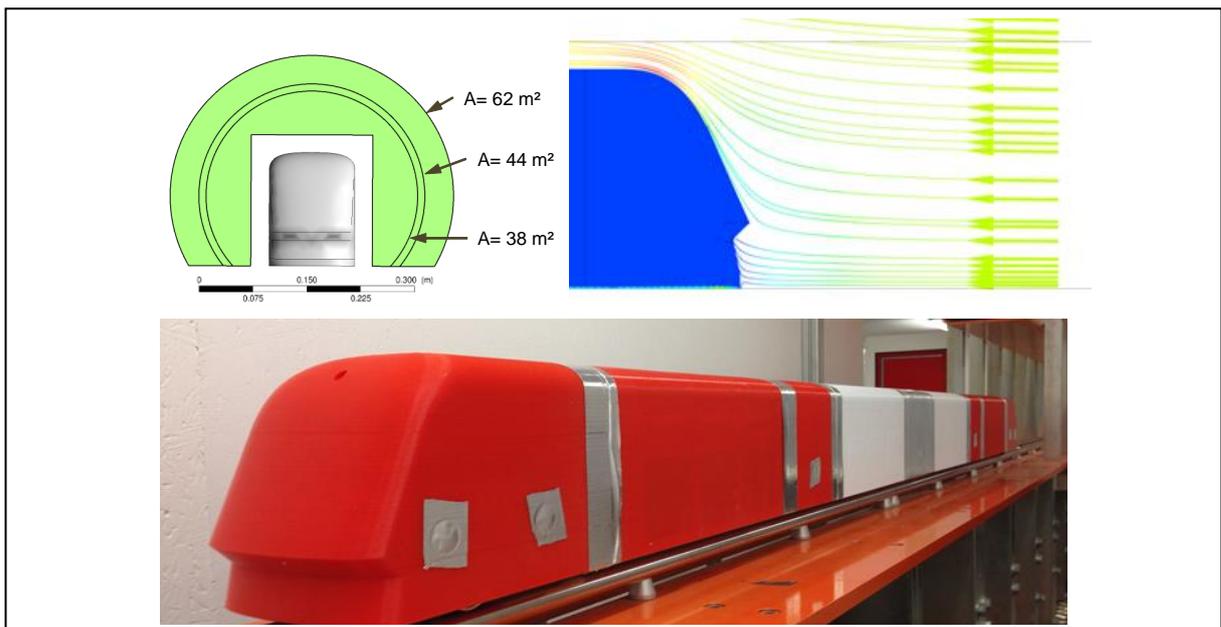


# Optimierung der Tunnelaerodynamik für Hochgeschwindigkeitsstrecken OPTUNAMIK

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2014  
(VIF2014)

Partner: AIT, DLR

Januar 2017



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
A - 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
A - 1010 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Austrian Institute of Technology GmbH  
Giefinggasse 2  
1210 Wien



### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Bereich Thematische Programme  
Sensengasse 1  
A – 1090 Wien



## 1 EINLEITUNG & ÜBERSICHT

Das Projekt OPTUNAMIK wurde im Zeitraum vom 1. Oktober 2015 bis 19. Dezember 2016 im Rahmen des VIF- Verkehrsinfrastrukturforschung 2014 von der Arbeitsgemeinschaft AIT- Austrian Institute GmbH und DLR das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt durchgeführt. Untersucht wurden die aerodynamische Auswirkung und das Optimierungspotenzial verschiedener Tunnelausbildungen bei Zugdurchfahrten von Hochgeschwindigkeitszügen in Eisenbahntunnels. Mittels strömungsmechanischen Simulationen (Computational Fluid Dynamics CFD) wurden verschiedene Zuggeschwindigkeiten und unterschiedlicher Tunnelkonfigurationen untersucht und die errechneten Drücke durch Modellversuche validiert. Mit der in ihrer Art weltweit einzigartigen Tunnel-Simulations-Anlage (TSG) des DLR in Göttingen konnten Zugdurchfahrten im Maßstab 1:25 bis zu einer Geschwindigkeit von  $v_{\max} = 230$  km/h im Tunnel realisiert und die Berechnungen bestätigt werden. Ein eigenes mittels 3D-Druck angefertigtes ÖBB - Railjet Zugmodell dient dazu reale Einflüsse bestmöglich zu erfassen.

Dazu wurden lokale Maßnahmen im Tunnel wie unterschiedliche Ausbildungen von Querschlaganschlüssen (bzw Quertunnel) bei einer Notausgangstür oder sequentielle Tunnelaufweitungen aber auch globale Maßnahmen wie Variation der Tunnelquerschnittsfläche, der Oberflächenrauigkeit etc. untersucht. Die Auswirkung der Maßnahmen auf Tunnelausrüstungsbauteile erfolgte am Beispiel einer Notausgangstür welche inklusiver dynamischer Effekte bei einer Durchfahrt belastet und analysiert wird. Abschließend wurden die Ergebnisse sowie die Auswirkungen auf die Lebensdauer gegenübergestellt und bewertet.

Die Projektpartner von AIT und DLR möchten sich hiermit bei allen Projektbeteiligten und Auftraggebern ÖBB und FFG für die ausgesprochen gute Zusammenarbeit und konstruktive Diskussion sowie Unterstützung bedanken.

Die Projektergebnisse werden entsprechend Ihrer Arbeitspakete wie folgt aufgliedert und dargestellt:

1. Adaptionparameter (AP1)
2. 3D-Strömungssimulation (AP2)
3. 1D-Strömungssimulation (AP2)
4. Strukturdynamische Berechnungen (AP3)
5. Versuchstechnische Validierung (AP4)
6. Bewertung (AP5)
7. Literaturverzeichnis
8. Anhang

# Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG & Übersicht.....	3
1.1	DEFINITION DER EXPERIMENTELLEN UND NUMERISCHEN UNTERSUCHUNGEN.....	9
1.1.1	Tunnelquerschnittsflächen für Modellversuch und CFD- Berechnung.....	9
1.1.2	Querschlagsanschlüsse bei Notausgangstüren .....	11
1.1.3	Zugmodelle für Versuch und Berechnungen.....	14
1.1.4	Oberflächenrauigkeit.....	14
1.1.5	Periodische Veränderungen des Tunneldurchmesser.....	14
1.1.6	Tunneltür und Zugskollektiv.....	15
1.1.7	Durchgeführte CFD-Simulationen .....	16
2	3D-Strömungssimulation.....	18
2.1	Methodik.....	18
2.1.1	Verfahren (CFD, kompressibel, Sliding Mesh) .....	18
2.1.2	Geometrie Tunnel & Zug, Skalierung.....	19
2.1.3	Geometrie Zug, Skalierung.....	21
2.1.4	Netz: Auflösung, Randschichten.....	22
2.1.5	Zeitschrittweite, CFL.....	23
2.1.6	Randbedingungen .....	23
2.1.7	Steadystate (Freifeld) Simulation zur Initialisierung.....	24
2.1.8	Darstellung des Druckverlaufs im Tunnel.....	25
2.2	Grundsätzliche Eignung der CFD-Methodik im Vergleich zum Versuch (TSG) .....	29
2.2.1	Simulationsmatrix .....	29
2.2.2	Ergebnisse .....	29
2.2.3	Zusammenfassung .....	34
2.3	Variation exzentrische Gleislage.....	36

2.3.1	Simulationsmatrix .....	36
2.3.2	Ergebnisse .....	36
2.4	Variation von Tunnelquerschnittsfläche (global) und Zuggeschwindigkeit.....	37
2.4.1	Simulationsmatrix .....	37
2.4.2	Ergebnisse .....	37
2.5	Skalierung 1:25 vs 1:1 .....	41
2.5.1	Methodik.....	41
2.5.2	Simulationsmatrix .....	41
2.5.3	Ergebnisse .....	41
2.6	Variation der Geometrie des Querschlaganschlusses.....	43
2.6.1	Simulationsmatrix .....	43
2.6.2	Ergebnisse .....	43
2.7	Tunnelaufweitung (38 →44 → 38 m <sup>2</sup> ) .....	45
2.7.1	Simulationsmatrix .....	45
2.7.2	Ergebnisse .....	45
2.8	Kurzer vs halb-unendlich langer Tunnel.....	47
2.8.1	Methodik.....	47
2.8.2	Simulationsmatrix .....	47
2.8.3	Ergebnisse .....	47
3	1D-Strömungssimulation.....	50
3.1	Methodik.....	50
3.1.1	Grundgleichungen .....	50
3.1.2	Lösungsmethode und Implementierung.....	52
3.1.3	Validierung .....	53
3.1.4	Zug – Tunnel Setup .....	53
3.2	Kurzer Tunnel (1 km) – Variation von Querschnittsfläche und Geschwindigkeit.....	56
3.2.1	Simulationsmatrix .....	56

3.2.2	Ergebnisse .....	56
3.3	Kurzer Tunnel (1 km) – Variation der Tunnelrauigkeit .....	61
3.3.1	Simulationsmatrix .....	61
3.3.2	Ergebnisse .....	61
3.4	Abklingvorgang im kurzen Tunnel unter Einfluss der Rauigkeit.....	64
3.5	Langer Tunnel 1 (10 km).....	66
3.5.1	Simulationsmatrix .....	66
3.6	Langer Tunnel 2 (35 km).....	68
3.6.1	Simulationsmatrix .....	68
4	STRUKTURDYNAMISCHE BERECHUNGEN .....	72
4.1	Methodik & Modell .....	72
4.1.1	Festgelegte Methode.....	72
4.1.2	Geometrie und Randbedingungen.....	73
4.2	FE- Modellierung .....	73
4.3	Ergebnisse .....	75
	.....	79
5	Versuchstechnische Validierung .....	82
5.1	Übersicht über die durchgeführten Arbeiten.....	82
5.2	Versuchsanlage und -aufbau .....	82
5.2.1	Tunnelsimulationsanlage Göttingen (TSG) .....	82
5.2.2	Verwendete Zugmodelle .....	83
5.2.3	Tunnelmodelle und -anbauten .....	86
5.2.4	Messtechnik.....	90
5.2.5	Messprogramm und Datenverarbeitung.....	91
5.2.6	Erweitertes Messprogramm: Rauigkeitselemente im Tunnelboden.....	92
5.3	Auswertung der Referenzmessungen .....	94
5.4	Untersuchung der verschiedenen Querschlagskonfigurationen und Tübbinge.....	100

5.5	Einfluss von Rauigkeitselementen auf den Druckverlauf.....	107
6	BEWERTUNG .....	112
6.1	Aerodynamische Bewertung der Maßnahmen .....	112
6.1.1	Druckverlauf im Modelltunnel.....	112
6.1.2	Vergleich der Tunnelquerschnittsfläche .....	114
6.1.3	Vergleich der Querschlagskonfigurationen .....	121
6.1.4	Zusammenfassung und Bewertung .....	129
6.2	Detailbetrachtung „Tunnel Notausgangstür“ .....	131
6.2.1	Lebensdauer Berechnung.....	131
6.2.2	Exemplarische Kostenabschätzung der baulichen Maßnahmen .....	143
6.2.3	Beispielhafte Vergleichsbewertung unterschiedlicher Lebensdauerszenarien: 146	
6.3	Empfohlene weiterführende Untersuchungen/ Forschungsarbeiten .....	149
7	Literaturverzeichnis.....	150
8	Anhang.....	152
8.1	CFD-Berechnung: Validierung der CFD mit TSG .....	152
8.2	CFD-Berechnung: Variation exzentrische Gleislage .....	155
8.3	CFD-Berechnung: Variation von Tunnelquerschnittsfläche (global) und Zuggeschwindigkeit.....	157
8.4	CFD-Berechnung: Variation der Geometrie des Querschlaganschlusses .....	159
8.5	CFD-Berechnung: Tunnelaufweitung (38 →44 → 38 m <sup>2</sup> ).....	160
8.6	CFD-Berechnung: Kurzer vs halb-unendlich langer Tunnel .....	161
8.7	CFD-Berechnung: Drucksignatur im glatten Tunnel.....	165
8.8	CFD-Berechnung: Drucksignatur der Querschlagsvariationen.....	167
8.9	TSG-Versuche.....	169

# Optimierung der Tunnelaerodynamik für Hochgeschwindigkeitsstrecken **OPTUNAMIK**

## 1 ERGEBNISBERICHT AP1 Adaptionparameter

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2014)

**AutorInnen:**

**Mag. Helmut KÜHNELT**

**Michael RUDOLPH**

**Dr. Daniela HEINE**

**Dr. Alois VORWAGNER**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

## 1.1 DEFINITION DER EXPERIMENTELLEN UND NUMERISCHEN UNTERSUCHUNGEN

Im Rahmen der Untersuchungen wurden folgende Maßnahmen untersucht:

**Lokale Maßnahmen:** umfassen lokale Variation der Anschlüsse von Querschlägen, lokale Tunnelaufweitungen.

**Globale Maßnahmen:** waren die Variation der Tunnelquerschnittsflächen, Gleislage, Variation der Oberflächenrauigkeit, Zugmodelle sowie periodische Änderung von Querschnittsflächen.

