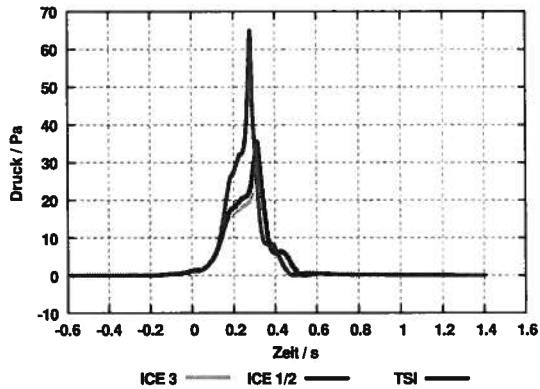
Anlage A13: Aufsteilung bei 35°C - Einfahrt ins Portal Aichelberg
 Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Druck, Rechts: Druckgradienten



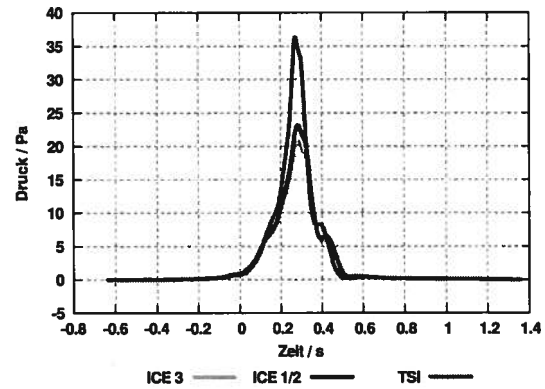
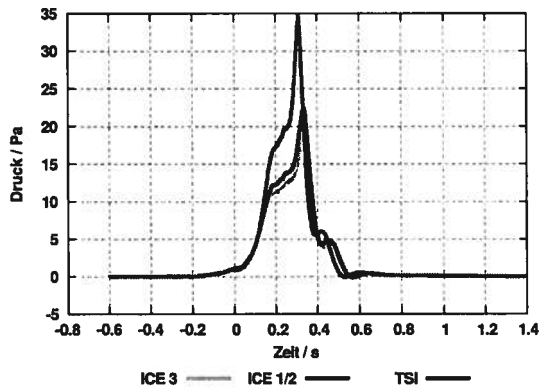
Anlage A14: Aufsteilung bei 35°C - Einfahrt ins Portal Buch
 Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Druck, Rechts: Druckgradienten



Anlage A15: MDW Emissionen bei -15°C in 25 m Abstand vom Ausfahrportal
 Einfahrt erfolgt mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Emissionen am Portal Buch, Rechts: Emissionen am Portal Aichelberg



Anlage A16: MDW Emissionen bei 35°C in 25 m Abstand vom Ausfahrportal
 Einfahrt erfolgt mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Emissionen am Portal Buch, Rechts: Emissionen am Portal Aichelberg



Die Prüfstelle ist „Assoziierter Partner
von EISENBAHN-CERT“ und vom
Eisenbahn-Bundesamt anerkannt.

Prüfstelle
Pionierstraße 10
D - 32423 Minden

Untersuchungsbericht

Aerodynamische Detailuntersuchung der Maßnahmen zur Beherrschung der Mikrodruckwellen-Thematik am Steinbühlentunnel

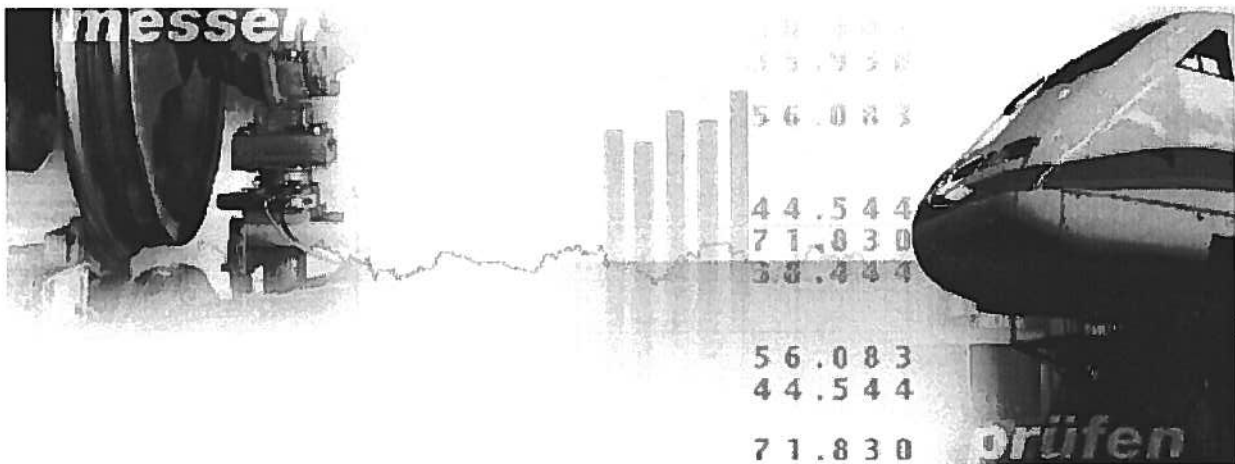


Foto: Contact TIEM

Dokument: 09-P-10633-TTZ 113-MDWNachweisAero-Steinbühl
Datum: 19.10.2009

Fachabteilung: Verbund und Fahrbahntechnik
Aerodynamik und Klimatechnik
Völckerstraße 5
80939 München

Zertifizierter Bereich:
Technik/Beschaffung



Anwendung eines durch die DQS GmbH
Deutsche Gesellschaft zur Zertifizierung von Managementsystemen
zertifizierten Qualitätsmanagementsystems

Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Untersuchungsbericht beschriebenen Untersuchungsgegenstände. Dieser Untersuchungsbericht darf nicht ohne schriftliche Genehmigung des Auftraggebers veröffentlicht werden. Eine auszugsweise Vervielfältigung bedarf zusätzlich der Zustimmung der Fachabteilung.

| Inhaltsverzeichnis | | Seite |
|---------------------------|---|--------------|
| 1 | Angaben zum Auftrag | 7 |
| 2 | Beschreibung des Untersuchungssachverhalts | 8 |
| 2.1 | Bisheriges Auftreten von Mikrodruckwellen-Phänomenen | 8 |
| 2.2 | Ziel und Einordnung dieser Untersuchungen | 9 |
| 3 | Aerodynamische Untersuchung | 10 |
| 3.1 | Eingangsgrößen Tunnelgeometrie | 10 |
| 3.2 | Eingangsgrößen Betrieb | 10 |
| 3.3 | Modellansätze für die verschiedenen MDW-Teilmechanismen | 11 |
| 3.3.1 | Generierung der Einfahrdruckwelle | 11 |
| 3.3.2 | Aufteilung der Einfahrdruckwelle | 13 |
| 3.3.3 | Emission der Mikrodruckwelle | 14 |
| 3.4 | Vorgehen bei der Untersuchung | 15 |
| 4 | Ergebnisse | 15 |
| 4.1 | Maßnahmenkonzept | 15 |
| 4.2 | Generierung der Einfahrdruckwelle | 17 |
| 4.3 | Aufteilung der Einfahrdruckwelle | 18 |
| 4.4 | Emission der Mikrodruckwelle | 19 |
| 5 | Zusammenfassung | 20 |
| 6 | Unterschriften | 21 |

Verzeichnis der Anlagen

| | | Seite |
|-----|---|-------|
| A1 | Westportal Lageplan | 22 |
| A2 | Westportal Portalansicht | 22 |
| A3 | Westportal Längsschnitt | 23 |
| A4 | Ostportal Lageplan | 24 |
| A5 | Ostportal Portalansicht | 24 |
| A6 | Ostportal Längsschnitt | 25 |
| A7 | Westportal Überfahrtsbauwerk 01 | 26 |
| A8 | Westportal Überfahrtsbauwerk 02 | 26 |
| A9 | Einfahrdruckwellen bei -15°C | 27 |
| A10 | Einfahrdruckwellen bei 35°C | 27 |
| A11 | Aufsteilung bei -15°C - Einfahrt ins Westportal | 28 |
| A12 | Aufsteilung bei -15°C - Einfahrt ins Ostportal | 28 |
| A13 | Aufsteilung bei 35°C - Einfahrt ins Westportal | 29 |
| A14 | Aufsteilung bei 35°C - Einfahrt ins Ostportal | 29 |
| A15 | MDW Emissionen bei -15°C | 30 |
| A16 | MDW Emissionen bei 35°C | 30 |

Verzeichnis der Abkürzungen

| Größe | Symbol | Einheit | Wert / Bemerkungen |
|---|---------------|-------------|--|
| Querschnittsfläche | A | m^2 | |
| Schallgeschwindigkeit | c | m/s | Normalluftschallgeschwindigkeit: $c_0 = 343,5 \text{ m/s}$ |
| Hydraulischer Durchmesser | d_h | m | $= 4 \cdot \text{Querschnitt} / \text{Umfang}$ |
| Druckgradient | dp/dt | Pa/s | |
| Druck | p | Pa | |
| Portalabstand des Messorts in Gleisrichtung | r | m | |
| Zeit | t | s | |
| Temperatur | T | K | |
| Geschwindigkeit | v | km/h | |
| Temperatur | ζ | $^{\circ}C$ | Atmosphärische Normallufttemperatur: $\zeta_0 = 20 \text{ }^{\circ}C$ |
| Verblockung | Φ | - | $= 1 - (A_{zug}/A_{tun})$ |
| Kopf- und Portalformfaktor | η | - | wird empirisch bestimmt |
| Korrekturfaktor für die Abstrahlung | γ_{em} | - | |
| Raumwinkel für die Abstrahlung (Emission) | Ω | rad | |
| Dichte | ρ | kg/m^3 | Atmosphärische Normalluftdichte: $\rho_0 = 1,204 \text{ kg/m}^3$ |
| Integrationsvariable für Gedächtnisintegral | τ | s | |

| Indizes | |
|-------------------------------------|-----------------|
| am Einfahrportal bzw. Normalzustand | l_0 |
| bezogen auf Position 1, 2 bzw. 3 | l_1, l_2, l_3 |
| bezogen auf den Tunnel | l_{tun} |
| bezogen auf das Fahrzeug | l_{zug} |

Quellenverzeichnis/Literaturverzeichnis

- [Ad08] **Adami S., Kaltenbach H.-J.:** *Sensitivity of the wave-steepening in railway tunnels with respect to the friction model.* Proceedings of the 6th International Colloquium on: Bluff Body Aerodynamics and Applications, Milano, Italy, 2008.
- [Be02] **Bellenoue M., Kageyama T.:** *Train/tunnel geometry effects on the compression wave generated by a high speed train.* TRANSAERO, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol. 79, pp. 276-288, Springer, 2002.
- [BRD90a] **BlmSchG:** *Bundes-Immissionsschutzgesetz – Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge.* Fassung vom 14. Mai 1990.
- [BRD90b] **16. BlmschV:** *Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BlmSchV).* Fassung vom 12. Juni 1990.
- [CEN06] **EN 14067-5:2006:** *Railway Applications – Aerodynamics – Part 5: Requirements and Test Procedures for aerodynamics in tunnels.* Europäische Norm, CEN, Brüssel, 2006.
- [DB06a] **Deutsche Bahn AG:** *Beurteilung von Mikrodruckwellen-Ereignissen im Bereich der Tunnel Euerwang und Irlahüll der Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt.* DB Systemtechnik, Sachverständigenorganisation (SVO). Nicht-öffentliches Gutachten des Gutachters Dr. Degen, Minden, Mai 2006.
- [DB06b] **DB Netz AG:** *NBS Nürnberg-Ingolstadt – Besprechung „Mikrodruckwelle“ vom 24.05.06: Erklärung zur Inbetriebnahmegenehmigung (Selbstverpflichtungserklärung).* Nicht-öffentliches Schreiben an den Präsidenten des Eisenbahn-Bundesamtes vom 26.05.06.
- [DB06c] **Deutsche Bahn AG:** *Projektstudie Beherrschung der Mikrodruckwellen-Thematik (PS BEMT).* Nicht-öffentlicher Bericht 06-P-4663-TZF13, DB Systemtechnik, TZF 13 Aerodynamik und Klimatechnik, München, Oktober 2006.
- [Hie09] **Hieke M., Kaltenbach H.-J., Tielkes T.:** *Prediction of micro-pressure wave emissions from high-speed railway tunnels.* Proceedings of the 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, New Brunswick, USA, 2009, BHR Group, pp. 487-501.
- [EG02] **TSI HS RST 2002:** *Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems (TSI Rolling Stock).* Veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 245/402 vom 12.9.2002.
- [EG03] **Richtlinie 2003/10EG:** *Richtlinie 2003/10/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Februar 2003 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Lärm).*
- [EG08] **Revision TSI HS RST:** *Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems (TSI Rolling Stock).* Veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L84/132 vom 26.03.2008. In Kraft ab 01.09.2008.
- [Ho00] **Howe M.S., Iida M., Fukuda T.:** *Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal.* Journal of Fluid Mechanics, Vol. 425 (2000), pp. 111-132.
- [Ho04] **Howe M.S.:** *On the design of a tunnel-entrance hood with multiple windows.* Journal of Sound and Vibration, Vol. 273 (2004), pp. 233-248.
- [Hr03] **Herb J., Deeg P., Tielkes Th.:** *Assessment of possible sonic boom effects in German high-speed railway tunnels – experimental and numerical data for the wave steepening*