Die Untersuchungen erfolgen mit Strömungsmechanischen Analysen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) sowie Validierung der Ergebnisse an der Tunnelsimulationsanlage in Göttingen (TSG).

Die Lebensdauerbewertung erfolgte am Detail einer Tunneltüre, wofür ebenfalls Berechnungsdetails und Zugkollektive festgelegt werden mussten. Die Adaptionparameter sind nachfolgend im Detail als Katalog beschrieben.

### 1.1.1 Tunnelquerschnittsflächen für Modellversuch und CFD- Berechnung

Die **Modellversuche** im TSG werden im Maßstab 1:25 durchgeführt. Es wurden zwei Tunnelquerschnitte definiert, die vorhandene Tunnelröhre mit einer realen Querschnittsfläche von 0.0704 m<sup>2</sup> (äquivalent 44 m<sup>2</sup>) und einer Reallänge 10 m (äquivalent 250 m), sowie eine neue anzufertigende Tunnelröhre mit einer realen Querschnittsfläche von 0.0608 m<sup>2</sup> (äquivalent 38 m<sup>2</sup>) und einer Reallänge von 14 m (äquivalent 350 m), siehe Abbildung 1. Im 38 m<sup>2</sup> Tunnel war geplant, dass der Zug versetzt von der Mittelachse fahren sollte. Allerdings wurde diese Idee fallen gelassen, da dies zu einer Komplizierung der Unterkonstruktion und zu Undichtigkeit des Modelltunnels geführt hätte. Ebenso wurde eine optionale Verkleinerung des 44 m<sup>2</sup> Tunnel durch Einlageplatten nicht durchgeführt, da der Schwerpunkt auf die Erreichung einer Maximalgeschwindigkeit von 230 km/h gelegt wurde.

Für die **CFD-Berechnungen** wurden Tunnelquerschnittsflächen zwischen 38 m<sup>2</sup> und 62 m<sup>2</sup> definiert, siehe Abbildung 2. Der Zug fährt im Allgemeinen mittig, ein Vergleichsfall wird mit Versatz gerechnet. Die Detailbeschreibung ist in Ergebnisbericht AP 2 dargestellt. Die unterschiedlichen Querschnittsgeometrien sind entsprechend Ihrer Maßstäbe in Tabelle 1 dargestellt.

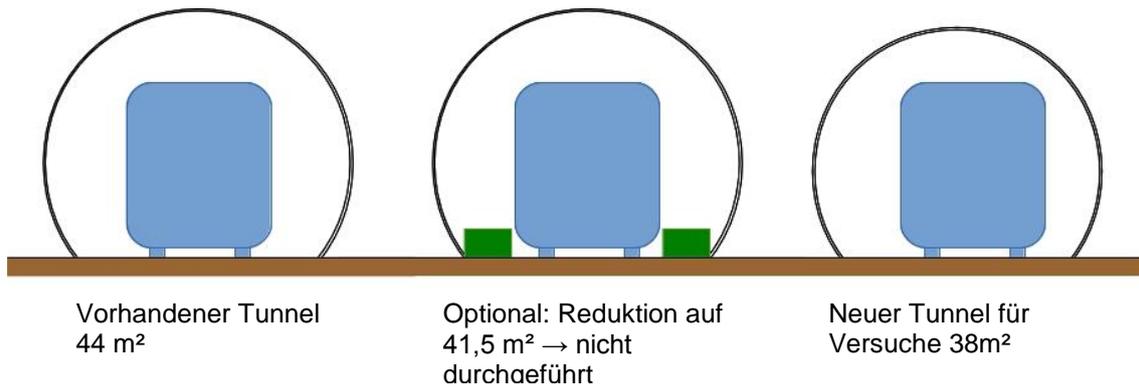


Abbildung 1: Tunnelquerschnitte für den TSG-Versuch

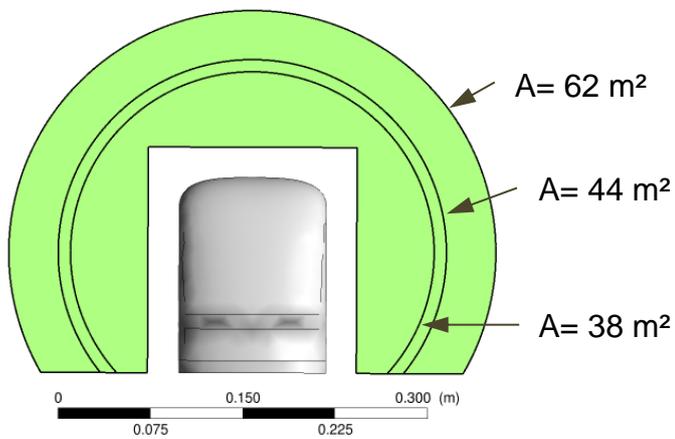


Abbildung 2: Tunnelquerschnitte für die CFD-Berechnungen

Tabelle 1: Übersicht über Tunnelgeometrien für CFD-Berechnungen

<b>Querschnittsfläche 1:1</b>	<b>resultierender Radius 1:1</b>	<b>resultierender Radius 1:25</b>
<b>[m<sup>2</sup>]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>
<b>38</b>	3680	147,2
<b>42</b>	3913	156,5
<b>44</b>	4025	161
<b>50</b>	4350	174
<b>55</b>	4610	184,4
<b>62</b>	4955	198,2

### 1.1.2 Querschlagsanschlüsse bei Notausgangstüren

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Querschlagsanschlüsse der Notausgangstüren variiert und deren Einfluss auf die Aerodynamik erhoben. Dazu wurde basierend auf den zur Verfügung gestellten Planzeichnungen "NHS-Fluchstollen.pdf", "K\_DA\_AF02\_155TU\_10\_2866\_E\_0\_V04\_20140319.pdf" und "NHS-Regelquerschnitt Bahnsteig.pdf" Modellparameter für den Basis Querschlagsanschluß abgeleitet. Es wurden die in den drei Zeichnungen unterschiedliche Bemaßungen der Querschlagsanschlüsse ausgewertet, siehe Tabelle 2 und ein Grundmaß von 6 m x 3 m x 3 m für die Breite, Tiefe und Höhe des Querschlags abgeleitet. In Abbildung 4 sind verschiedene Möglichkeiten von Variationen dargestellt wovon drei ausgewählt wurden, siehe Abbildung 5 und Tabelle 3. Die Oberkante der Querschlagsöffnung ist waagrecht. Visualisierung der drei Varianten des Querschlagsanschlusses siehe Abbildung 5.



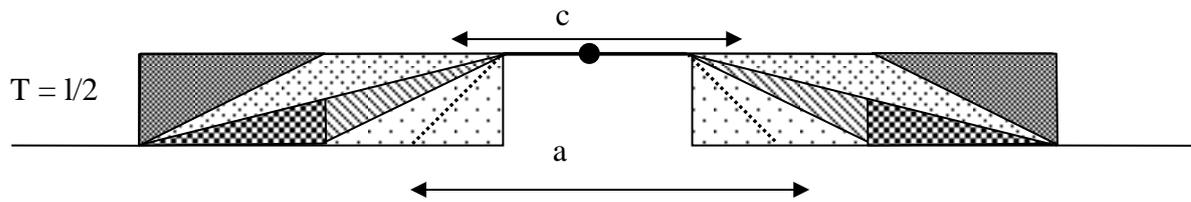


Abbildung 4: Möglichkeiten der Querschnittsveränderung im Bereich des Querschlagsanschlusses

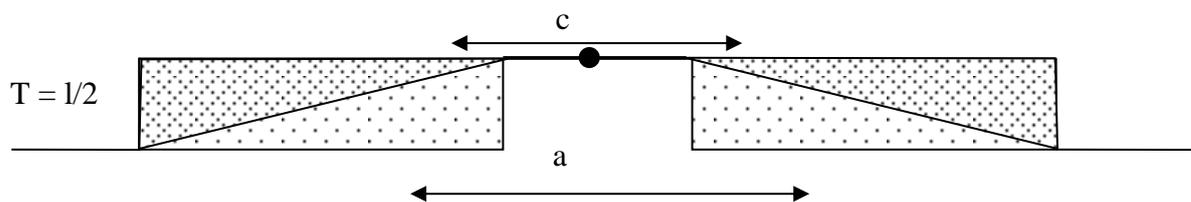


Abbildung 5: Ausgewählte Querschnittsveränderungen im Bereich des Querschlagsanschlusses

Tabelle 3: Bemaßungen der Querschlagsanschlüsse

Bezeichnung	Basiswinkel	a	c	T	Fläche	Volumen
kleiner Querschlag	90°	l	l	l/2	$l^2/2$	$l^3/4$
großer Querschlag	90°	$L = 5l$	$L = 5l$	l/2	$5l^2/2$	$5l^3/4$
schräger Querschlag	14.5°	5l	l	l/2	$3l^2/2$	$3l^3/4$

In Abbildung 6 sind die verschiedenen Querschlagsanschlüsse welche in den weiteren Untersuchungen verwendet wurden dargestellt. Die Variation der Querschlagsanschlüsse wurde am 38m<sup>2</sup> Tunnel im Versuch und in der Simulation untersucht.

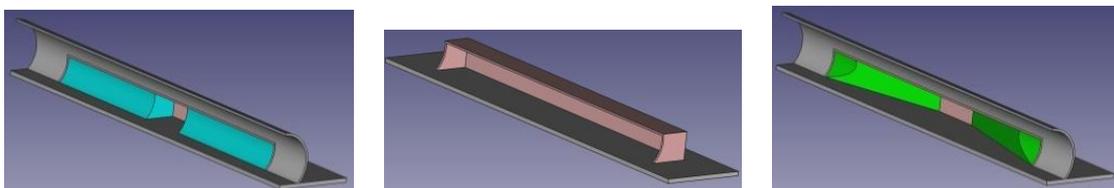


Abbildung 6: Visualisierung der ausgewählten Querschlagsanschlüsse: kleiner Querschlag (links), großer Querschlag (Mitte), schräger Querschlag (rechts)

### 1.1.3 Zugmodelle für Versuch und Berechnungen

Für die Versuche stand ein vorhandenes ICE3-Modell (folgend nur ICE) zur Verfügung, welches aufgrund seines Eigengewichts eine Maximalgeschwindigkeit von 200 km/h erreicht. Dies wurde im Rahmen der Versuche getestet. Darüberhinaus wurde beschlossen ein vereinfachtes Fahrzeugmodell des ÖBB Railjets (folgend nur RJ) zu entwickeln, das im TSG-Versuch möglichst eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 230 km/h zu optimieren.