- process*. Proceedings of the 11th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Luzern, Switzerland, 2003, BHR Group, pp. 775-782.
- [Nk06] **N’Kaoua J. et al.:** *A parametric study into the factors affecting the development and alleviation of micro-pressure waves in railway tunnels*. Proceedings of the 12th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Portoroz, Slovenia, 2006, BHR Group, pp. 789-803.
- [Oz91] **Ozawa S. et al.:** *Countermeasures to reduce micro-pressure waves radiating from exits of Shinkansen tunnels*. Proceedings of the 7th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Brighton, UK, 1991, BHR Group, pp. 253-266.
- [Oz97] **Ozawa S., Murata K., Maeda T.:** *Effect of ballasted track on distortion of pressure wave in tunnel and emission of micro-pressure wave*. Proceedings of the 9th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, 1997, BHR Group, pp. 935-947.
- [Ril853] **DB Netz AG:** *Richtlinie 853 (Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten)*, DB Netz AG, Frankfurt a. M., Januar 2007
- [RTRI96] **Railway Technical Research Institute:** *Definition of the tunnel geometry for the avoidance of sonic boom*. Untersuchungsbericht zu Auftragsmessungen für die Deutsche Bahn AG, Forschungs- und Technologiezentrum, ZBT 52 Aerodynamik, August 1996.
- [Sch08] **Schlämmer M., Hieke M.:** *CFD-simulations on the generation of the pressure wave when a high-speed train enters a tunnel with different portal modifications*. Proceedings of the 6th International Colloquium on: Bluff Body Aerodynamics and Applications, Milano, Italy, 2008.
- [SW02] **Schulte-Werning B. et al. (eds.):** *TRANSAERO – A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Operation*. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol. 79, Springer, 2002.
- [So96] **Socket H., Ehrendörfer K.:** *Verformung einer Druckwelle in einem Eisenbahntunnel infolge eines Schotterbetts und seitlicher Kammern*, Untersuchungsbericht im Auftrag der DB AG, März 1996.
- [Ti06] **Tielkes Th.:** *Aerodynamic Aspects of Maglev Systems*. In R. Schach, M. Witt (Eds.): *Maglev’ 2006 Germany – Proceedings of the 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. Dresden 2006, Vol. II, ISBN 3-86005.535-6, pp. 641-649.
- [Ti08] **Tielkes Th., Kaltenbach H.-J., Hieke M., Deeg P., Eisenlauer M.:** *Measures to Counteract Micro-pressure Waves Radiating from Tunnel Exits of DB’s New Nuremberg-Ingolstadt High-speed Line*. In: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol. 99, pp. 40-47, Springer, 2008.

1 Angaben zum Auftrag

Aufgabenstellung:

Es sollen die von den Portalen des Steinbühltunnels emittierten Mikrodruckwellen als vollständige Drucksignale bestimmt werden. Diese Signale dienen als Ausgangsbasis für die nachfolgende akustische Bewertung, welche den Nachweis erbringen soll, dass die Mikrodruckwellenemissionen am Steinbühltunnel die aktuellen Richtwerte einhalten. Die Beauftragung erfolgte per Leistungsvereinbarung 09-P-10633-VTZ113-MDW-Nachweis-UlmWendlingen-v3 vom 10.06.2009.

Auftraggeber:

DB Projektbau GmbH
I.BV-SW-G(2)
Räpplenstraße 17
70191 Stuttgart

Fachabteilung:

Deutsche Bahn AG
Vorstandsressort Technik, Systemverbund und Dienstleistungen
DB Systemtechnik
TTZ 113 Aerodynamik und Klimatechnik
Völckerstraße 5
80939 München

Umfang des Berichtes und der Anlagen:

30 Seiten (davon 9 Seiten Anlagen)

Verteiler des Untersuchungsberichtes:

5 x Auftraggeber
2 x TTZ 113

2 Beschreibung des Untersuchungssachverhalts

2.1 Bisheriges Auftreten von Mikrodruckwellen-Phänomenen

Im Rahmen von Versuchsfahrten auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt trat im Dezember 05 unter betrieblichen Bedingungen erstmals in Deutschland ein deutlich akustisch wahrnehmbares Mikrodruckwellen-Phänomen auf. Hierbei handelt es sich um die von einem Tunnelportal ausgehende Emission einer hörbaren Mikrodruckwelle. Das Phänomen wird umgangssprachlich auch als *Tunnelknall* oder in der englischen Sprache als *Sonic Boom* bezeichnet (Letztere Bezeichnung ist dabei eher unglücklich, da sie eine Verwechslung mit dem Überschallknall von Flugzeugen nahelegt).

Die Mechanismen, die zu einer Entstehung einer hörbaren Mikrodruckwelle (MDW) führen können, sind in der Literatur (z.B. [Oz91, NK06, SW02]) ausführlich beschrieben. Im Wesentlichen wird die Entstehung hörbarer MDW durch hohe Zugeinfahrtsgeschwindigkeiten in den Tunnel, enge Tunnelquerschnitte, große Tunnellängen sowie die Abwesenheit – sprich Feste Fahrbahn – von dem Mechanismus entgegenwirkender nennenswerter Reibung und Dispersion (wie sie in Tunnel mit Schotteroberbau vorliegt) bedingt.

Vor diesem Hintergrund ist es erklärbar, dass in den bisherigen zweigleisigen, 92 qm großen und mit einer Festen Fahrbahn versehenen SFS-Tunneln der NBS Köln-Rhein/Main keine MDW-Erscheinungen auftreten; der längste Tunnel der NBS Köln-Rhein/Main – der Schulwaldtunnel – ist mit 4500 m Länge „zu kurz“, als dass sich ein MDW-Phänomen ausbilden kann. Die bestehenden, langen SFS-Tunnel (z.B. Landrückentunnel mit mehr als 10 km Länge) auf den SFS Hannover-Würzburg und SFS Mannheim-Stuttgart sind in Schotteroberbau ausgeführt, so dass auch hier keine MDW-Erscheinungen auftreten.

Unter betrieblichen Bedingungen sind Mikrodruckwellen-Erscheinungen bisher nur aus Japan bekannt. Hier trat das Mikrodruckwellen-Phänomen erstmals 1975 mit dem Ausbau der Sanyo Shinkansen Strecke auf und ist seither ein Standardaspekt der Tunnelaerodynamik japanischer Shinkansen-Linien. In Europa sind bisher unter betrieblichen Bedingungen keine Mikrodruckwellen-Phänomene aufgetreten; Mikrodruckwellen-Erscheinungen konnten nur in speziellen Versuchen „künstlich“ (Erhöhung des Versperrungsmaßes durch Paralleleinfahrt zweier Züge) hervorgerufen werden [SW02, Hr03].

Bei den Versuchsfahrten auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt traten hingegen im Dezember 2005 erhebliche MDW-Emissionen an den Portalen der 7300 m bzw. 7700 m langen Tunnel Irlahüll und Euerwang auf [Ti06]. Diese Tunnel sind zweigleisig mit einem 92 qm-Regelquerschnitt und besitzen eine Feste Fahrbahn. Zur Minderung der MDW-Problematik dieser beiden Tunnel wurde für beide Tunnel eine Ausrüstung mit Gleisabsorbern – die ähnlich einem Schotteroberbau dem MDW-Entstehungsmechanismus durch Reibung und Dispersion entgegen wirken – beschlossen¹. Das Maßnahmenpaket wurde im März und April 2006 erfolgreich umgesetzt und hat zu einer deut-

¹ Die NBS Nürnberg-Ingolstadt war ursprünglich mit Schotteroberbau planfestgestellt. Nach dem Entschluss eine Feste Fahrbahn zu verbauen, fand eine Neubewertung der MDW-Thematik nicht statt. Die im Frühjahr ergriffene Maßnahme der Absorberrüstung der Tunnel ist dem damals gegebenen, noch verbleibenden Terminrahmen bis zur IBN geschuldet. Für künftige Bauvorhaben, in denen MDW-Gegenmaßnahmen zu einem früheren Zeitpunkt eingebracht werden können, werden andere, wirtschaftlichere Gegenmaßnahmen möglich sein.

lichen Minderung der MDW-Emissionen geführt. Am 28.05.06 konnte dann planmäßig der kommerzielle Betrieb auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt aufgenommen werden.

2.2 Ziel und Einordnung dieser Untersuchungen

Vor dem Hintergrund der MDW-Vorkommnisse auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt und der dort gewonnenen Erkenntnisse ist es Aufgabe dieser Untersuchung, die von den Tunnelportalen des Steinbühltunnels ausgehenden MDW-Emissionen zu prognostizieren. An den zu untersuchenden Portalen sind bereits Gegenmaßnahmen, sogenannte Portalhauben, in den Planfeststellungsunterlagen ausgewiesen. Eine Neubewertung dieser Maßnahmen nach aktuellem Erkenntnisstand [Hie09] ist jedoch noch nicht durchgeführt worden und soll an dieser Stelle erfolgen. Zudem werden die bisher nur schematisch skizzierten Entlüftungsöffnungen in den Hauben detailliert bezüglich Position und Größe spezifiziert. Die Bewertung der Wirksamkeit der Hauben erfolgt in dieser Untersuchung nach neuesten Erkenntnissen, die innerhalb des bauvorhaben-übergreifenden Projekts BEMT (Beherrschung Mikrodruckwellen-Thematik, [DB06c]), erarbeitet wurden. Die Entwicklung geeigneter Werkzeuge zur Prognose der emittierten MDW innerhalb des Projekts BEMT ist abgeschlossen, gegenwärtig läuft die Abstimmung mit dem EBA über die einzuhaltenden Richtwerte und die entsprechenden Nachweisverfahren.

Die vorliegende Untersuchung stützt sich dabei auf folgende Grundlagen:

- die Auswertung und Interpretation der in 1:1-Versuchen auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt gewonnenen eigenen Messdaten;
- die Erfahrungen mit der Nachweisführung und Bewertungskriterien-Festsetzung zur Mikrodruckwellen-Thematik an der NBS Nürnberg-Ingolstadt und am Katzenbergtunnel (ABS Karlsruhe-Basele);
- die Auswertung und Interpretation der in 1:1-Versuchen, in denen hörbare Mikrodruckwellen „künstlich“ generiert wurden, gewonnenen eigenen Messdaten;
- die Auswertung und Interpretation der in verschiedenen, beim RTRI (Japan) und bei AEA-T Rail bzw. DeltaRail (Großbritannien) im Auftrag der DB Systemtechnik, TZF 13 Aerodynamik und Klimatechnik durchgeführten, Modellversuchen gewonnenen Messdaten;
- die Auswertung und Interpretation von Simulationsrechnungen;
- veröffentlichte (japanische) Messdaten, Modellierungsansätze und Maßnahmenempfehlungen;
- unseren Erfahrungsaustausch mit dem japanischen Railway Technology Research Institute (RTRI);
- die Modellierungsvorschriften und Werkzeuge, die auf Basis dieser Erfahrungen aufgestellt und an die Bedingungen der zu untersuchenden Tunnel angepasst wurden.

Weitestgehend repräsentieren diese Grundlagen das in Deutschland, Europa und Japan vorhandene Fachwissen zur Mikrodruckwellen-Thematik.