Im Modellversuch werden die Drucksignaturen von Railjet und ICE3 in den 38m<sup>2</sup> und 44 m<sup>2</sup> Tunneln ohne Querschlag für Geschwindigkeiten von 160 km/h, 200 km/h und 230 km/h (nur Railjet) aufgenommen, wobei für den ICE3 im 44 m<sup>2</sup> Tunnel bereits Messdaten vorhanden sind. Die Variation der Querschläge sowie sämtliche CFD-Berechnungen werden nur mit dem Railjet-Modell betrachtet.

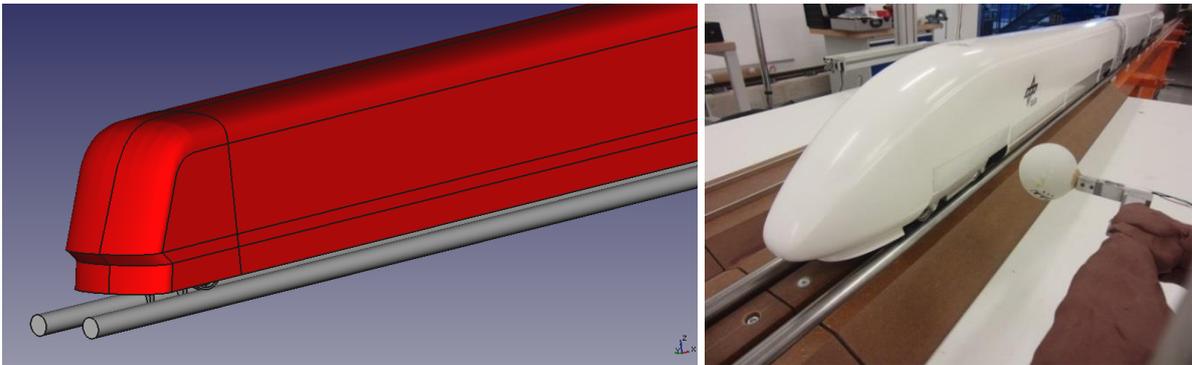


Abbildung 7: Zugmodelle: Railjet (links), ICE3 (rechts)

### 1.1.4 Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenrauigkeit ist im Modellversuch durch das Material der Tunnelröhre vorgegeben und wird nicht verändert. Die CFD-Berechnungen werden mit glatter Tunnelwand durchgeführt. In den 1D Berechnungen werden empirische Werte angenommen sowie lokale Erhöhungen der Rauigkeit betrachtet. (Siehe 1D-Strömungssimulation (AP2))

### 1.1.5 Periodische Veränderungen des Tunneldurchmesser

Es wurde diskutiert, eine periodische Aufweitung und Verengung des Tunnelquerschnitts mittels 1D Simulation zu analysieren, der sich durch Verwendung von Tübbing mit

unterschiedlichem Innendurchmesser ergeben würde, z. B. alle 12 m eine Durchmesseränderung um 40 cm, was einer Flächenänderung von 38 m<sup>2</sup> auf ca. 42 m<sup>2</sup> entsprechen würde. Allerdings zeigten erste 1D-Berechnungen, dass dadurch die Drucksignatur im Tunnel aufgrund von Reflexionen der Druckwelle an jedem Querschnittsprung starke Rippel aufweisen würde. Daher wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

### 1.1.6 *Tunneltür und Zugkollektiv*

Eine Aussage betreffend Auswirkung der Drucksignatur auf Ausbauteile und deren Einfluss auf die Lebensdauer auf Basis der Druckwelle allein ist unzureichend, da bei dynamischen Lasten strukturdynamische Eigenschaften einen essentiellen Einfluss auf die auftretende Belastung haben können. Aus diesem Grund wird exemplarisch die Lebensdauer einer Notausgangstür im Bereich der Tunnelquerschläge mittels strukturdynamischen Einfluss betrachtet. Erfahrungsgemäß kommt es vor allem im Scharnier- und Schlossbereich zu vorzeitiger Materialermüdung. Um die Erhebung der Auswirkungen von Zugsvorbeifahrten auf Tunnelausrüstungsgegenstände genauer untersuchen zu können wurden am Beispiel „Notausgangstür am Querschlag“. Detailuntersuchungen durchgeführt. Dafür wurde in Abstimmung mit ÖBB den Vertretern eine generische Schiebetür definiert, welche folgende Parameter umfasst:

- Abmessungen: Breite = 2,2 m; Höhe = 2,3 m
- Tür Masse 650 kg
- Variabler Elastizitätsmodul der Dämmung
- Haltepunkte oben und unten jeweils je 3 Befestigungen
- Die Lebensdaueranalyse erfolgt exemplarisch für ein Zugkollektiv

Die Skizzen der technische Spezifikationen des Türsystems ist in Abbildung 8 ersichtlich. Die Festlegung einer generischen Tür erfolgte, da das exakte Türmodell nicht bekannt war und um die Berechnungen Herstellerunabhängig durchzuführen. Daraus folgt jedoch, dass Aussagen nur relativ und nicht absolut getroffen werden können. Für das Befestigungsdetail wurde festgelegt nur den Fall einer funktionierenden Befestigung ohne Spiel zu behandeln.

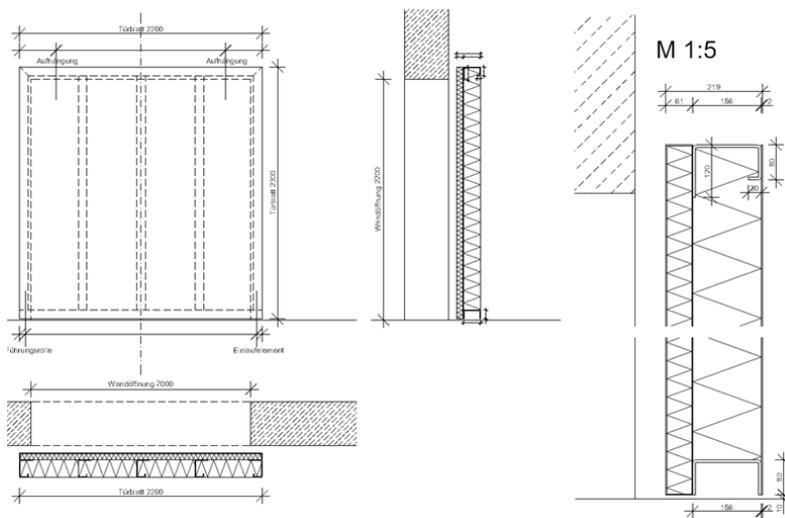


Abbildung 8: Exemplarische generische Tunneltür

### Definition Zugkollektiv:

Für die exemplarische Lebensdauerbewertung wird eine Schadensakkumulation der errechneten Spannungsverläufe nach der Hypothese von Palmgren-Miner an Ort einer Befestigung durchgeführt. Da die genaue Ausführung der Befestigung aufgrund der generisch definierten Tür unbekannt ist, wird hier ein fiktives Spannungsniveau angenommen um darauf basierend relative Aussagen bei unterschiedlichen Auslastungen zu treffen. Genauer hierzu findet sich in Abschnitt 6.2, Detailbetrachtung „Tunnel Notausgangstür“, dieses Berichtes. Für die Bewertung im Hinblick auf Lebensdauer ist eine Festlegung des auftretenden Zugkollektivs erforderlich und wurde wie folgt definiert:

- o Fall 1: 100 Züge pro Tag und Richtung (90 Railjet/ 10 ICE) max.  $V = 230$  km/h,
- o Fall 2: 50 Züge pro Tag (45 Railjet/ 5 ICE) max.  $V = 230$  km/h

### 1.1.7 Durchgeführte CFD-Simulationen

Die Simulationen wurden sowohl in 3D als auch in 1D durchgeführt, wobei für die 1D Berechnungen eigens ein Solver entwickelt wurde.

In der 3D-Simulation wurden die TSG-Versuche mit dem RJ-Modell nachgebildet und für weitere Tunnelquerschnittsflächen bis  $62 \text{ m}^2$  erweitert, sowie verschiedene Gleislagen und Turbulenzen im Notausgangsbereich untersucht.

Mittels des 1D-Solvers wurden lange Tunnel (1, 10 und 35 km) simuliert, wobei Querschnittsfläche und Zugsgeschwindigkeit variiert wurden, sowie der Effekt von lokaler Erhöhung der Rauigkeit der Tunnelwand untersucht wurde.

# Optimierung der Tunnelaerodynamik für Hochgeschwindigkeitsstrecken OPTUNAMIK

## 2 ERGEBNISBERICHT AP2 Numerische Strömungsberechnungen der Adaptierungen der Tunnelbauwerke

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2014)

**AutorInnen:**

**Mag. Helmut KÜHNELT**  
**Michael RUDOLPH**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
ÖBB-Infrastruktur AG  
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

AIT Austrian Institute of Technology GmbH  
DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

## 2 3D-STRÖMUNGSSIMULATION

Die Simulationen erweitern das Spektrum der Tunnelquerschnitte, Randparameter und Geschwindigkeiten ohne aufwändigen Bau bzw. Anpassung eines Prototyps. Die komplexe Geometrie von Tunnel und Zug erforderte eine dreidimensionale Betrachtung.

### 2.1 Methodik

Die numerische Simulation des Tunnelmodells erfolgt mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamik, CFD). Hierfür wird das kommerzielle Programm *FLUENT* (Version 16.5) von Ansys Inc. genutzt. FLUENT ist Bestandteil der ANSYS® Workbench, welche Programme für alle notwendigen Arbeitsschritte beinhaltet.

#### 2.1.1 Verfahren (CFD, kompressibel, Sliding Mesh)

Die CFD stellt als finites Volumenverfahren eine Methodik dar, in welcher die Erhaltungsgleichungen im Kontrollvolumen iterativ berechnet werden. Das Kontrollvolumen umfasst den Luftraum der betrachteten Geometrie und wird in Gitterzellen zerlegt.

In jeder Zelle werden in jedem Berechnungsschritt Erhaltungsgleichungen gelöst:

- Massenerhaltung
- Impulserhaltung
- Energieerhaltung
- Zustandsgleichung

Als Turbulenzmodell findet das  $k-\omega$ -SST-Modell Anwendung. Die Luft wird als ideales, kompressibles Gas angenommen.

Die Aufgabestellung eines gleichförmig, linear bewegten Zugs durch das Kontrollvolumen erfordert eine zeitabhängige, instationäre Rechnung. Aufgrund der Zugbewegung ändert sich die Geometrie in jedem Zeitschritt entsprechend. Die Bewegung ist durch ein Sliding Mesh realisiert: Hierbei ist ein Teil des Modells mit der Kontur des Zugs längsbeweglich gegenüber der ortsfesten Tunnelgeometrie (Abbildung 9).

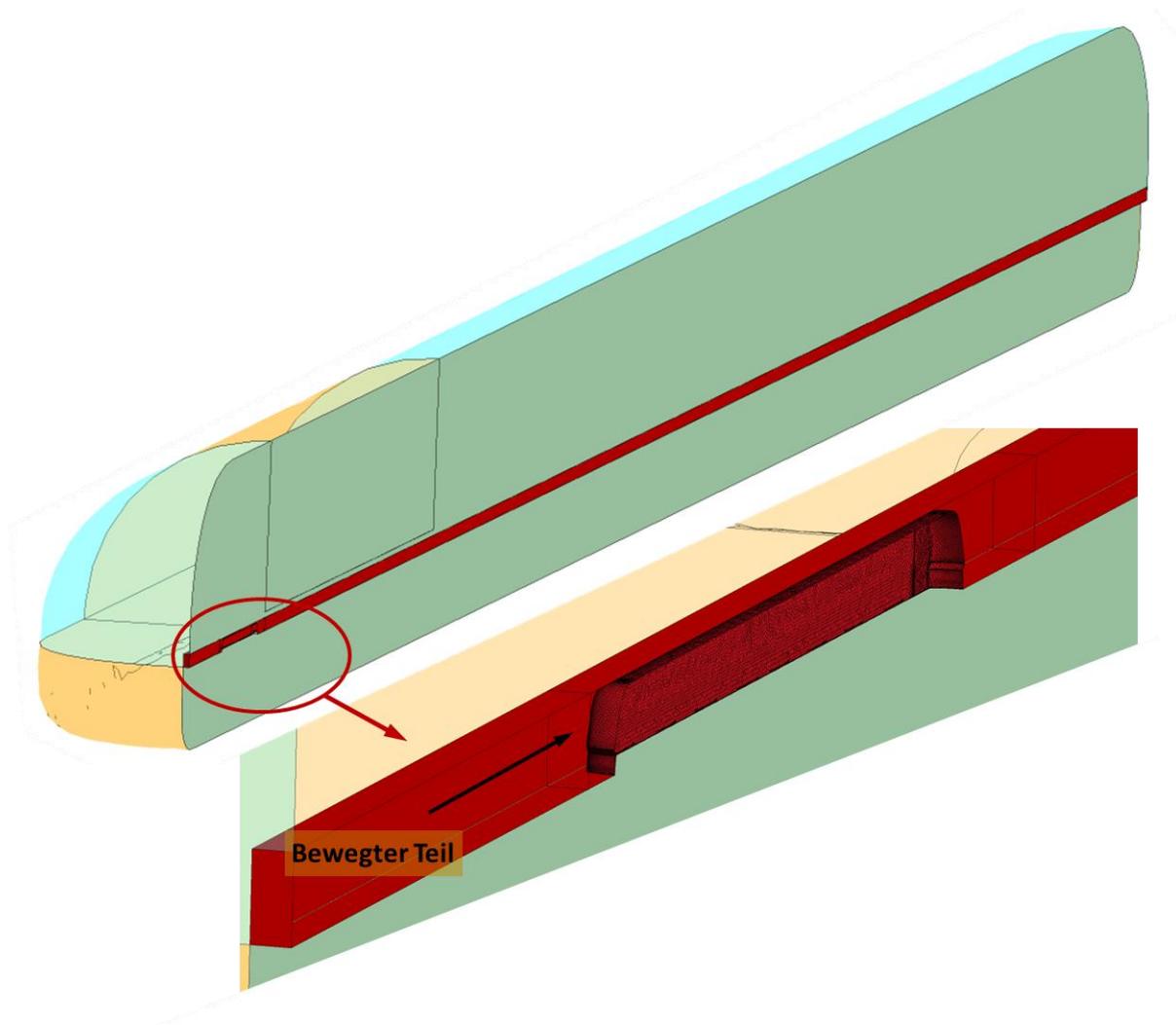


Abbildung 9: CFD-Modell, *Sliding Mesh* mit Außenkontur des Zugs zur Nachbildung der Zugbewegung

### 2.1.2 Geometrie Tunnel & Zug, Skalierung

Die Geometrie ist vom Versuchsaufbau am TSG abgeleitet. Tunnel und RJ-Modell sind im Maßstab 1:25 aufgebaut. Die Geschwindigkeit entspricht den Originalgeschwindigkeiten.

Die errechneten Druckwerte sind direkt übernehmbar. Die Zeitskala ist mit dem Faktor 25 zu multiplizieren, um auf die tatsächliche Größe zu errechnen.

Für das Projekt Zur Validierung der Methode wurden zwei grundlegende Setups des TSG-Versuchs modelliert:

1. Tunnel mit 44 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche, Länge 10 m (Abbildung 10):
  - Vergleich mit vorhandenem TSG-Tunnel
  - Eignung der CFD nachweisen bzw. Parameter anpassen
  - Lange Ausfahrzone, um Abklingverhalten zu beurteilen
  - Fehler gegenüber der Ansatz mit minimaler Umgebung abschätzen

2. Tunnel mit 38 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche, Länge 14 m (Abbildung 11):
  - Basisgeometrie für Geometrische Veränderungen
  - Geometrie der Tunnelröhre entspricht neu aufgebauten Modell für die TSG
  - Kleines Kontrollvolumen durch Minimierung des externen Luftraums außerhalb der Tunnelröhre → Rechennetz klein halten → Rechendauer minimieren

Ergänzend wird eine weitere Konstellation ohne Ausfahrzone betrachtet:

3. Tunnel mit 38 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche, unendlich lang (Abbildung 12)
  - basierend auf Version 2 mit dort durchgeführten geometrische Änderungen
  - Grenzbetrachtung ohne Reflexion am Tunnelende ins Kontrollvolumen
  - Reflexionen nur an Querschnittsprüngen innerhalb des Kontrollvolumens

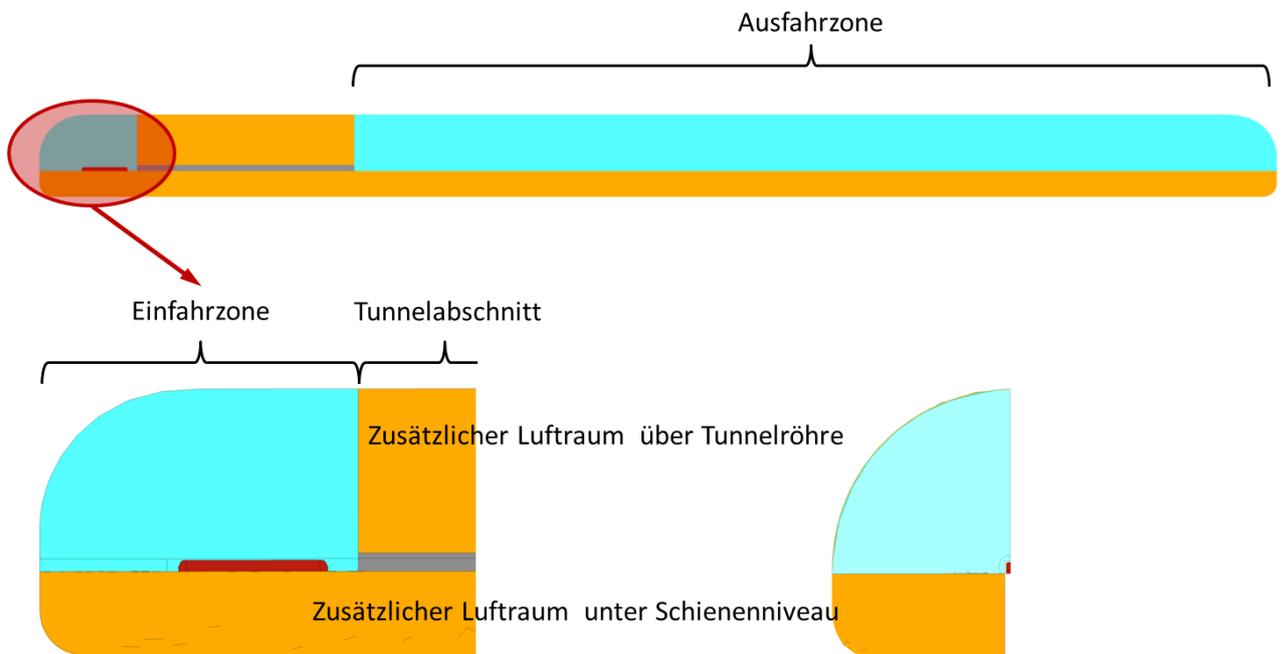


Abbildung 10: 3D-Simulationsmodell entsprechend TSG-Anlage mit großen Lufträumen über dem Tunnel und unterhalb des Gleisniveaus

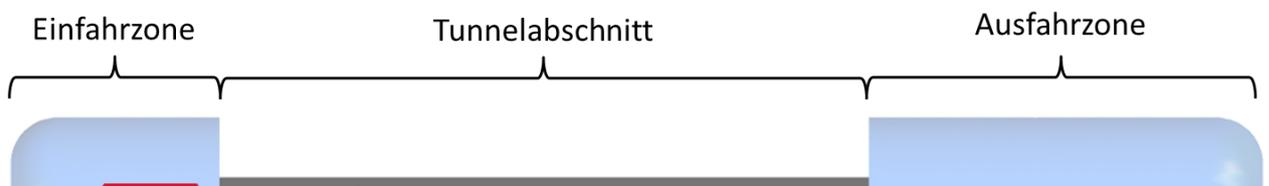


Abbildung 11: Schematischer Aufbau des 3D-Simulationsmodells für die Geometrieadaptationen

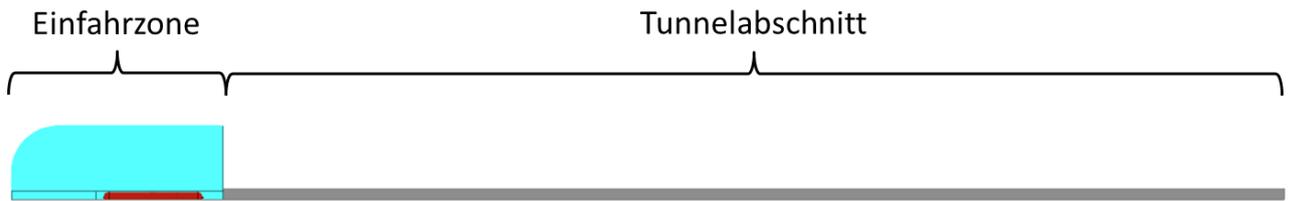


Abbildung 12: Schematischer Aufbau des 3D-Simulationsmodells des unendlich langen Tunnels

### 2.1.3 Geometrie Zug, Skalierung

Die Geometrie des Zuges basiert auf dem CAD-Modell des in der TSG verwendeten vereinfachten RailJet-Modells im Maßstab 1:25. Das Modell ist geschlossen ohne Aussparungen im Bodenbereich für Fahrzeugträger und Fahrwerk. Eine weitere Vereinfachung des CFD-Modells ist das Schließen des vorhandenen Luftspalts (Höhe: 10 mm) zwischen Fahrzeugboden und Tunnelboden/Schienen (Abbildung 13).