Das Ziel dieser rein aerodynamischen Untersuchung ist ausschließlich die Bestimmung des Zeitverlaufs der MDW-Emissionen im Bereich der Portale des Steinbühltunnels. Eine akustische Bewertung bzw. eine Einordnung der Emissionen bezüglich der aktuell diskutierten Richtwerte erfolgt in einer getrennten Untersuchung durch TTZ 112 „Akustik und Erschütterungen“. Die in dieser Untersuchung ermittelten Zeitverläufe werden an TTZ 112 übergeben, um aus den Signalen die geforderten Schallpegel abzuleiten und akustisch zu bewerten.

3 Aerodynamische Untersuchung

3.1 Eingangsgrößen Tunnelgeometrie

Der Steinbühl tunnel besitzt zwei eingleisige Tunnelröhren die über Verbindungsbauwerke in einem regelmäßigen Abstand miteinander verbunden sind. Aus Gründen der Sicherheit sind die Verbindungsbauwerke mit Schleusentüren verschlossen, ein Überströmen von Luft aus einer Tunnelröhre in die andere ist somit nicht möglich. Die nördliche Tunnelröhre ist 4.825 m, die südliche Röhre ist 4.813 m lang. Am Westportal (Portal Todsburg) sind zwei Portalhauben (nördliche Röhre 27 m lang, südliche Röhre 34 m lang) geplant, am Ostportal (Portal Hohenstadt) sind zwei 19,5 m lange Portalhauben in den Planungen ausgewiesen. Alle Hauben haben einen lichten Querschnitt von 90 m² und sind teilweise im Gelände integriert, korrespondieren aber über Entlüftungsöffnungen mit der freien Umgebung. Diese Öffnungen sind gegenwärtig nur grob skizziert und werden im Rahmen dieser Untersuchung im Hinblick auf Position und Größe genauer spezifiziert. Die Ausfahrt aus dem Ostportal erfolgt in einen Geländeeinschnitt in Troglage, im Bereich des Westportals mündet der Tunnel direkt auf die Filstalbrücke.

Detaillierte Ausschnitte aus den Planungsunterlagen befinden sich im Anhang (A1 bis A8). Der lichte Querschnitt der Tunnelröhren beträgt 60,5 m². Als Oberbau kommt eine Feste Fahrbahn zum Einsatz. Die Wände und Decken sind mit hydraulisch glatten Betonelementen verkleidet. Alle Berechnungen in dieser Untersuchung erfolgen in geraden Tunnelröhren konstanten Querschnitts (siehe Bild 1).

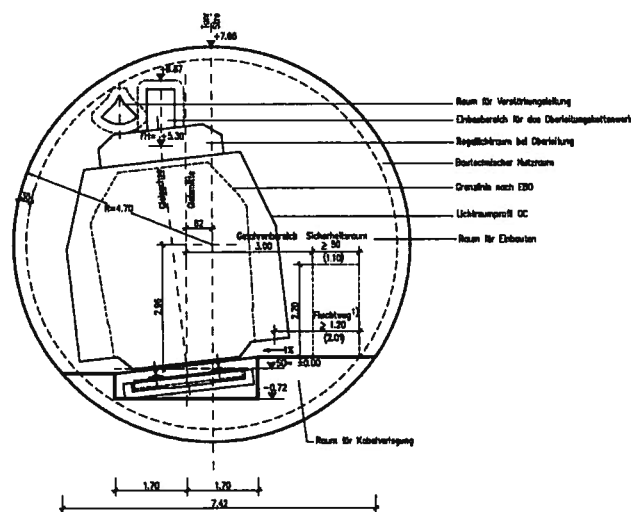


Bild 1: Regelquerschnitt der Tunnel (Zeichnung entnommen aus [Ril853])

3.2 Eingangsgrößen Betrieb

Die NBS Ulm-Wendlingen wird für eine Betriebsgeschwindigkeit von 250 km/h gebaut. In beiden Röhren des Steinbühl tunnels ist restriktionsfreier Gleiswechselbetrieb vorgesehen. Die vorliegende Untersuchung bezieht sich damit auf 250 km/h schnellen Betrieb.

Die NBS soll die Technischen Spezifikationen für Interoperabilität erfüllen. Vor diesem Hintergrund sind die Untersuchungen nicht ausschließlich auf ICE-Züge, sondern auch auf aerodynamisch ungünstigere, aber noch zur TSI HS RST [EG02, EG08] konforme Züge zu beziehen. Die vorliegen-

de Untersuchung bezieht sich damit auf ICE3-Züge, ICE1-Züge (Kopfform identisch mit der von ICE2-Zügen) sowie auf einen aerodynamisch ungünstigen „TSI-Zug“.

3.3 Modellansätze für die verschiedenen MDW-Teilmechanismen

Die Erzeugung von Mikrodruckwellen lässt sich anhand der folgenden Darstellung gut beschreiben:

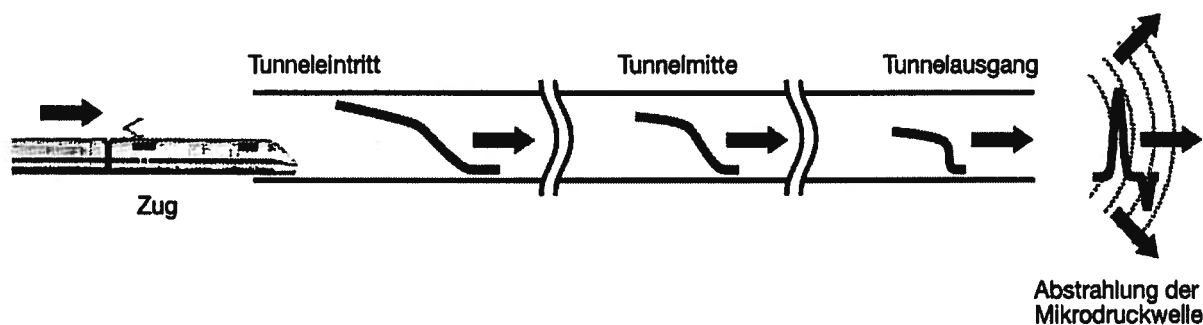


Bild 2: Prinzipskizze der verschiedenen Teilmechanismen des Mikrodruckwellen-Phänomens

Bei der Einfahrt des Zugkopfes in den Tunnel entsteht durch die plötzliche Querschnittsänderung die Einfahrdruckwelle, die dem Zug mit Schallgeschwindigkeit voraus läuft. Wenn die Reibungsverluste an Leibung und Einbauten klein sind und keine größeren „trägen“ Luftvolumina in im Tunnel verlegten porösen Materialien (Schotter) oder in Kammern und Spalten enthalten sind, steilt sich diese sogenannte Einfahrdruckwelle während ihrer Laufzeit durch den Tunnel stetig auf. Im hinteren Teil der Welle ist der Druck dann höher als im Vorderen. Damit einher geht eine etwas höhere Temperatur und daraus resultierend eine etwas höhere Schallgeschwindigkeit im hinteren Bereich der Welle. Damit bewegt sich dieser Teil schneller als der Vordere und der Druckgradient wird immer größer. Insbesondere in sehr langen Tunneln kann der Druckgradient so stark ansteigen, dass am Tunnelausgang eine hörbare Mikrodruckwelle emittiert wird, die je nach Stärke als ein dumpfer „Plopp“ oder als ein lauter Knall empfunden wird.

Die Entstehung des Tunnelknalls lässt sich vereinfacht durch drei Einzelprozesse beschreiben:

- Erzeugung der Einfahrdruckwelle bei der Einfahrt des Zuges in den Tunnel,
- Aufsteilung der Druckwelle auf ihrem Weg durch den Tunnel,
- Emission einer Mikrodruckwelle am gegenüberliegenden Tunnelausgang.

Für jeden dieser Teilprozesse werden nachfolgend die Modellansätze dargestellt, auf denen diese Untersuchung basiert. Die in vorangegangenen MDW-Untersuchungen anderer Bauprojekte verwendeten empirischen Ansätze sind inzwischen im Projekt BEMT weiterentwickelt worden und ermöglichen die Bestimmung der emittierten MDW mit dem vollständigen Druckverlauf und nicht mehr nur der maximalen Gradienten und Amplituden.

3.3.1 Generierung der Einfahrdruckwelle

Für die Berechnung des Verlaufs der Einfahrdruckwelle in dieser Untersuchung wird die Einfahrt des Zuges per Strömungssimulation [Sch08] berechnet. Zum Einsatz kommt dabei die kommerzielle Software ANSYS-CFX in der Version 12.0. Mittels ICEM-CFD in der Version 12.0 werden die

Berechnungsgitter erzeugt, mit denen die Simulationen durchgeführt werden. Für beide Portale wird ein Rechengitter erzeugt, welches die lokale Geometrie geeignet abbildet.

Die Rechengitter sind zweigeteilt. Sie bestehen aus einem stationären Teil, welcher die Umgebung, den Portalbereich und den Tunnel abbildet, sowie einem beweglichen Teil, der den Zug enthält und der sich innerhalb des stationären Teils in Fahrtrichtung des Zuges longitudinal bewegen kann. Für den beweglichen Zugteil wird auf ein bereits existierendes Gitter des ICE 3 zurückgegriffen. Die grundlegenden Parameter und Randbedingungen der Simulationen sind in Tabelle 1 abgebildet:

Tabelle 1: Parameter und Randbedingungen der Strömungssimulation

| Parameter | Wert | Einheit |
|----------------------|-----------------------------|---------|
| Turbulenzmodell | SST | |
| Wandfunktionen | Automatic | |
| Wärmetransportmodell | Total Energy | |
| Advection Scheme | High Resolution | |
| Transient Scheme | Second Order Backward Euler | |
| Stoffdaten | Luft mit Idealgasverhalten | |
| Temperatur | 10 | °C |
| Zuggeschwindigkeit | 250 | km/h |
| Zeitschrittweite | 0,048 | s |
| Fahrzeug | ICE 3 | |

Die Einfahrdruckwellen im Falle von davon abweichenden Randbedingungen (beispielsweise eine andere Temperatur und damit geänderte Dichte und Schallgeschwindigkeit) sind näherungsweise skalierbar entsprechend dem Ansatz aus [Ti08]:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot v_{zug}^2 \cdot f(M, \Phi) \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = \eta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{zug}^3 \cdot f(M, \Phi) \cdot \frac{1}{d_{h,tun}} \quad (2)$$

$$f(M, \Phi) = \frac{1 - \Phi^2}{\left(1 - \frac{v_{zug}}{c_0}\right) \left(\frac{v_{zug}}{c_0} + \Phi^2\right)} \quad (3)$$

Die Einfahrdruckwelle anderer Fahrzeuge wird basierend auf der Einfahrdruckwelle des ICE 3 so skaliert, dass der maximale Einfahrdruckgradient des ICE 1 6% größer ist als der des ICE 3 und der Einfahrdruckgradient des TSI-Zuges 30% größer ist als bei der ICE 3 Einfahrt.

Der „TSI-Zug“ stellt an dieser Stelle eine Besonderheit dar, da für diesen virtuellen Zug keine eindeutigen Vorgaben zum Fahrzeugquerschnitt und zur Kopfform gemacht werden können. Die tun-

nelaerodynamischen Eigenschaften dieses Fahrzeugs sind vielmehr durch die Anforderung § 4.2.6.4 der TSI HS RST [EG08] indirekt vorgegeben. Eine Auswertung und Übertragung dieser Anforderung resultiert in dem Ansatz, dass für den „TSI-Zug“ über den Geschwindigkeitsbereich von 250 km/h bis 300 km/h ein Einfahrdruckgradient angesetzt werden kann, der dem 1,3-fachen Einfahrdruckgradienten eines ICE 3-Zugkopfes bei gleicher Geschwindigkeit entspricht.

3.3.2 Aufteilung der Einfahrdruckwelle

Die Berechnung der Aufteilung der Druckwelle beim Durchlaufen des Tunnels erfolgt mit dem innerhalb des Projekts BEMT neu entwickelten Programm „WAVE“ in der Version 1.4. Dieses Programm basiert auf dem in [Ad08] beschriebenen Berechnungsansatz und kann die Aufteilung für das vollständige Zeitsignal des Druckes berechnen.

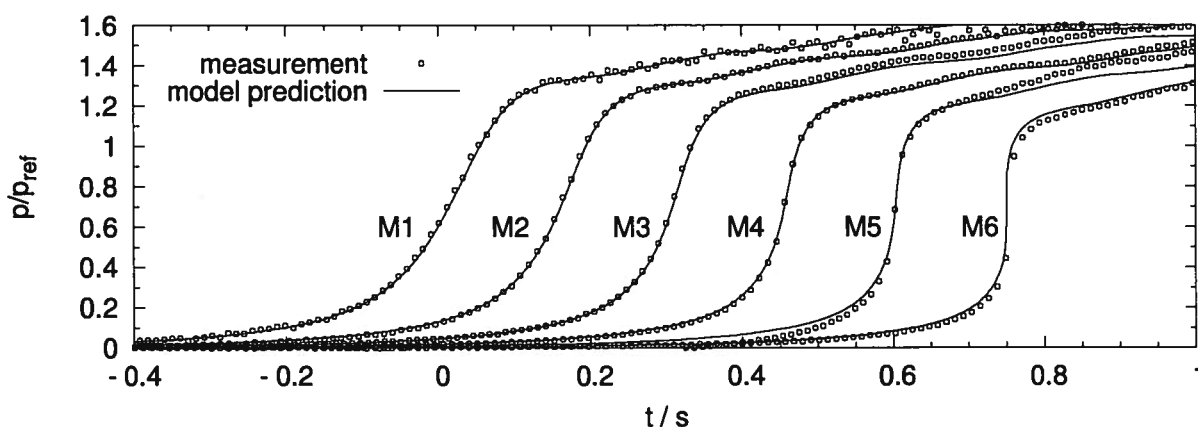


Bild 3: Vergleich von gemessenen und berechneten Druckverläufen an 6 Positionen innerhalb des Euerwagtunnels ohne akustische Absorber

Die Anwendung wurde anhand von Messungen innerhalb der Tunneln Euerwang und Irlahüll auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt kalibriert. Die innere Auskleidung (Betonschalung) dieser beiden Tunnel ist repräsentativ für neue HGV-Tunnel, so dass die aerodynamischen Eigenschaften vergleichbar mit dem Steinbühltunnel sind. In Bild 3 ist ein Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Druckwellen dargestellt.

Für die Berechnung der Aufteilung mit WAVE kommen folgende Parameter zum Einsatz:

Tabelle 2: Parameter und Randbedingungen der Aufteilungsberechnung

| Parameter | Wert | Einheit |
|------------------------------|------------|---------|
| Bewegtes Rechengitter | An | |
| Räumliche Diskretisierung | 0,0625 | m |
| CFL- Zahl | 0,9 | |
| Nachlauf der Welle | 500 | m |
| Stationäre Reibung | An | |
| Reibungskoeffizient | 0,04 | |
| Instationäre Reibung | An | |
| Instationäres Reibungsmodell | Vardy 2003 | |
| Inst. Wichtungsfaktor | 2,5 | |

| Fortsetzung Tabelle 2 | | |
|-----------------------|---------------------|----------------|
| Parameter | Wert | Einheit |
| Tunneltemperatur | 12 | °C |
| Tunnellänge | 4900 | m |
| Tunnelquerschnitt | 60,5 | m ² |
| Hydr. Durchmesser | 8,5 | m |
| bei Unstetigkeiten | Alte Werte benutzen | |

3.3.3 Emission der Mikrodruckwelle

Wenn die dem Zugkopf voraus laufende Verdichtungswelle das Ausfahrtportal erreicht, wird sie dort fast vollständig reflektiert und läuft als Verdünnungswelle zurück in den Tunnel. Ein geringer Teil ihrer Energie wird in Form einer Mikrodruckwelle an die Umgebung abgestrahlt. Die Form der abgestrahlten MDW kann nach [Oz97] über die analytische Fernfeldlösung für eine vibrierende Scheibe (bzw. Kolben) in einer unendlich ausgedehnten Wand bestimmt werden:

$$p_{MDW}(t) = \frac{A_{tun}}{\gamma_{em} \cdot \Omega \cdot c_0 \cdot r} \cdot \left[\begin{aligned} & \frac{d}{dt} p\left(t - \frac{r}{c_0}\right) + \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\pi} \cdot T_1} \cdot \int_0^{t - \frac{r}{c_0}} e^{-\frac{\left(t - \frac{r}{c_0} - \tau\right)^2}{4T_1^2}} \frac{d}{dt} p(\tau) d\tau + \\ & + \frac{11}{50 \cdot \sqrt{\pi} \cdot T_2^2} \cdot \int_0^{t - \frac{r}{c_0}} \left(t - \frac{r}{c_0} - \tau\right) e^{-\frac{\left(t - \frac{r}{c_0} - \tau\right)^2}{4T_2^2}} \frac{d}{dt} p(\tau) d\tau \end{aligned} \right] \quad (5)$$

Dabei bezeichnet r den Abstand vom Portal entlang der Tunnelachse und Ω den Raumwinkel, der über die Abstrahlung in die Portalumgebung charakterisiert ist. Der Faktor γ_{em} stellt eine Korrektur bzw. empirische Anpassung an Messwerte dar.

Als Höchstwert für den Raumwinkel kann der Wert $\Omega = 2\pi$ angesehen werden. Dies entspricht einem Portal, das in eine flache Umgebung ohne Hindernisse mündet. Die Druckwelle kann hier sowohl vor als auch hinter das Portal abgestrahlt werden. Ist der freie Raum in der Portalumgebung durch Trogvorbauten oder Einschnitte versperrt, muss das durch Verminderung von Ω berücksichtigt werden.

Neueste Messungen im Rahmen des Projekts BEMT am Euerwangtunnel – das südliche Ausfahrtportal liegt in einem Geländeeinschnitt – lassen Rückschlüsse auf die zu erwartenden Verhältnisse am Steinbühltunnel zu. In Tabelle 3 sind verschiedene real gemessene Abstrahlenszenarien mit den entsprechend Gl. 5 berechneten Abstrahlwinkeln dargestellt:

Tabelle 3: Berechnete Abstrahlwinkel von gemessenen MDW in Abhängigkeit von der Umgebung

| Tunnel | Abstand vom Portal | $\gamma_{em} \cdot \Omega$ |
|---|--------------------|----------------------------|
| Euerwang Südportal (Schrägportal ins Freie) | 25 m | 3,2 |
| | 50 m | 3,2 |

Da der Steinbühltunnel am Portal Hohenstadt in einem Geländeeinschnitt ins Freie mündet, werden hier die Abstrahlwinkel vom Euerwang Südportal $\Omega = 3,2$ benutzt. Für das Portal Todsburg,

welches direkt auf die Filstalbrücke mündet, wird im Rahmen einer eher konservativen Abschätzung ebenfalls $\Omega = 3,2$ benutzt. Der wahre Abstrahlwinkel wird etwas größer sein, kann aber aufgrund fehlender Erfahrungswerte - bisher gibt es keine MDW emittierenden Portale die direkt auf eine Brücke münden - nicht genauer prognostiziert werden. Alle Drucksignale werden in einem Abstand von 25 m vom Portal berechnet.

3.4 Vorgehen bei der Untersuchung

Über die in Abschnitt 3.3.1 beschriebene CFD-Lösung mittels „ANSYS-CFX 12.0“ wird der zeitliche Verlauf der Einfahrdruckwelle für die verschiedenen Fahrzeuge und Umgebungsbedingungen bestimmt. Anschließend wird die durch die Tunnelröhre laufende Verdichtungswelle entsprechend dem Aufstellungsansatz 3.3.2 als vollständiges Zeitsignal bestimmt. Die Berechnung erfolgt mittels „WAVE“ in der Version 1.4. An den Tunnelportalen wird ein Teil der Verdichtungswelle als MDW in die Umgebung emittiert. Die Berechnung des vollständigen Drucksignals der emittierten MDW erfolgt analog Abschnitt 3.3.3.

Die berechneten MDW-Signale werden an TTZ 112 „Akustik und Erschütterungen“ zur Bestimmung der akustischen Pegel und für die akustische Bewertung der MDW-Emissionen übergeben. Die Vorgehensweise zur Pegelbestimmung und der Bewertung sind nicht Bestandteil dieser aerodynamischen Untersuchung und werden in einem separaten Bericht durch TTZ 112 dargestellt.

4 Ergebnisse

4.1 Maßnahmenkonzept

Die in der Planung ausgewiesenen Portalbauwerke besitzen Entlüftungsöffnungen, die bisher nur schematisch dargestellt sind. Im Rahmen dieser Untersuchung erfolgt eine Anpassung der Position und Größe dieser Öffnungen, so dass die geforderten akustischen Richtwerte eingehalten werden. Dabei werden die Öffnungen iterativ so lange modifiziert bis die Schallpegel der MDW so weit reduziert sind, dass der Nachweis für die Einhaltung der Richtwerte erbracht werden kann.

Der Nachweis erfolgt grundsätzlich für die Fahrt auf dem Regelgleis. Unter der Randbedingung eines restriktionsfreien Gleiswechselbetriebs muss die für das Regelgleis entworfene Haube inklusive der spezifischen Anordnung der Öffnungen auch am Gegengleis angebracht werden. Für das Portal Hohenstadt ist das ohne Einschränkungen möglich. Am Portal Todsburg ist die Haube der nördlichen Röhre in der vorliegenden Planung kürzer und somit eine Übertragung des Konzepts von der südlichen Röhre nicht direkt möglich. Wenn die nördliche Haube im Inneren des Berges - der Portalfußpunkt auf der Filstalbrücke verändert sich dabei nicht - auf die gleiche Länge wie die südliche Haube verlängert werden kann, ist eine Übertragung des Konzepts möglich. Damit ist ein restriktionsfreier Gleiswechselbetrieb möglich. Wenn die nördliche Haube nicht der südlichen Haube entspricht, muss im Falle von Gleiswechselbetrieb eine Geschwindigkeitsreduktion im Bereich des Portals erfolgen.

Für die Portale des Steinbühltunnels wurde ein Konzept erarbeitet, welches die in Bild 4 dargestellten Haubenbauwerke umfasst. Die Länge der Haube am Westportal (Todsburg) beträgt 34 m vom Fußpunkt der Portalschräge bis zum Querschnittsprung des Übergangs zum Tunnel. Die Portalschräge ist mit 45° ausgebildet und der lichte Querschnitt beträgt 90 m^2 . Für die Haube am Ostportal (Hohenstadt) konnte keine geeignete, mit der vorliegenden Planung kompatible Lösung gefun-

den werden, die auf einer Länge von 19,5 m untergebracht werden kann. Eine geeignete Variante ist 34 m lang, gemessen vom Fußpunkt der Portalschräge bis zum Querschnittsprung des Übergangs zum Tunnel. Der Fußpunkt des Portals wird dabei gegenüber der Planung nicht verschoben. Die Haube verlängert sich ausschließlich unterirdisch. Der Querschnittsprung beim Übergang zum Tunnel verschiebt sich somit um 14,5 m in den Berg hinein. Unverändert bleibt die finale Geländemodellierung, so dass die Außenansicht gleich bleibt. Die Öffnungen können aufgrund der geringen Überdeckung so angebracht werden, dass keine Umplanung des Geländes notwendig ist. Der lichte Querschnitt der Haube beträgt wie zuvor beim Portal Todsburg 90 m².

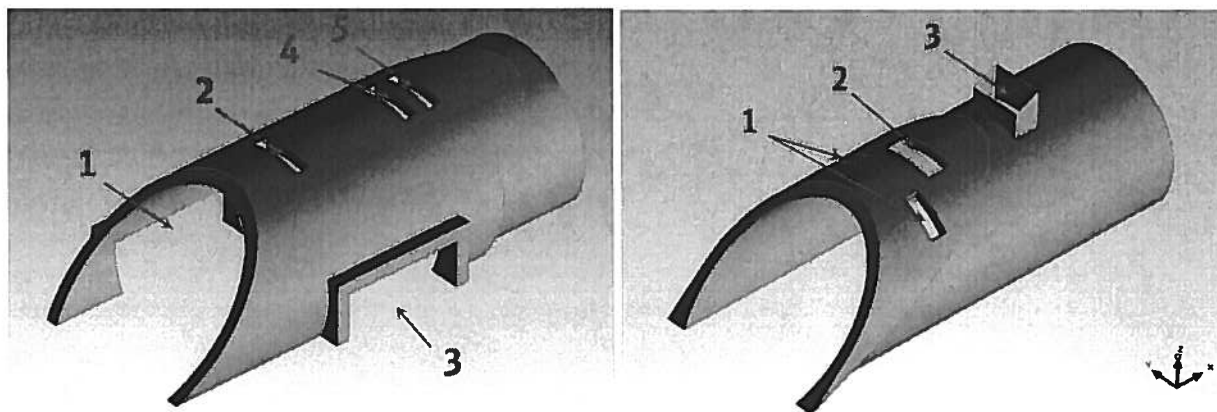


Bild 4: Detailzeichnung der Portalhauben (links: Portal Todsburg, rechts: Portal Hohenstadt)

Die Position und Größe der einzelnen Öffnungen sind in Tabelle 4 abgebildet. Die Haube des Ostportals besitzt 4 Öffnungen, von denen die ersten beiden symmetrisch angeordnet sind. Die Haube am Westportal besitzt zwei permanent geöffnete Durchfahröffnungen für Rettungsfahrzeuge und drei Öffnungen an der Haubendecke.