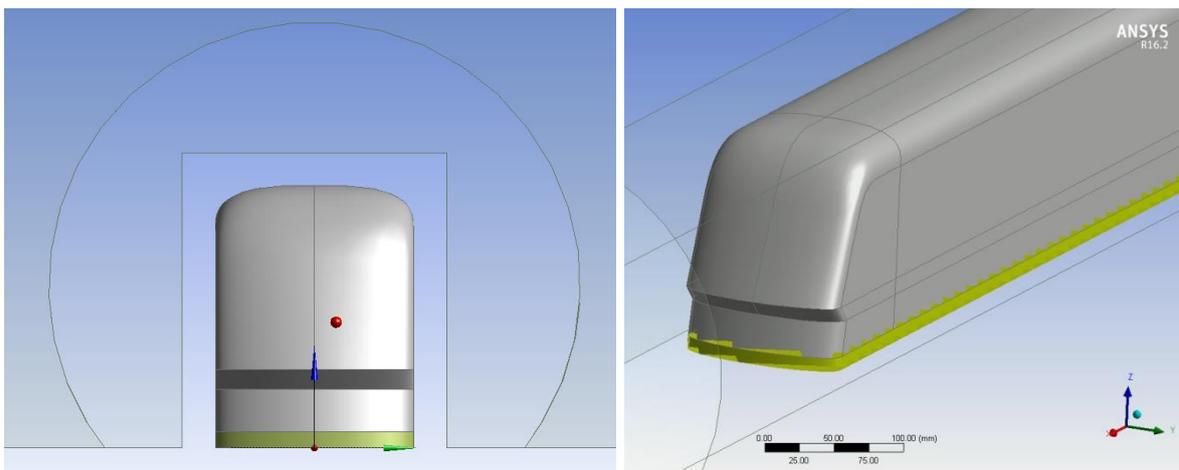


Abbildung 13: Zugmodell RJ für Strömungssimulation mit geschlossenem Luftspalt zwischen Fahrzeugboden und Tunnelboden/Schienenkante

Durch die beschriebene Vereinfachung vergrößert sich die projizierte Stirnfläche des RJ-Modells sich um 1.200 mm<sup>2</sup> (Maßstab 1:1: 0,75 m<sup>2</sup>). Durch dieselbe Maßnahme wird die Wandfläche von Zug und Tunnelwand um ~ 466.400 mm<sup>2</sup> (Maßstab 1:1: ~ 290 m<sup>2</sup>) reduziert. Aufgrund der größeren Fläche ist tendenziell mit einem erhöhten Druckanstieg  $\Delta p/\Delta t$  und Maximalwert der initialen Einfahrwelle zu rechnen. Die reduzierte Oberfläche von Zug und Tunnel wird die Reibungseinflüsse im Ringspalt zwischen Zugoberfläche und Tunnelwand verringern.

### 2.1.4 Netz: Auflösung, Randschichten

Der Luftraum des Kontrollvolumens wird in ein Rechennetz zerteilt. Zur besseren Abbildung der Haftbedingung an Wänden werden die Randschichten höher aufgelöst. Die sonstigen Bereiche sind zellsparend mit Polyederzellen aufgelöst (Abbildung 14).

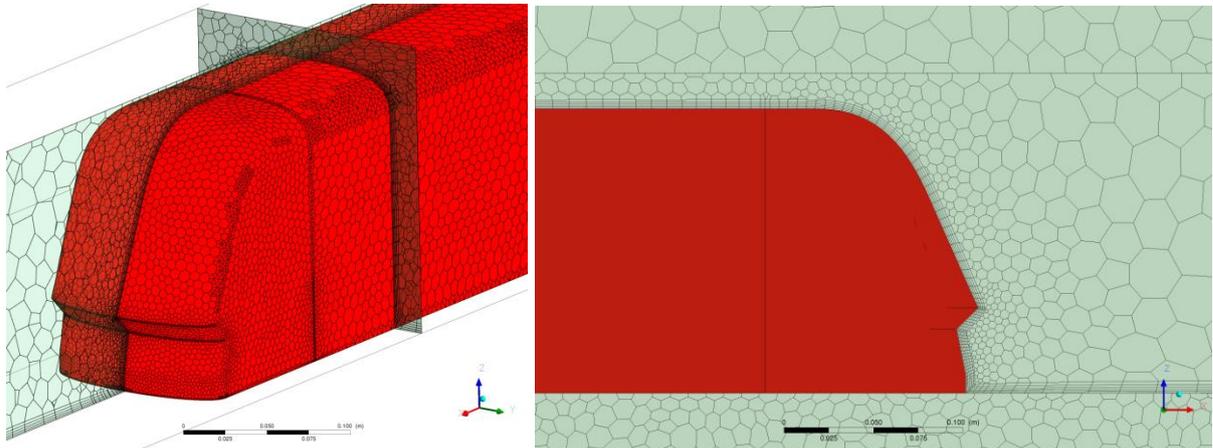


Abbildung 14: CFD-Modell, Netzauflösung an der Oberfläche des Zugs, Randschichten an der Zugwand

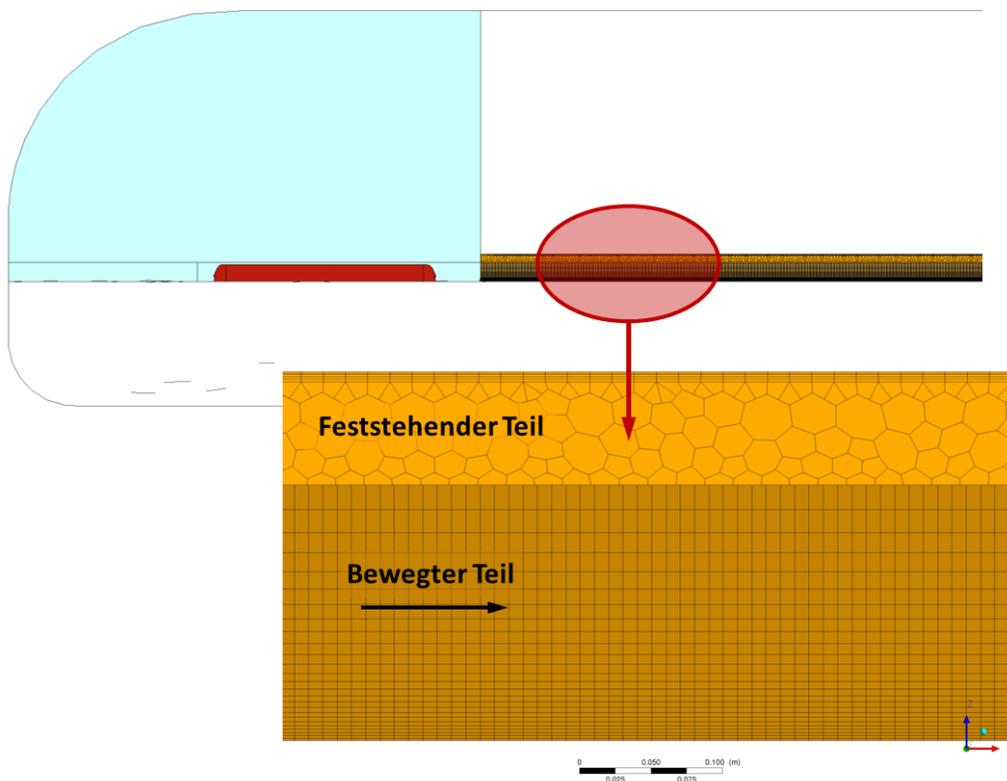


Abbildung 15: CFD-Modell, Netzauflösung innerhalb des Tunnels

Teile des bewegten Gitters sind aus regelmäßigen Hexaedern gebildet. Aufgrund der Randbedingungen ist in diesen Bereichen keine automatische Bildung feiner aufgelöster Randschichten möglich. Über manuelle Einstellungen ist die Gitterauflösung in Bodennähe in vergleichbarer Weise erhöht (Abbildung 15).

### 2.1.5 Zeitschrittweite, CFL

Die Zeitschrittweite bestimmt im Wesentlichen die Berechnungszeit. In Abhängigkeit der simulierten Geschwindigkeit und Länge der möglichen Fahrstrecke beträgt im Fall des 1:25-Modells die berechnete Realzeit 0.323 sec (14 m Tunnel, 250 km/h) bis 0.82 sec (10 m Tunnel, modifizierte Ausfahrstrecke, 230 km/h). In Abhängigkeit der Clusterkapazität beträgt die Berechnungszeit zwei bis sieben Tage.

Die Größen Netzauflösung (= Zellgröße  $\Delta x$ ), Relativgeschwindigkeit  $u$  und Zeitschrittweite  $\Delta t$  je Rechenschritt sind über die Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl (CFL-Zahl  $CFL$ ) verknüpft.

$$CFL = \frac{u * \Delta t}{\Delta x}$$

Für den verwendeten impliziten Gleichungslöser ist eine CFL-Zahl von ungefähr 5 anzustreben. Mit den gewählten Einstellungen von Netzgröße und Zeitschrittweite beträgt die erreichte CFL-Zahl:  $CFL < 6$ . Die Ausbreitung von Druckwellen ohne erhöhte numerische Dämpfung ist gewährleistet, numerische Instabilitäten sind keine zu beobachten.

### 2.1.6 Randbedingungen

#### Beschaffenheit der Oberflächen

In der CFD-Simulation werden alle Oberflächen als starr und glatt modelliert. Es wird keine zusätzliche Oberflächenrauigkeit angenommen. Aufgrund der Haftbedingung bildet sich an den Oberflächen bei Strömung eine Grenzschicht aus (siehe Kap. 2.1.4).

#### Randbedingungen des Fluid

Für die Simulationen gelten die folgenden Randbedingungen:

- Temperatur: 300K
- Druck: 101325 Pa
- Gasmodell: Ideales Gas
- Dynamische Viskosität  $\eta$ :  $1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg / (m*s)}$

### 2.1.7 Steadystate (Freifeld) Simulation zur Initialisierung

Für Fluide gilt an der Oberfläche Haftbedingung, d.h. hat das Fluid dieselbe Geschwindigkeit wie benachbarte Wand. So baut sich an der Oberfläche eine Grenzschicht auf.

Ein fahrender Zug besitzt eine solche Grenzschicht. Auch das TSG-Modell baut diese Grenzschicht vor der Tunneleinfahrt auf. Zur Minimierung der Rechenzeit ist die Länge der Einfahrzone des CFD-Modells auf ein Minimum reduziert. Die verbleibende Wegstrecke reicht nicht für den Aufbau der Grenzschicht. Die Grenzschicht muss deshalb künstlich erzeugt werden.

Hierzu wird zuerst in einer stationären Berechnung die Relativbewegung umgekehrt und die initiale Grenzschicht wie folgt errechnet: ein stehendes *Fahrzeug wird mit definierter Relativgeschwindigkeit umströmt*, Abbildung 16 weshalb sich ohne Bewegung des Gitternetzes der Rechenaufwand drastisch reduziert und trotzdem eine initialen Grenzschicht erzeugt werden kann (Abbildung 17). Das sich einstellende Strömungsfeld um den Zug wird als Anfangsbedingung für die darauffolgenden instationären Simulationen gesetzt.