Tabelle 4: Größe und Position der Öffnungen in den Portalhauben

| Portal | Öffnung | Position des Mittelpunkts hinter dem Fußpunkt des Einfahrportals in m | Breite in m | Höhe in m |
|------------------------|---------|---|-------------|-----------|
| Ostportal (Hohenstadt) | 1 (2x) | 13 | 1,33 | 3 |
| | 2 | 16 | 2 | 4 |
| | 3 | 24 | 2 | 4 |
| Westportal (Todsburg) | 1 | 10,5 | 10 | 3,5 |
| | 2 | 14 | 1 | 4 |
| | 3 | 17,5 | 9 | 3,5 |
| | 4 | 23 | 1 | 4 |
| | 5 | 25 | 1 | 4 |

Für diese beiden Haubenkonfigurationen wurde ein entsprechendes CFD-Gitter der Portale und der näheren Portalumgebung erstellt, um die Generierung der Einfahrdruckwelle simulieren zu können. In Bild 5 sind die beiden finalen Einfahrscenarien abgebildet. Zur Optimierung der Re-

chenzeit wurden verschiedene Vereinfachungen vorgenommen. So wurden z.B. die Öffnungen der Hauben des Gegengleises nur dann detailliert mit abgebildet, wenn sie nahe genug an den Öffnungen der Haube des Regelgleises lagen. Auch der Geländeverlauf und der Tunnel des Gegengleises wurden entsprechend vereinfacht.

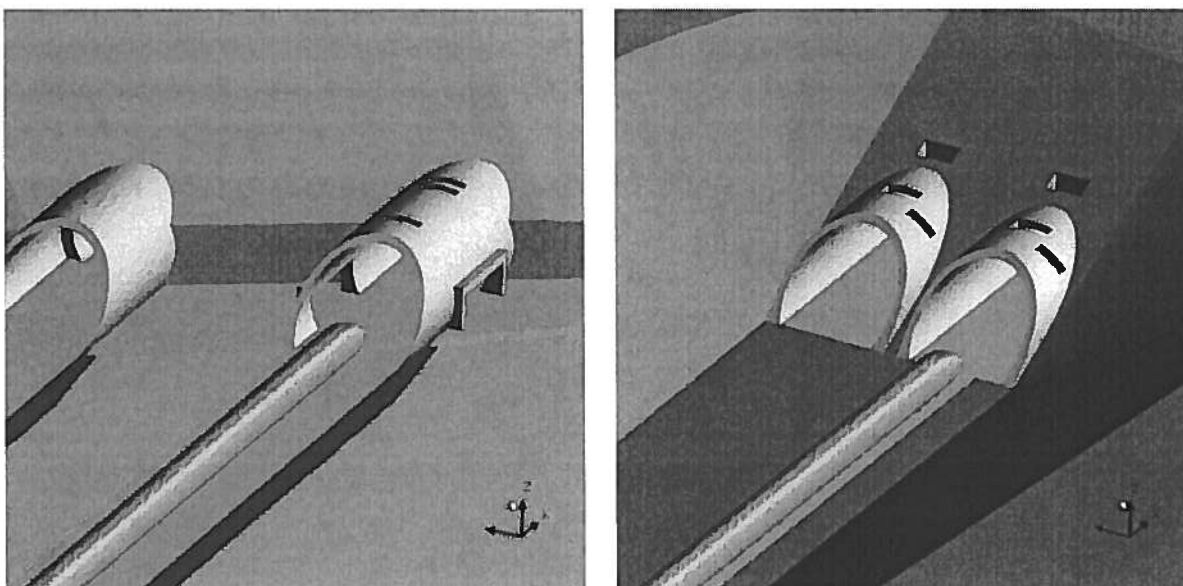


Bild 5: Einfahrscenarien für die CFD Simulation (links: Portal Todsburg, rechts: Portal Hohenstadt)

Der nachfolgende aerodynamische Nachweis erfolgt für die Einfahrt in diese beiden Portalkonfigurationen.

4.2 Generierung der Einfahrdruckwelle

Die Einfahrten in die beiden in 4.1 dargestellten Portale des Steinbühltunnels wurden mittels CFD Simulation untersucht. Für den meteorologischen Standardfall ($T_{\text{umgebung}} = 10^{\circ}\text{C}$) sind die berechneten Einfahrdruckwellen in Bild 6 dargestellt. Die Druckwellen für den Winterfall (-15°C) und den Sommerfall (35°C) sind im Anhang (A9 und A10) dargestellt.

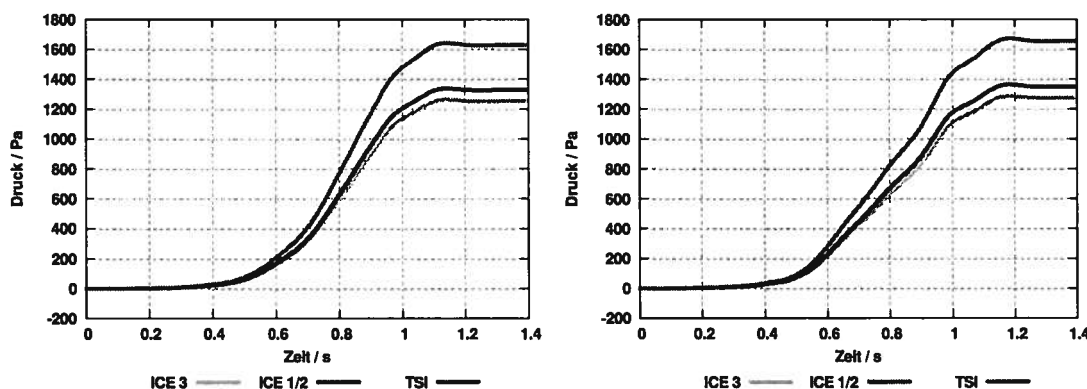


Bild 6: Berechnete Druckwellen bei der Einfahrt verschiedener Fahrzeuge mit 250 km/h in den Steinbühltunnel (links: Einfahrt Portal Todsburg, rechts: Einfahrt Portal Hohenstadt)

Ein gleichmäßiger linearer Anstieg bis zum maximalen Druck wäre der Idealfall. In diesem Fall sind die Einfahrdruckgradienten am kleinsten. Mit den in dieser Untersuchung vorgeschlagenen Entlüftungsöffnungen kann sich diesem Ziel hinreichend genähert werden, um die geforderten Richtwerte einhalten zu können. Die maximalen Einfahrdruckgradienten sind für alle Fahrzeuge, alle meteorologischen Randbedingungen und für die Einfahrt auf dem Regelgleis in beide Portale in Tabelle 5 aufgelistet:

Tabelle 5: maximale Einfahrdruckgradienten

| Szenario | Fahrzeug | Einfahrt Westportal Todsburg in Pa/s | Einfahrt Ostportal Hohenstadt in Pa/s |
|-----------------|----------|--|---|
| 10°C (Standard) | ICE 3 | 3147 | 3226 |
| | ICE 1/2 | 3336 | 3419 |
| | TSI | 4091 | 4193 |
| -15 °C (Winter) | ICE 3 | 3461 | 3548 |
| | ICE 1/2 | 3669 | 3760 |
| | TSI | 4500 | 4612 |
| 35 °C (Sommer) | ICE 3 | 2886 | 2958 |
| | ICE 1/2 | 3059 | 3135 |
| | TSI | 3751 | 3845 |

Die maximalen Einfahrdruckgradienten steigen im Winter analog Gleichung (2) und (3), da die Dichte und die Schallgeschwindigkeit bei tiefen Temperaturen zunehmen. Im Sommer sind die maximalen Gradienten geringer.

4.3 Aufsteilung der Einfahrdruckwelle

Die Aufsteilung der Einfahrdruckwelle wurde mittels „WAVE“-Simulation berechnet. Konservativ wurde die Wellenausbreitung mit einer Tunnellänge von 4.900 m berechnet. In Bild 7 und Bild 8 sind die Ergebnisse für den Standardfall (10°C) und die Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h dargestellt.

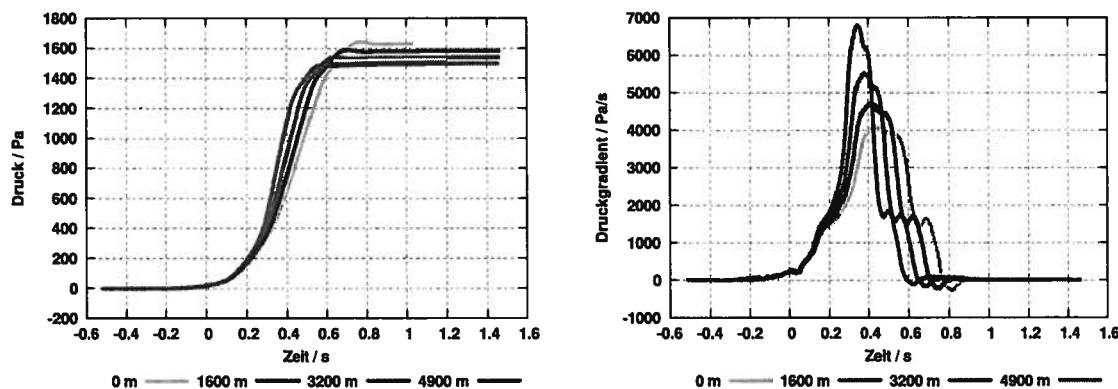


Bild 7: Aufsteilung der Druckwelle nach der Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h ins Westportal in verschiedenen Sektionen des Tunnels (links: Druck, rechts: Druckgradienten)

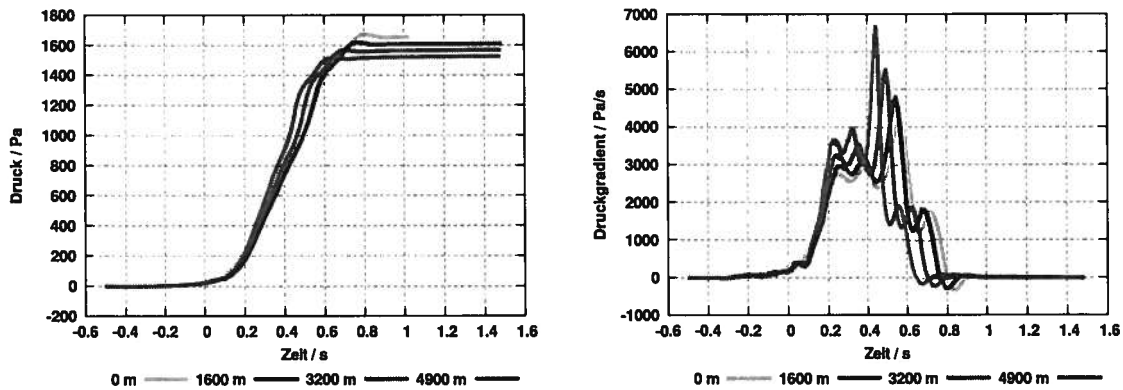


Bild 8: Aufsteilung der Druckwelle nach der Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h ins Ostportal in verschiedenen Sektionen des Tunnels (links: Druck, rechts: Druckgradienten)

Die Berechnung der Aufsteilung erfolgte kontinuierlich, wohingegen in den Bildern ausschließlich die Drücke und Gradienten an 4 festen Positionen (am Einfahrportal, am Ausfahrportal und an 2 Positionen im Tunnelinneren) gezeigt werden. Weitere Ergebnisse für andere meteorologische Bedingungen sind im Anhang (A11 bis A14) abgebildet.

4.4 Emission der Mikrodruckwelle

Die an den Portalen abgestrahlte MDW wird in einem Abstand von 25 m von den Portalen berechnet. In Bild 9 sind die Emissionen für den Standardfall (10°C) und die Einfahrt im Regelbetrieb grafisch dargestellt. Die Signalverläufe für andere meteorologische Randbedingungen sind im Anhang (A15 und A16) dokumentiert.

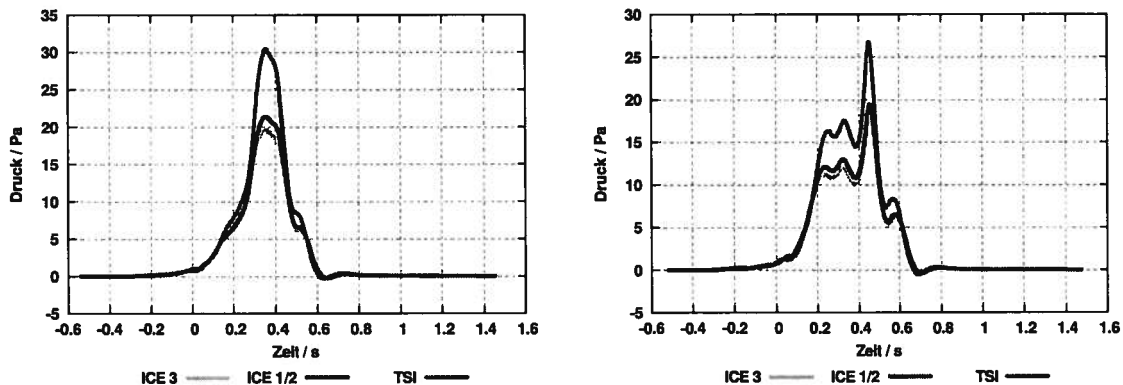


Bild 9: Emittierte Mikrodruckwellen in 25 m Abstand vom Ausfahrportal für die Einfahrt verschiedener Fahrzeuge (Links: Emissionen am Ostportal, Rechts: Emissionen am Westportal)

Diese Zeitverläufe werden für die Berechnung der akustischen Schallpegel und für die akustische Bewertung an TTZ 112 übergeben und an dieser Stelle nicht weiter diskutiert.

Die maximalen Amplituden der MDW werden noch einmal am gegenwärtigen aerodynamischen Richtwert von 20 Pa in 50 m Abstand vom Portal gespiegelt. Dies ist rein informativ und hat keinen Einfluss auf die akustische Bewertung der Emissionen. In Tabelle 6 sind hierzu die maximalen Drücke der MDW in einem Abstand von 50 m vom Portal abgebildet.

Tabelle 6: Emittierte Mikrodruckwellen in 50 m Abstand vom Portal

| Fahrzeug | Einfahrportal | Amplitude in Pa (Emissionsort) | |
|----------|--------------------------|--------------------------------|------|
| | | | |
| ICE3 | Westportal (Todsburg) | Ostportal (Hohenstadt) | 9,8 |
| | Ostportal | Westportal | 9,0 |
| ICE1 | Westportal | Ostportal | 10,7 |
| | Ostportal | Westportal | 9,7 |
| TSI | Westportal | Ostportal | 15,2 |
| | Ostportal | Westportal | 13,4 |

Der aerodynamische Richtwert wird im Regelbetrieb von allen untersuchten Fahrzeugen eingehalten. Relevant im Sinne der Nachweisführung sind jedoch die noch durch TTZ 112 auszuweisenden akustischen Richtwerte und nicht der aerodynamische.

5 Zusammenfassung

In dieser Untersuchung wird ein Maßnahmenkonzept für die Portale des Steinbühltunnels vorgestellt und die Wirksamkeit dieses Konzepts nachgewiesen. Die vorgestellten Maßnahmen senken die zu erwartenden Mikrodruckwellen-Emissionen unter die aktuell geforderten Richtwerte.

Die in der Planung nur schematisch dargestellten Entlüftungsöffnungen wurden im Laufe dieser Untersuchung optimiert und ein geeignetes Konzept gesucht, welches die Einhaltung der akustischen Richtwerte sicherstellt. Es konnte für jedes Portal eine geeignete Lösung gefunden werden, für die der Nachweis der Wirksamkeit erbracht wird. Für das Portal Todsburg wurde eine 34 m lange Haube inklusive Entlüftungsöffnungen ausgewiesen, die direkt in die vorliegende Planung übernommen werden kann. Die Haube am Portal Hohenstadt muss gegenüber der vorliegenden Planung auf 34 m verlängert und mit Entlüftungsöffnungen versehen werden, um die Einhaltung der akustischen Richtwerte für alle Fahrzeuge sicherzustellen. Eine rein unterirdische Verlängerung der Haube ohne eine Verschiebung des Portalfußpunkts wird vorgeschlagen.

Für einen restriktionsfreien Gleiswechselbetrieb sind die Abmessungen der Portalhauben inklusive der Position und Größe der Entlüftungsöffnungen auf das jeweilige Gegengleis zu übertragen. Die Haube an der nördlichen Röhre des Portals Todsburg muss dafür zusätzlich gegenüber der Planung verlängert werden. Ist dies nicht möglich, muss im Falle einer Einfahrt im Bereich des nicht angepassten Einfahrportals die Geschwindigkeit reduziert werden.

Die von den Portalen ausgehenden Emissionen werden als vollständige Druck-Zeit-Verläufe prognostiziert. Alle Untersuchungen basieren auf den im Projekt BEMT erarbeiteten Werkzeugen und Erkenntnissen. Diese ermöglichen eine Vorhersage des vollständigen Zeitverlaufs der Mikrodruckwellen, welche für eine akustische Pegelberechnung und eine abschließende Bewertung der Emissionen notwendig ist.

Ausgehend von der Berechnung des vollständigen Signals der Einfahrdruckwelle per CFD-Simulation wird die Aufteilung der Druckwelle im Tunnelinneren per „WAVE“-Simulation berechnet. Die an den Ausfahrportalen eintreffende Druckwelle wird schließlich umgerechnet in die emittierte Mikrodruckwelle. Das Ergebnis der Berechnungen sind die vollständigen Drucksignale der emittierten MDW in einem Abstand von 25 m vom Ausfahrportal. Diese werden an TTZ 112 in digitaler Form übergeben.

Die abschließende Bewertung der MDW-Immissionen erfolgt in einem dualen Richtwerteverfahren, das durch die Anwendung akustischer Richtwerte wirkungsbezogene Anforderungen mit berücksichtigt. Diese akustische Bewertung der Emissionen erfolgt in einem getrennten Untersuchungsbericht durch TTZ 112.

6 Unterschriften

geprüft:

gez. Tielkes

Dr. Thorsten Tielkes
Leiter TTZ 113

erstellt:

gez. Hieke

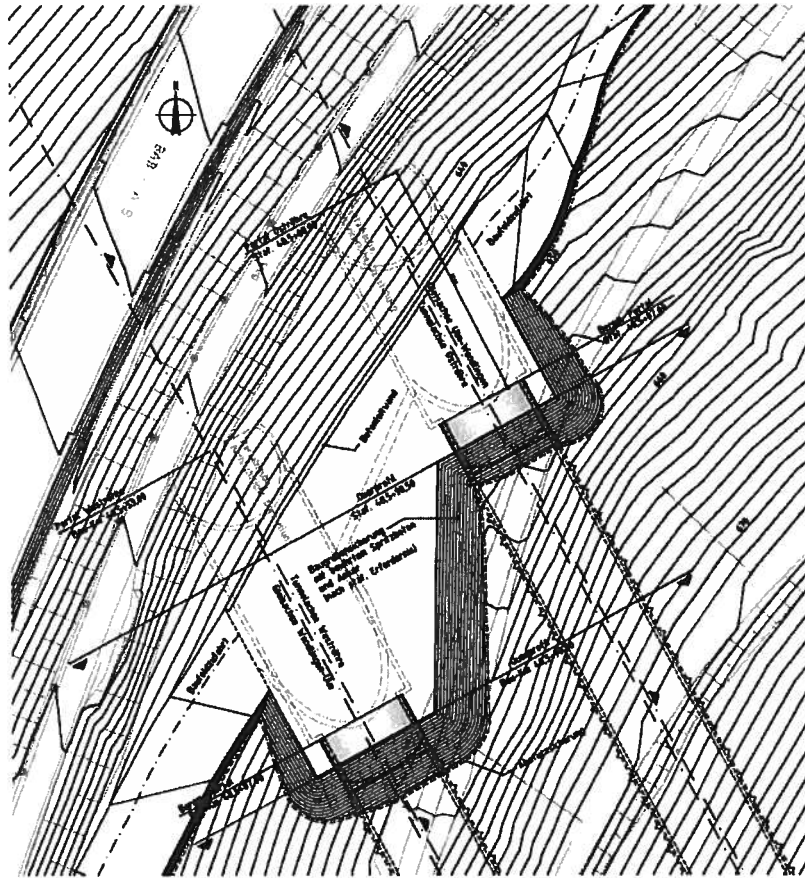
Dipl.-Ing. Michael Hieke
TTZ 113 Hie

freigegeben:

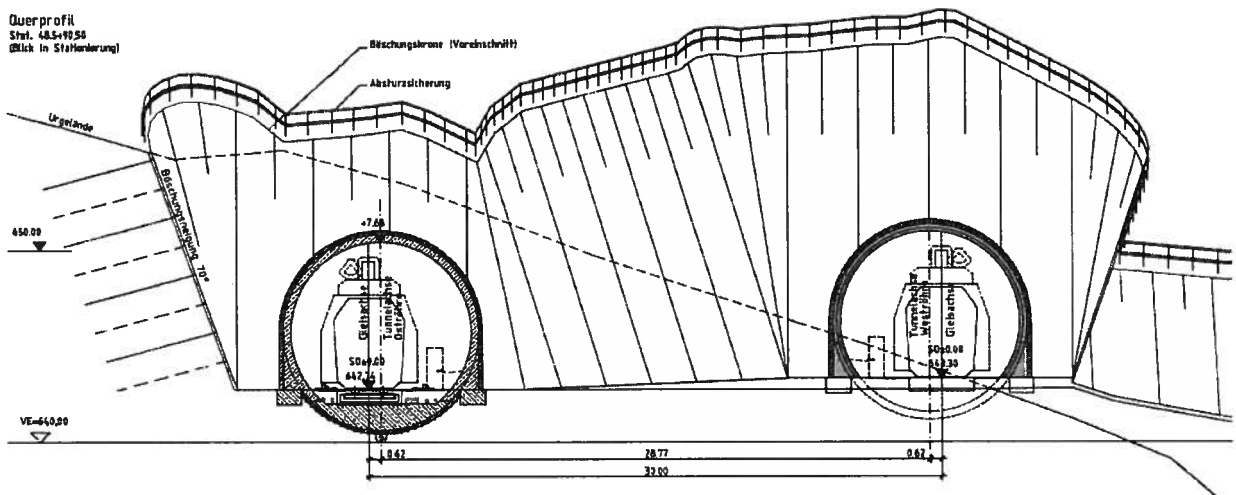
gez. Frevert

Prüfstelle

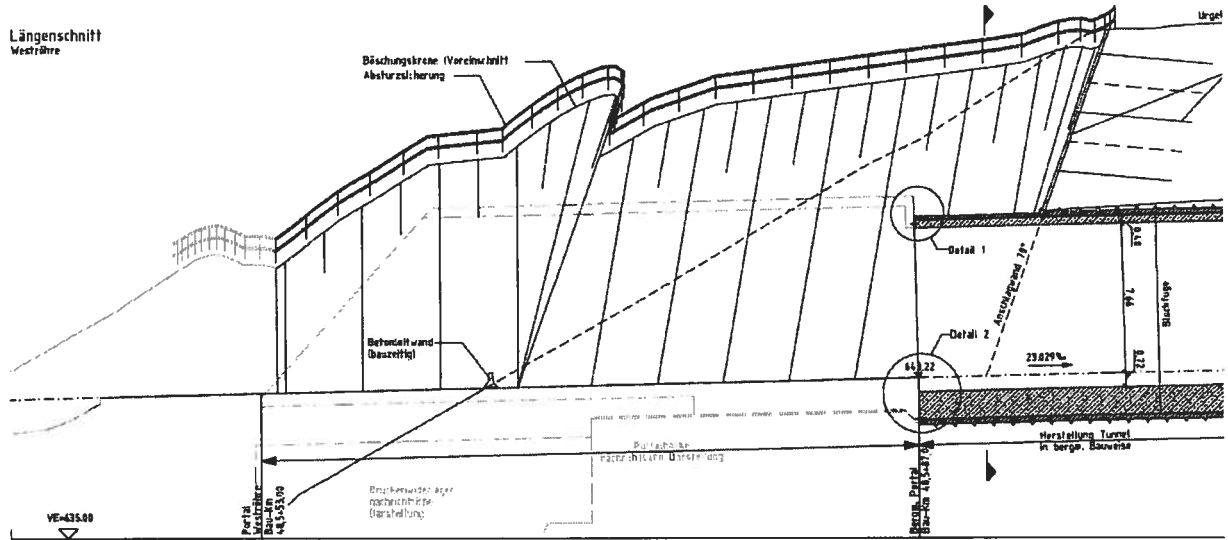
Anlage A1: Westportal Lageplan
Quelle - „Anlage 8.3.8 Blatt 3 von 5 vom 13.03.2009“