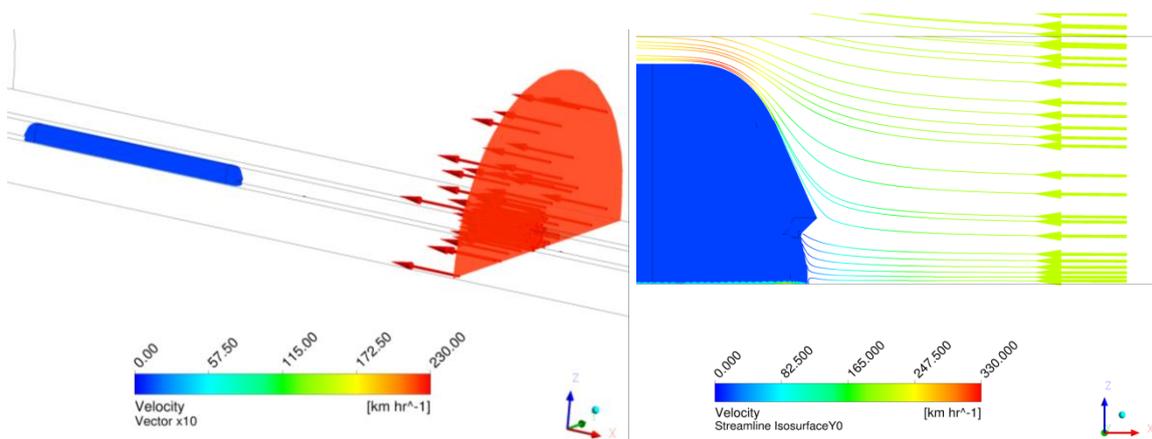


Abbildung 16: Berechnung der initialen Grenzschicht um die RJ-Geometrie, Strömungsfeld (links) und Umströmung des RJ-Kopfbereichs (rechts)

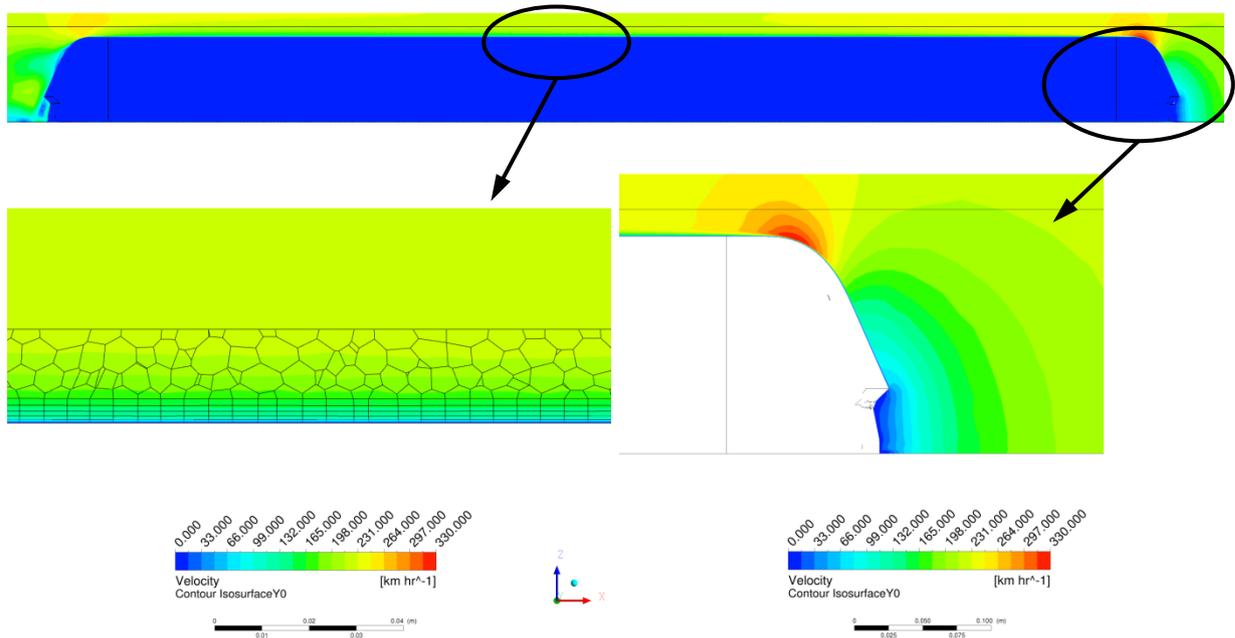


Abbildung 17: initiale Grenzschicht um ruhende RJ-Kontur: Haftbedingung an RJ-Wänden

### 2.1.8 Darstellung des Druckverlaufs im Tunnel

Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse sowie die Validierung der CFD-Rechnungen mit den TSG-Versuchen dargestellt.

Die grafische Auswertung und spätere Bewertung erfolgt auf Basis des Drucks innerhalb des Tunnels. Zweckmäßig sind hierfür zwei Darstellungen. In Abbildung 18 wird der Druck unmittelbar an der Tunnelwand orts- und zeitabhängig aufgetragen. Dies erlaubt qualitativen Gesamtüberblick über der Verteilung des Drucks, die Überlagerung von Druckwellen und deren Reflexionen sowie die Drucksenke im Ringspalt zwischen bewegten Zug und Tunnelwand.

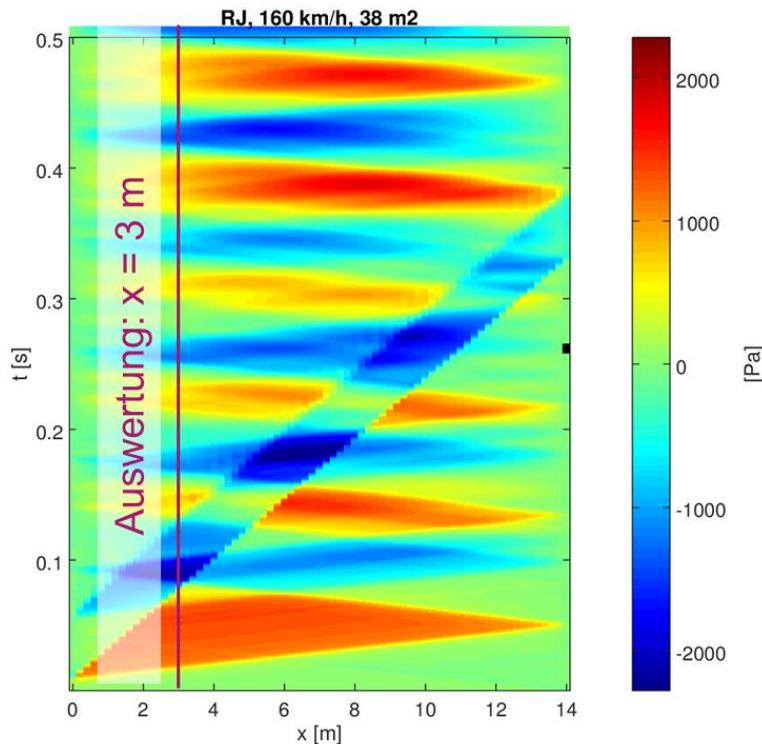


Abbildung 18: Druckverteilung innerhalb der Tunnelröhre bei Zuggeschwindigkeit von 230 km/h

In Vorbetrachtungen hat sich für die ursprünglich betrachteten Geschwindigkeiten  $v = 160/200/230$  km/h die Position drei Meter nach Einfahrt als geeigneter Messpunkt herausgestellt:

- vorlaufende Kompressionswelle der Kopfeinfahrt ohne Überlagerung mit Reflexion
  - etwa gleichzeitige Druckabsenkung durch
    - Expansionswelle der Heckeinfahrtwelle
    - Drucksenke im Ringspalt zwischen bewegtem Zug und Tunnelwand
    - Reflektierte Kopfwelle als Expansionswelle
- ⇒ Ort mit besonders hoher Druckdifferenz in kurzer Zeit für alle Geschwindigkeiten

Der grundsätzliche Druckverlauf während der Zugein- und -vorbeifahrt bei ortsfester Messstelle ist in Abbildung 19 und Abbildung 20 mit den korrespondierenden Ereignissen dargestellt.

Die Kopfeinfahrtwelle und deren Reflexionen (Ereignisse 1 und 6) sind zeitlich nahezu unabhängig von der Zuggeschwindigkeit. Die Länge bzw. zeitliche Lage der übrigen Ereignisse ist abhängig von der Geschwindigkeit. Geringere Geschwindigkeiten verschieben die Ereignisse zu späteren Zeitpunkten, so dass die Ereignisse 3 und 5 sich mit der reflektierten Kopfeinfahrtwelle (6) überlagern.

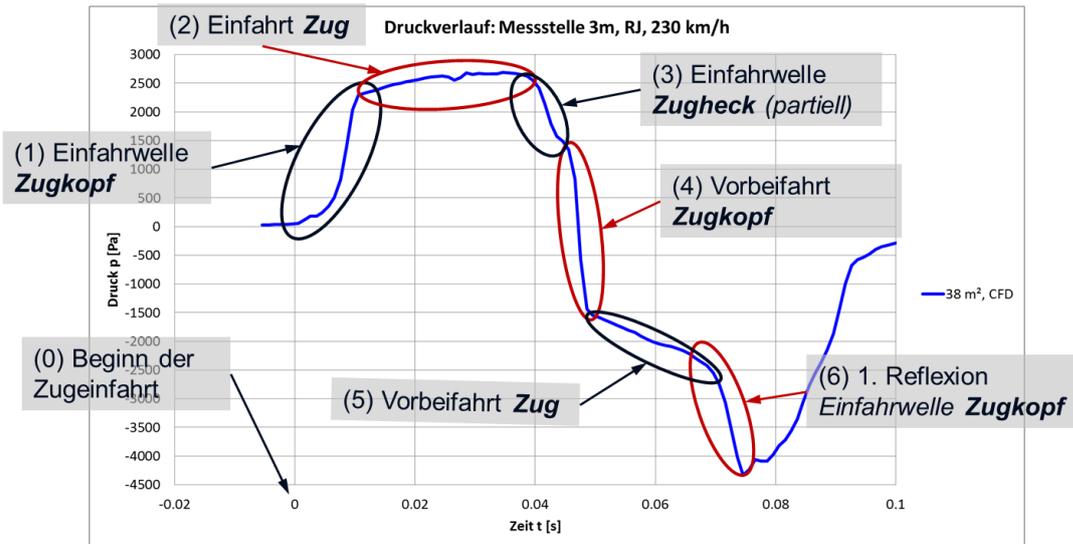


Abbildung 19: zeitlicher Druckverlauf an ortsfester Messstelle 3 Meter nach Tunneleinfahrt ( $x = 3$  m)

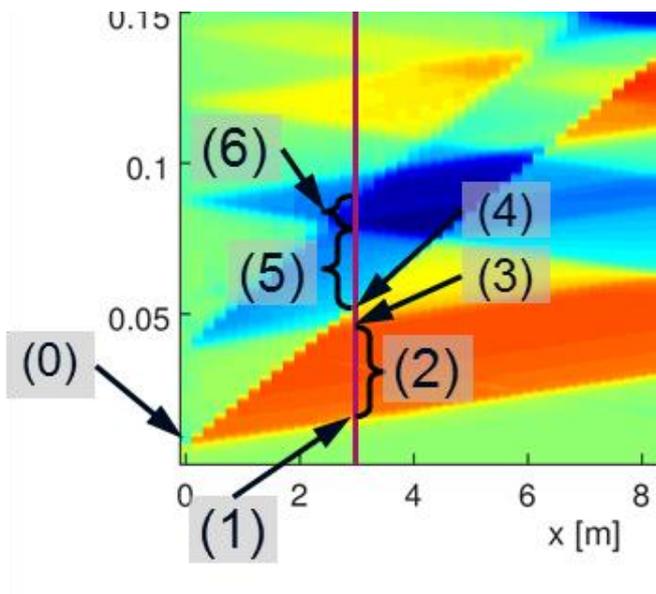


Abbildung 20: Druckverteilung innerhalb der Tunnelröhre während der Zugein- und –vorbeifahrt an der Messstelle

Für höhere Geschwindigkeiten ist die Messstelle  $x = 3$  m nicht mehr als Maße der maximalen Druckdifferenz anwendbar. Abbildung 21 zeigt eine beispielhafte Druckverteilung eines 250 km/h schnellen Zugs. Die größten Druckunterschiede sind an einer Messstelle  $\approx 5$  m nach Tunneleingang zu erwarten.