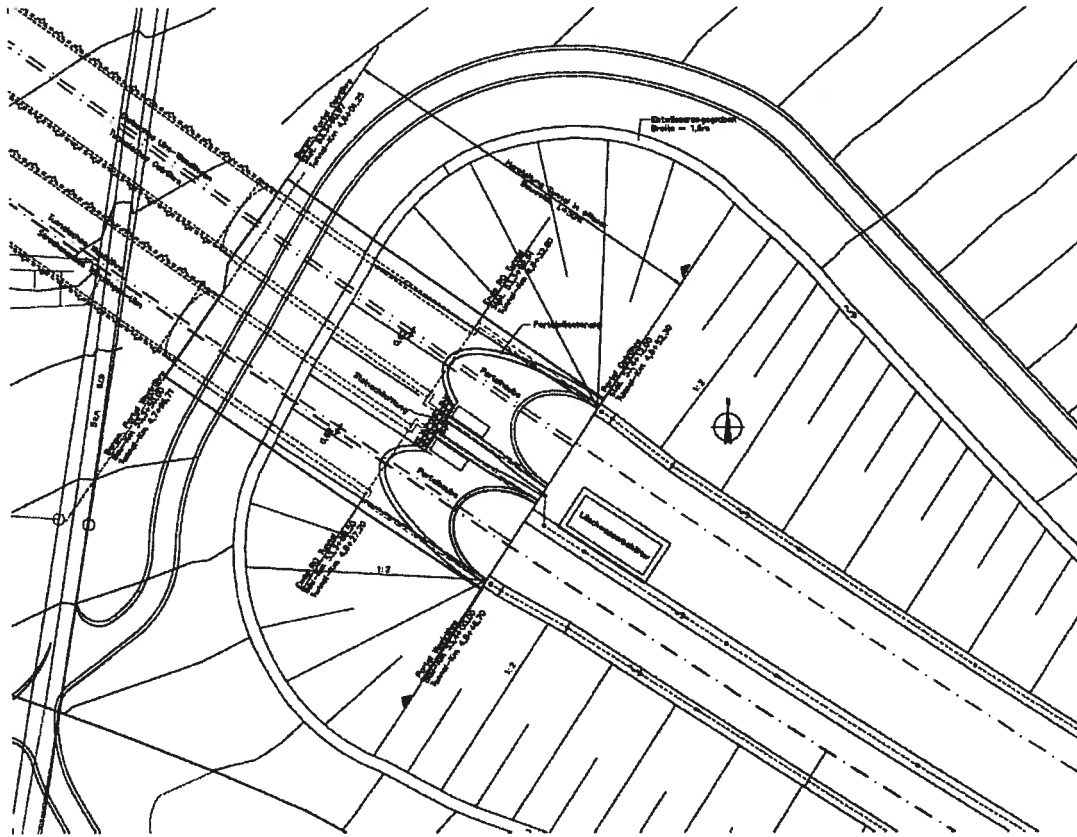
Anlage A2: Westportal Portalansicht
Quelle - „Anlage 8.3.8 Blatt 5 von 5 vom 13.03.2009“



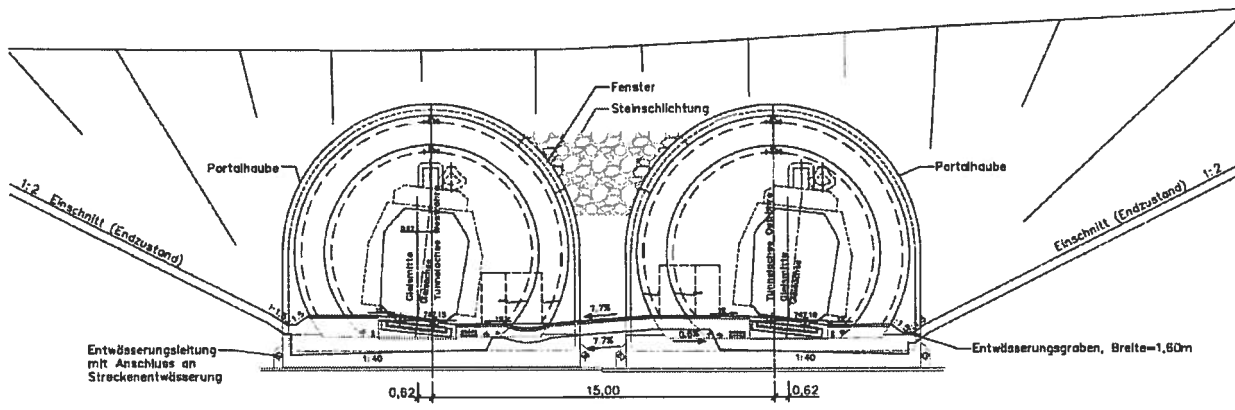
Anlage A3: Westportal Längsschnitt
Quelle - „Anlage 8.3.8 Blatt 4 von 5 vom 13.03.2009“



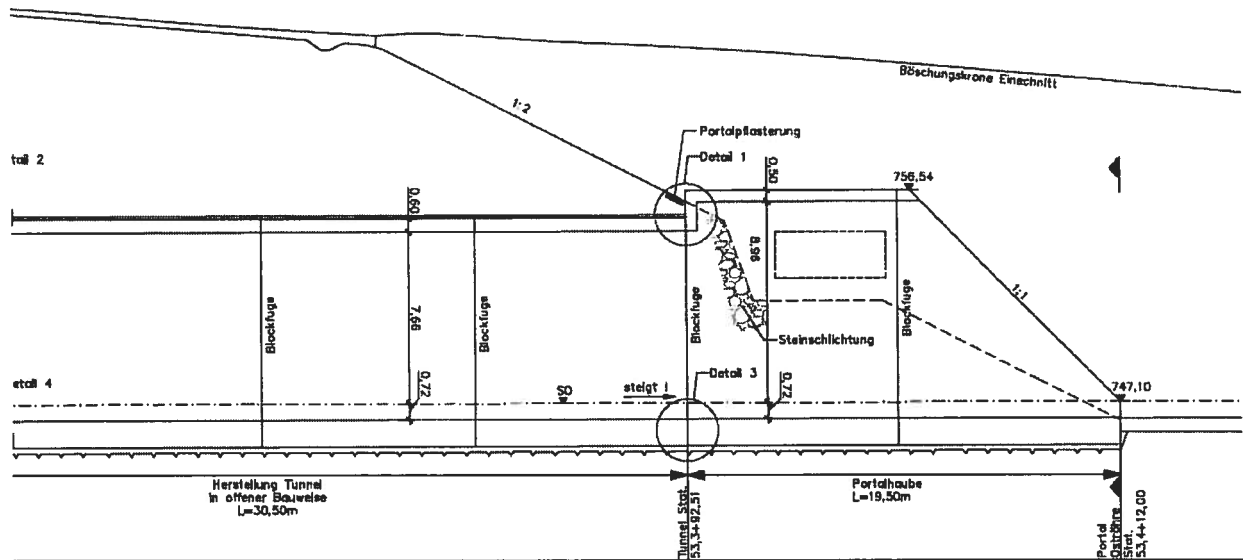
Anlage A4: Ostportal Lageplan
Quelle - „Anlage 8.3.8 Blatt 7 von 9 vom 06.03.2009“



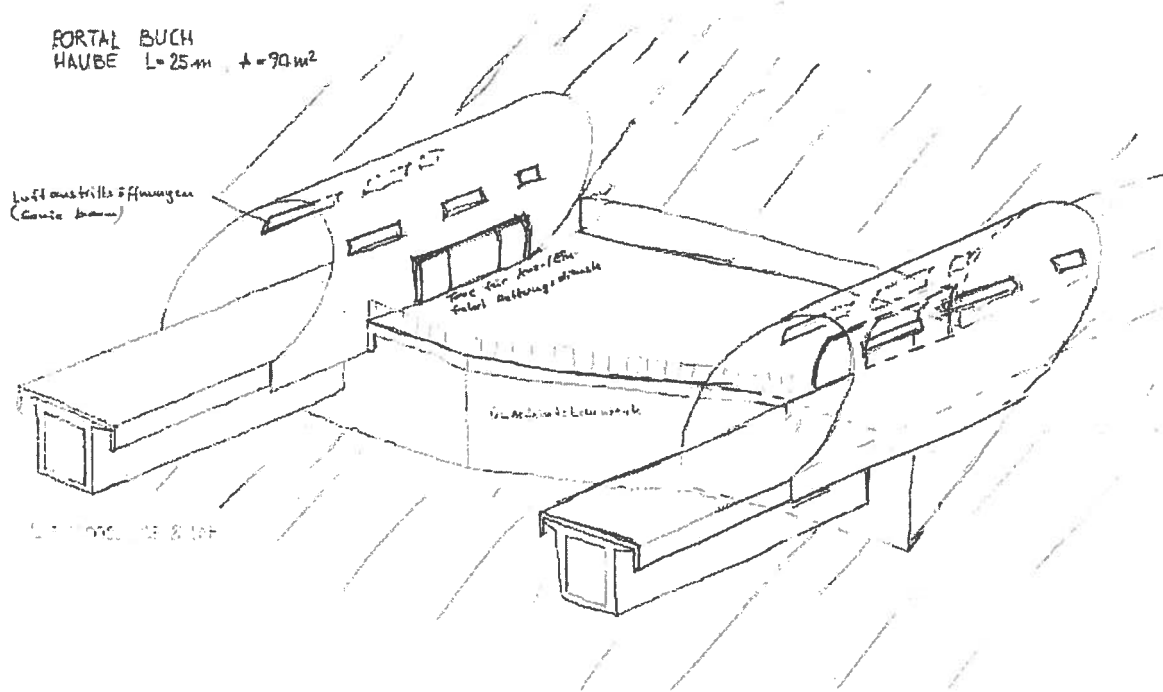
Anlage A5: Ostportal Portalansicht
Quelle - „Anlage 8.3.8 Blatt 9 von 9 vom 06.03.2009“



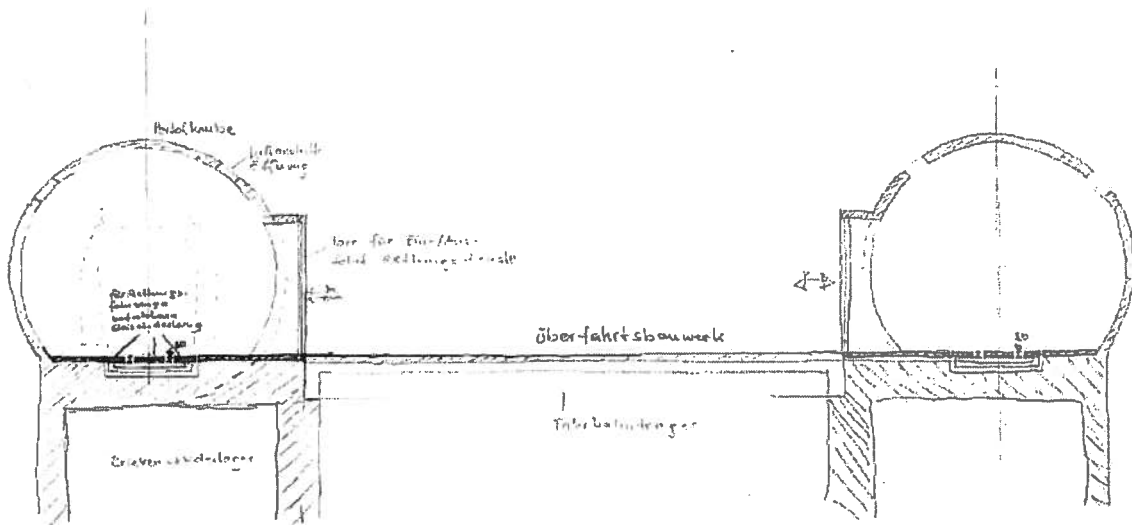
Anlage A6: Ostportal Längsschnitt
 Quelle - „Anlage 8.3.8 Blatt 7 von 9 vom 06.03.2009“