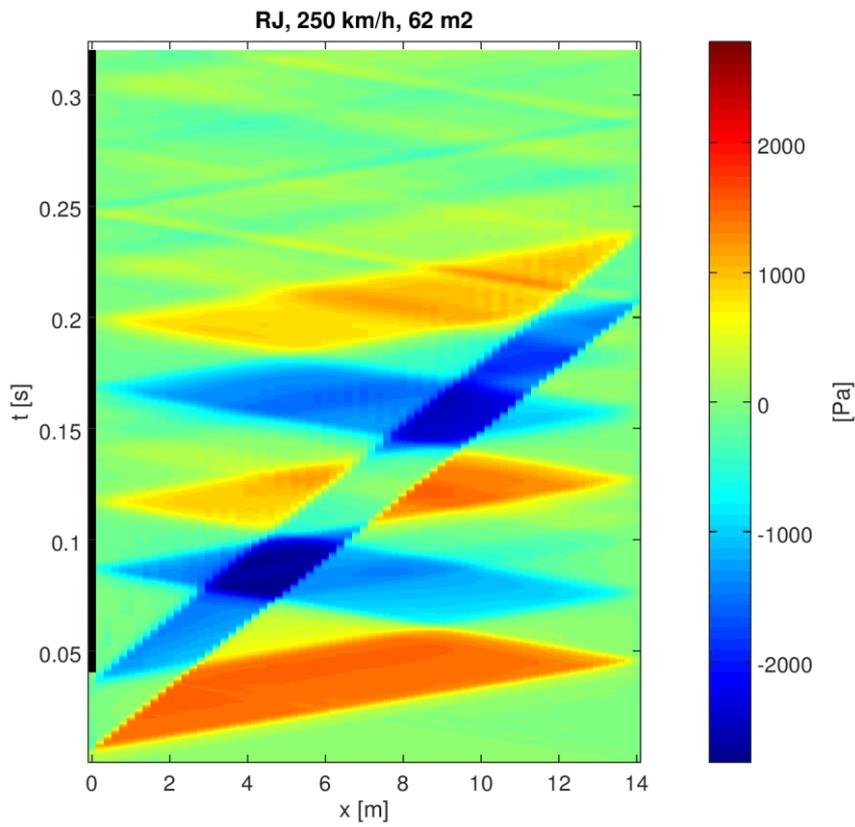


Abbildung 21: Druckverteilung innerhalb der Tunnelröhre bei Zuggeschwindigkeit von 250 km/h

## 2.2 Grundsätzliche Eignung der CFD-Methodik im Vergleich zum Versuch (TSG)

Für die Validierung des CFD-Modells im Maßstab 1:25 stehen für einen konstant durchgehenden Querschnitt seitens TSG zwei Konfigurationen entsprechend Abschnitt 2.1.2 zur Verfügung.

### 2.2.1 Simulationsmatrix

Tabelle 4: Matrix zum grundlegenden Vergleich von CFD-Simulation und Messung (TSG)

Tunnel	Zugtyp	Massstab	Tunnellänge [m]		Reflexion	Geschwindigkeit [km/h]		
			Modell	Real		160	200	230
38 m <sup>2</sup>	RJ	1:25	14	350	JA			
44 m <sup>2</sup>	RJ	1:25	10	250	JA			

In der Simulationsmatrix wurden Querschnittsflächen sowie Tunnellängen und unterschiedliche Geschwindigkeiten des RJ modelliert. In der Berechnung wurden auch die Reflexionen an den Portalen berücksichtigt.

Weitere Vergleiche zwischen Simulations- und Messergebnissen für ausgewählte Geometrien sind später an der entsprechenden Geometrievariante aufgeführt.

### 2.2.2 Ergebnisse

Für den TSG-Tunnel mit 44 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche ist der Druckverlauf an der Messstelle für einen Zeitraum von 0.8 Sekunden in Abbildung 22 im Vergleich CFD (Simulation) – TSG (Messung) dargestellt. Insbesondere für die Einfahrt ( $t < 0.04$  s, Details siehe Abbildung 24) weisen beiden Druckverläufe eine gute Übereinstimmung im zeitlichen Verlauf und des Druckniveaus auf. Nach der Zugvorbeifahrt ( $t > 0.08$  s) ist ein leichter zeitlicher Versatz der Wellen feststellbar. Das TSG-Modell weist eine etwas höhere Dämpfung bzw. geringfügig unterschiedliche Schallgeschwindigkeit für die im Tunnel laufenden Wellen auf.

Zweiter markanter Punkt ist die Ausfahrwelle bei  $t \approx 0.19$  Sekunden. Beide Modelle zeigen die zur selben Zeit. Die Ausfahrwelle wird somit in beiden Modellen mit vergleichbarer Schallgeschwindigkeit im Tunnel geleitet. Ebenso ist die Doppelspitze aufgrund der Überlagerung mit mehrfachen Reflexionen bestehender Wellen in beiden Modellen zu erkennen. Die Drucküberhöhung durch die Ausfahrwellen ist im TSG-Versuch etwas geringer als in der CFD-Simulation.

Ähnliche Aussagen lassen sich aus Abbildung 23 für die Druckverläufe beim 38 m<sup>2</sup> großen Tunnel ableiten.

In beiden Querschnitten ist der Unterschied im Abklingverhalten sehr deutlich. Die Druckwellen klingen im TSG-Versuch wesentlich stärker ab als in der CFD-Simulation. Das deutlich größere Kontrollvolumen für den 44 m<sup>2</sup> großen Tunnel mit Luftvolumen oberhalb der Tunnelröhre und unterhalb der Gleisebene lässt in dem Punkt keine größere Genauigkeit gegenüber dem Ansatz mit kleinem Kontrollvolumen und minimiertem Volumen der Tunnelumgebung erkennen. Daher wird in den weiteren Simulationen der Ansatz einen kleinen Kontrollvolumens zur Reduzierung der Rechenzeit eingesetzt.

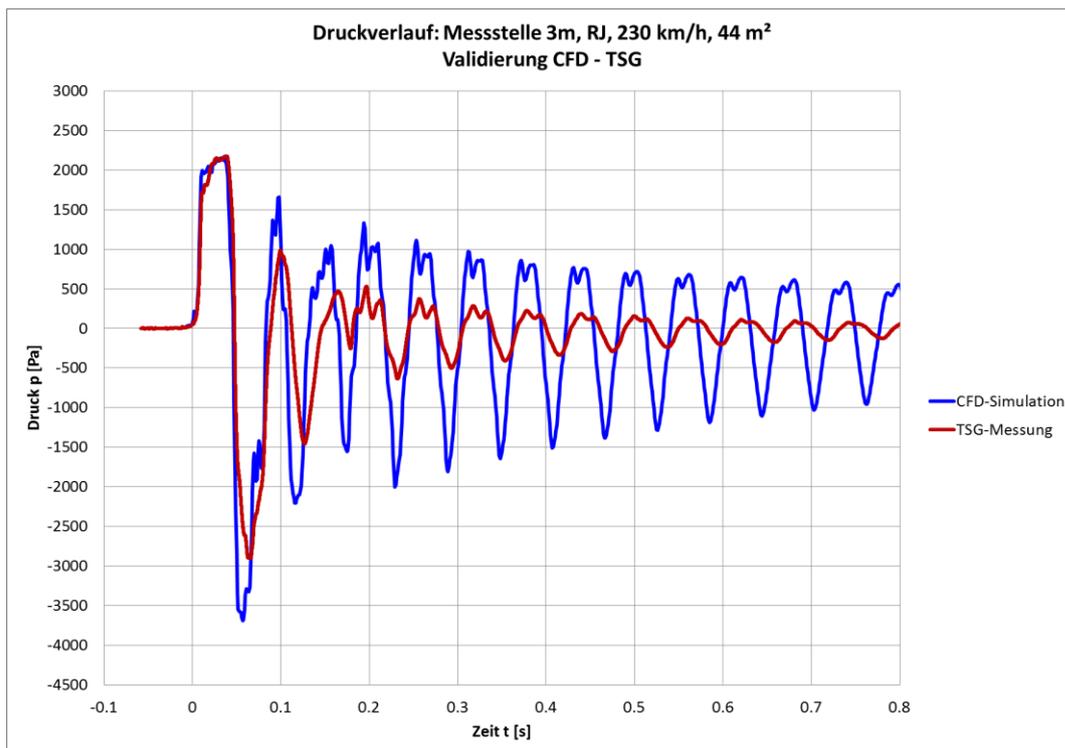


Abbildung 22: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Vergleich CFD-Simulation mit TSG-Messungen für Konfiguration 44 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche, 250 m Tunnellänge & 230 km/h

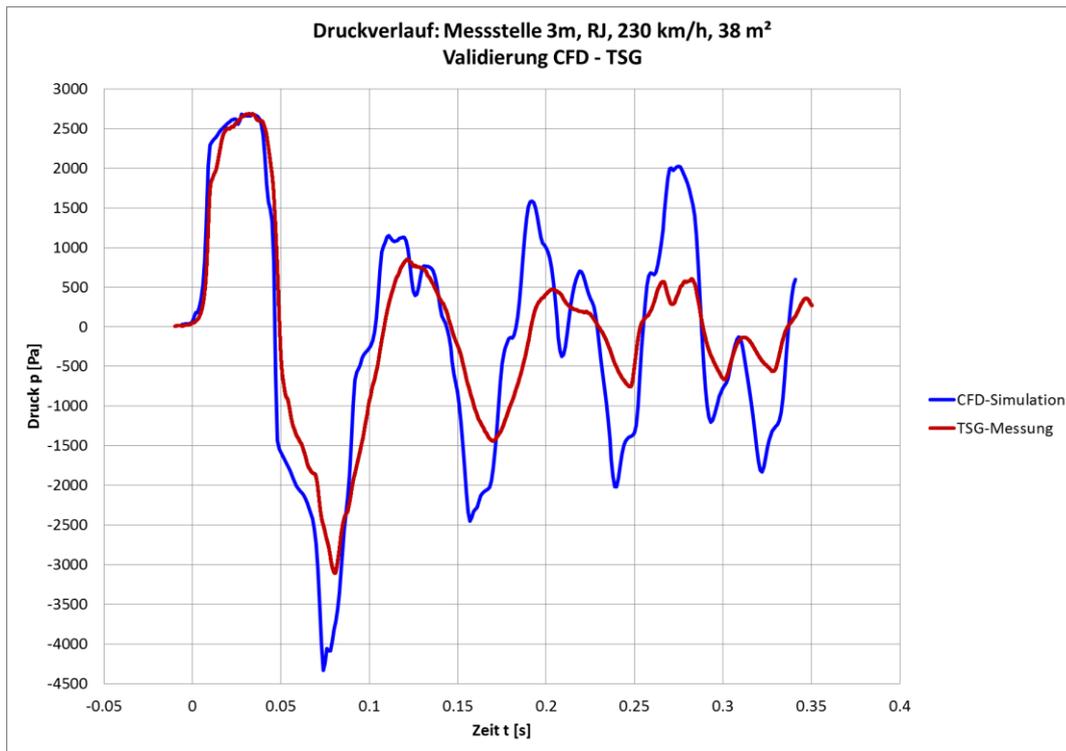


Abbildung 23: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Vergleich CFD-Simulation mit TSG-Messungen für Konfiguration 38 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche, 350 m Tunnellänge & 230 km/h