Anlage A7: Westportal Überfahrtsbauwerk 01
Quelle - „Entwurfsskizzen Haubenwerke Filstalbrücke - DB Projektbau vom 20.03.2009“

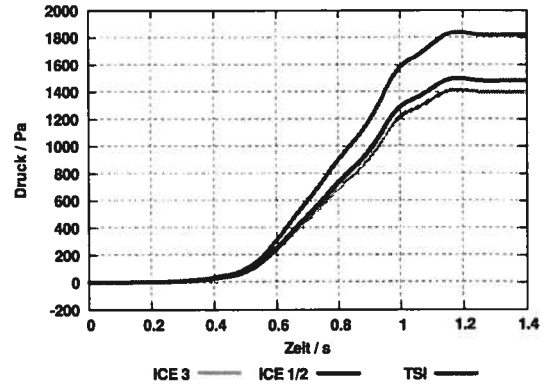
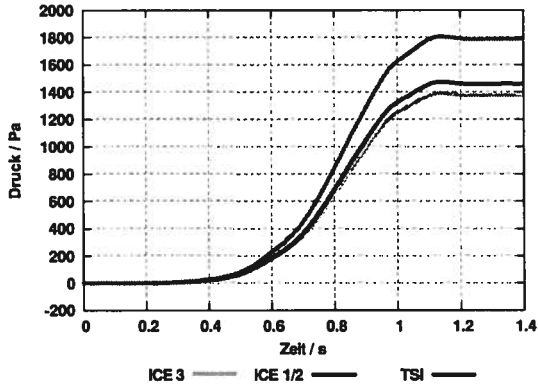


Anlage A8: Westportal Überfahrtsbauwerk 02
Quelle - „Entwurfsskizzen Haubenwerke Filstalbrücke - DB Projektbau vom 20.03.2009“



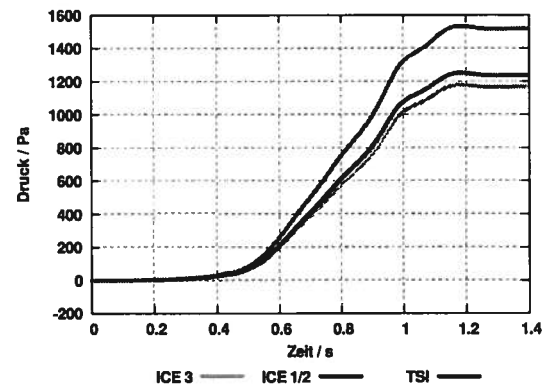
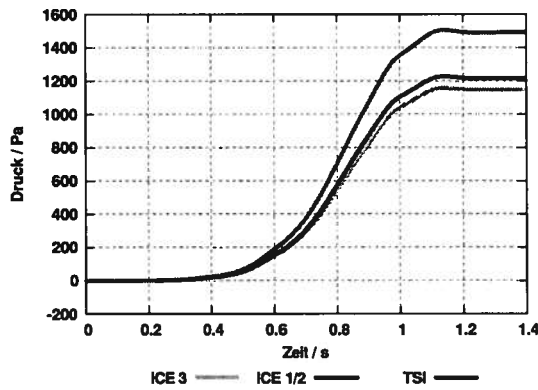
Anlage A9: Einfahrdruckwellen bei -15°C

links: Einfahrt Westportal mit 250 km/h, rechts: Einfahrt Ostportal mit 250 km/h

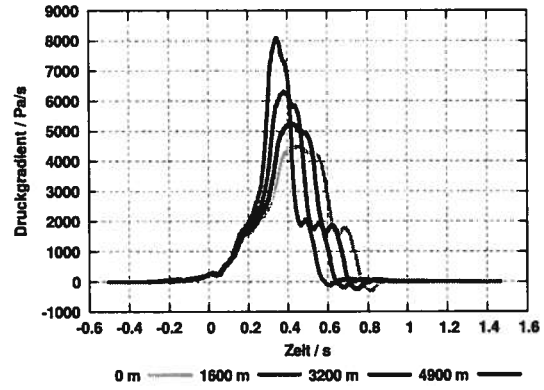
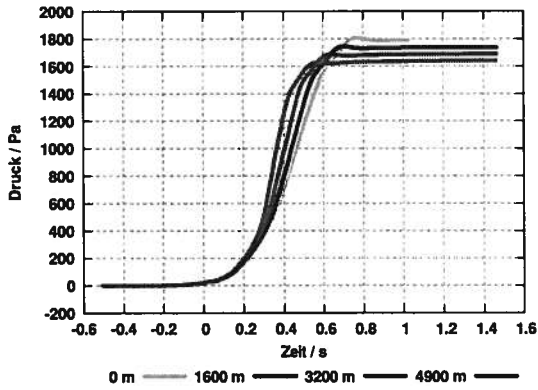


Anlage A10: Einfahrdruckwellen bei 35°C

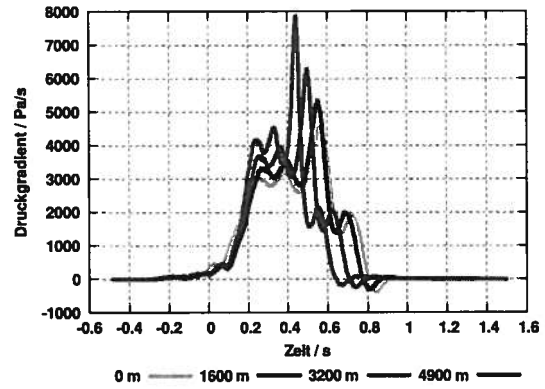
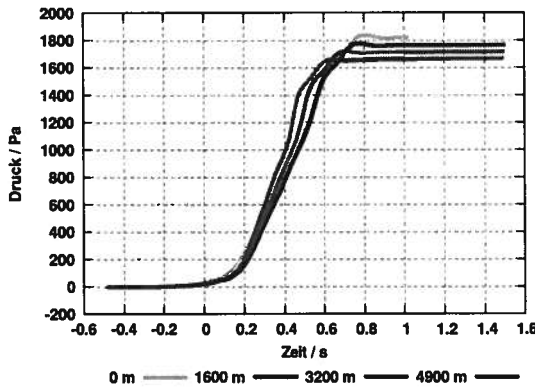
links: Einfahrt Westportal mit 250 km/h, rechts: Einfahrt Ostportal mit 250 km/h



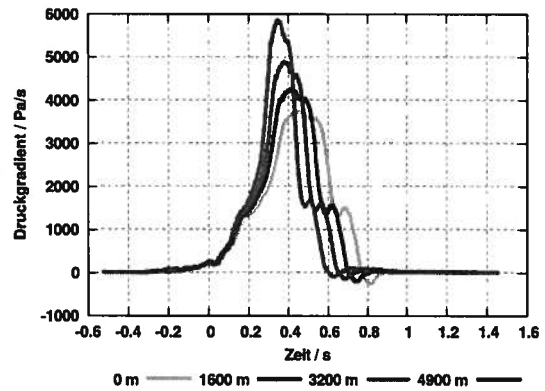
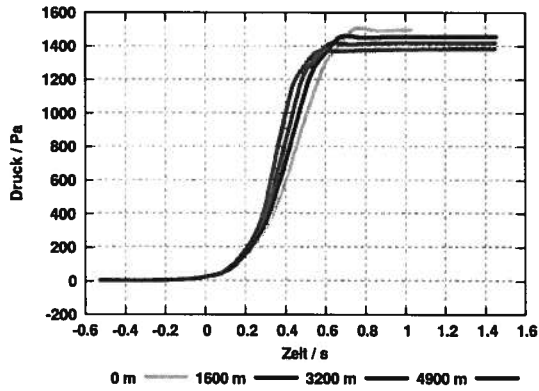
Anlage A11: Aufsteilung bei -15°C - Einfahrt ins Westportal (Todsburg)
 Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Druck, Rechts: Druckgradienten



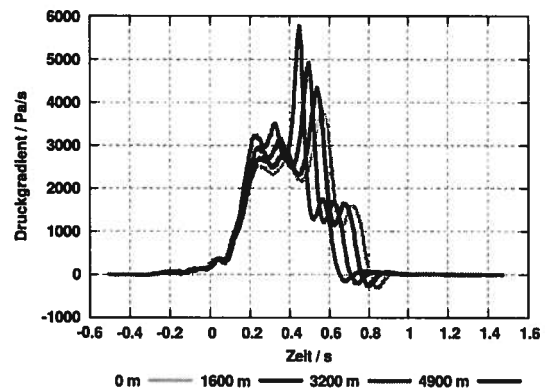
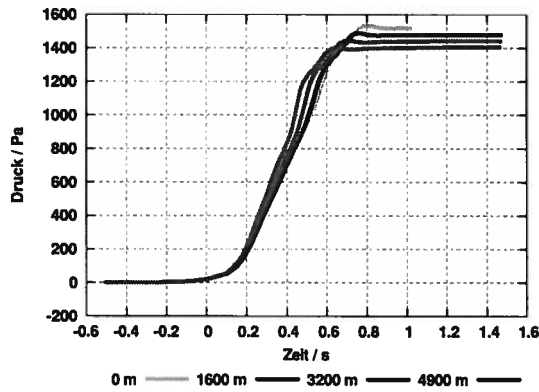
Anlage A12: Aufsteilung bei -15°C - Einfahrt ins Ostportal (Hohenstadt)
 Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Druck, Rechts: Druckgradienten



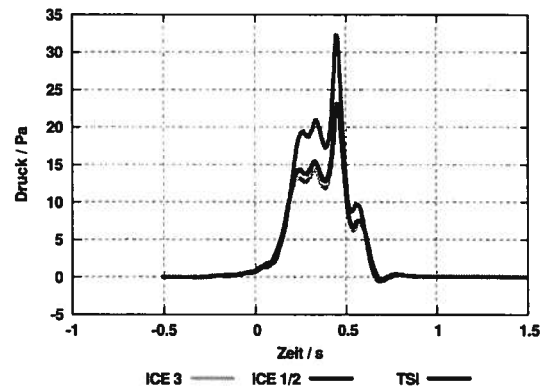
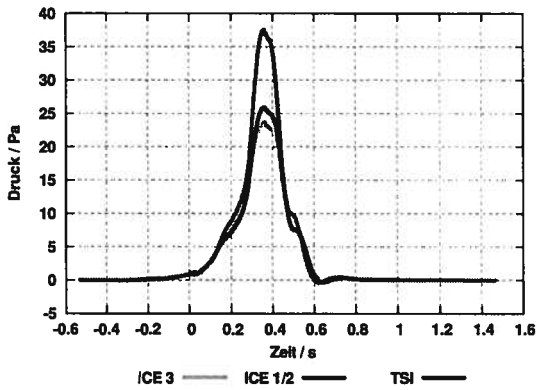
Anlage A13: Aufsteilung bei 35°C - Einfahrt ins Westportal (Todsburg)
 Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Druck, Rechts: Druckgradienten



Anlage A14: Aufsteilung bei 35°C - Einfahrt ins Ostportal (Hohenstadt)
 Einfahrt eines TSI Zuges mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Druck, Rechts: Druckgradienten



Anlage A15: MDW Emissionen bei -15°C in 25 m Abstand vom Ausfahrportal
 Einfahrt erfolgt mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Emissionen am Ostportal, Rechts: Emissionen am Westportal



Anlage A16: MDW Emissionen bei 35°C in 25 m Abstand vom Ausfahrportal
 Einfahrt erfolgt mit 250 km/h auf dem Regelgleis
 Links: Emissionen am Ostportal, Rechts: Emissionen am Westportal