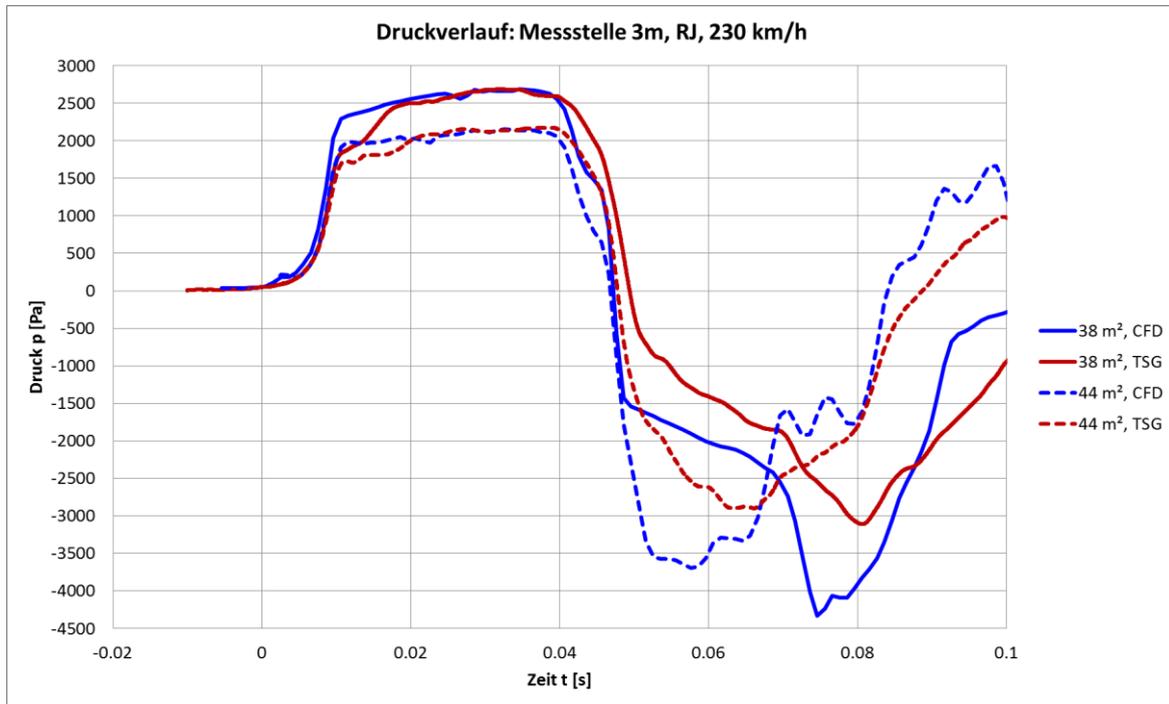


Abbildung 24: Druckverlauf an Messstelle  $x = 3$  m, Einfahrt und erste Reflexion

Abbildung 24 zeigt die leicht abweichenden Druckverläufe während der Einfahrt im Detail.

Der erste Anstieg ( $t \leq 0.01$  s), verursacht durch Einfahrt des Zugkopfs, stimmt zeitlich sehr gut überein. Die etwas größere Fläche des CFD-Modells (siehe Abschnitt 2.1.3) bewirkt einen etwas größeren Drucksprung:

$$\text{CFD: } \Delta p \approx 2000 \text{ Pa (44 m}^2\text{)} / \approx 2300 \text{ Pa (38 m}^2\text{)}$$

$$\text{TSG: } \Delta p \approx 1700 \text{ Pa (44 m}^2\text{)} / \approx 2000 \text{ Pa (38 m}^2\text{)}$$

Die glattere Oberfläche des CFD-Modell gegenüber dem TSG-Modell kompensiert dies in der Einfahrphase durch eine geringeren reibungsbedingten Anstieg (Zeitraum  $0.01 < t < 0.04$  s). Der Maximaldruck beiden Modellen beträgt zum Ende der Einfahrt  $p_{\max} = 2150 \text{ Pa (44 m}^2\text{)} / 2690 \text{ Pa (38 m}^2\text{)}$ . Die Vereinfachungen im CFD-Modell führen somit zu keiner signifikanten Druckabweichung gegenüber der Messung.

Der erste Druckabfall (siehe 2.1.8) zeigt für beide Tunnelquerschnitte, dass für alle drei Expansionsereignisse (Abbildung 19, Ereignisse 3, 4 und 6) die Simulation höhere Druckabfälle berechnet. Im Ergebnis beträgt der Minimaldruck:

$$\text{CFD: } p_{\min} \approx -3700 \text{ Pa (44 m}^2\text{)} / \approx -4300 \text{ Pa (38 m}^2\text{)}$$

$$\text{TSG: } p_{\min} \approx -2900 \text{ Pa (44 m}^2\text{)} / \approx -3100 \text{ Pa (38 m}^2\text{)}$$

Bei geringen Geschwindigkeiten (200 km/h: Abbildung 25, 160 km/h: Abbildung 26) ist die zeitliche Abweichung der reflektierten Wellen und die Abweichung bedingt durch Abklingverhalten geringer.

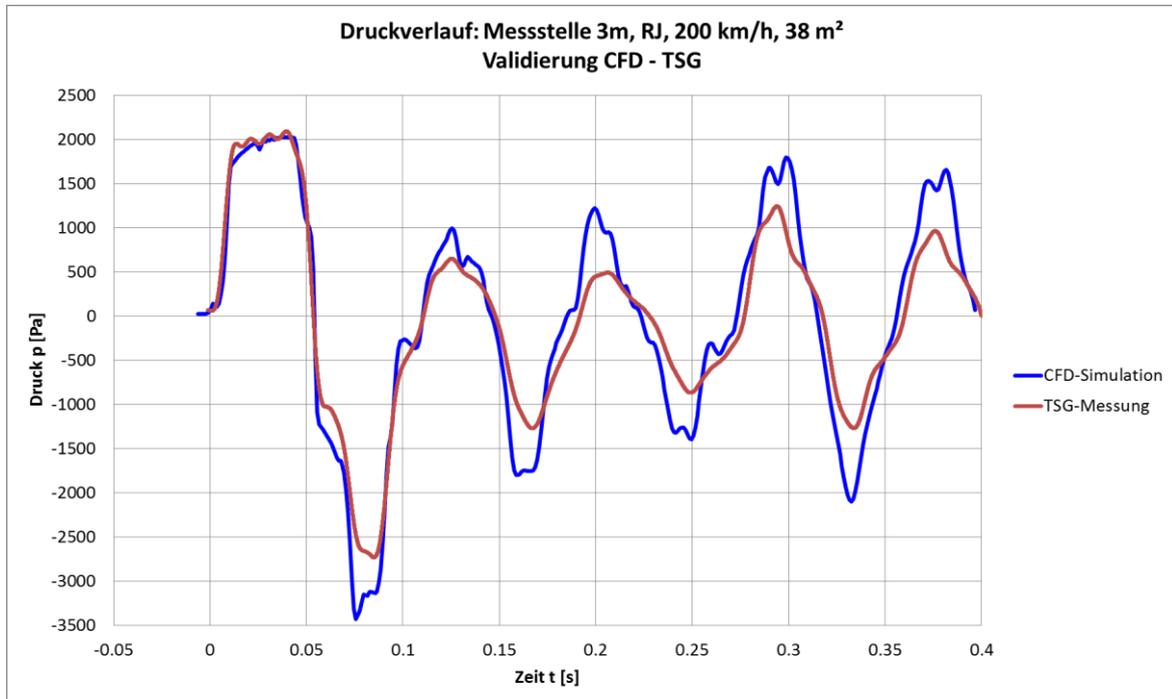


Abbildung 25: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Vergleich CFD-Simulation mit TSG-Messungen für Konfiguration 38 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche, 350 m Tunnellänge & 200 km/h

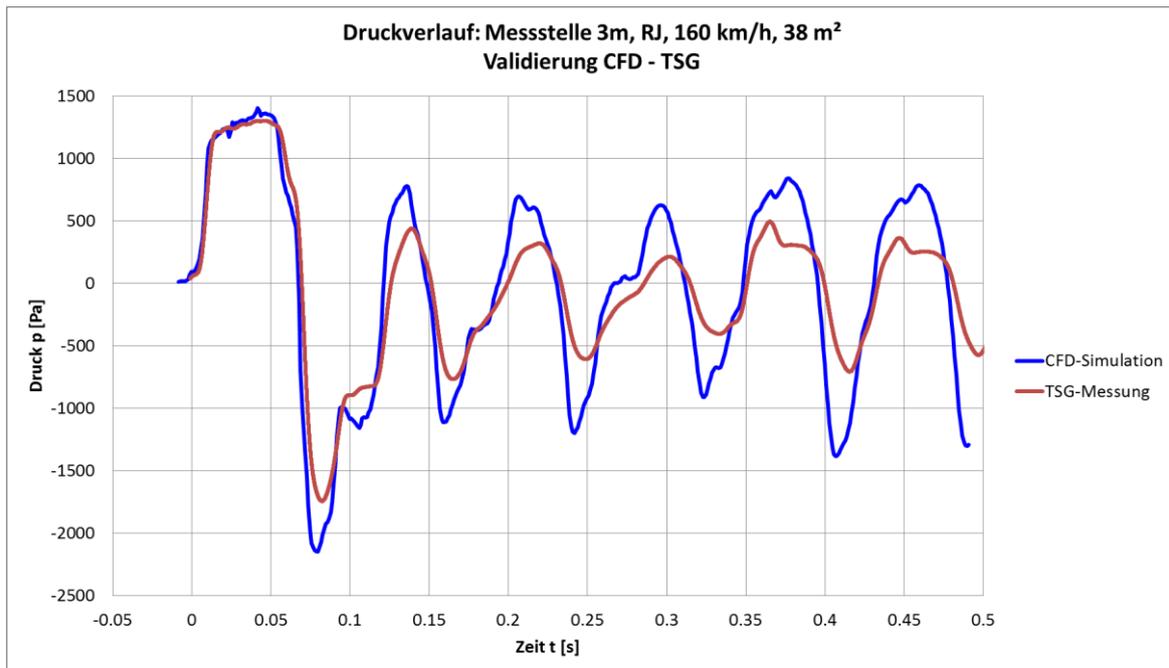


Abbildung 26: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunnelleinfahrt; Vergleich CFD-Simulation mit TSG-Messungen für Konfiguration 38 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche, 350 m Tunnellänge & 160 km/h

### 2.2.3 Zusammenfassung

Der Vergleich zwischen gemessenem Druckverlauf der TSG mit dem simulierten Druckverlauf lässt für die Einfahrtswelle eine sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmung erkennen. Anstieg und Druckniveau des ersten Maximums sind nahezu deckungsgleich.

Unterschiede im Druckniveau zeigen sich vor allem, sobald es zu einer Überlagerung von laufenden Wellen kommt. Es ist zu erkennen, dass die Simulation mit dem Eintreffen der Expansionswelle an der Messstelle höhere Druckwerte ermittelt. Darüber hinaus zeigen die Messungen ein schnelleres Abklingen der Druckwellen.

#### Unterschiede zwischen TSG-Versuch und CFD-Simulation

Im Gegensatz zur CFD-Simulation, in der die Tunnelwand vollkommen starr ist, wird das im TSG-Versuch für die Tunnelröhre eingesetzte Material durch die laufenden Druckwellen verformt. Dies hat erhöhte Dämpfung und leicht reduzierte Schallgeschwindigkeit zur Folge. Dies hat eine geänderten Phasenlage laufender Wellen zur Folge, was wiederum bei deren Überlagerung die sich ergebende Druckamplituden maßgeblich beeinflusst.

Weitere Faktoren führen vor allem zu unterschiedlichen Verlusten im Tunnel:

- Unterschiedliches Reflexions- und Abstrahlungsverhalten an den Tunnelportale (aufgrund geometrischer Unterschiede)
- Reibungseffekte an Tunnelwand und Fahrzeug
- Strömungsablösung am Fahrwerk des Zugs (kein Bodenspalt bei CFD)
- Abnahme der Zugsgeschwindigkeit im Versuch

Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kopfeinfahrwelle** im Tunnel (d.h. für die erste laufende Stoßwelle bis zur ersten Reflexion) ist in Abbildung 27 für die CFD-Simulation und den TSG-Versuch ausgewertet dargestellt. Dafür wurde der Zeitpunkt des Auftretens des Maximums des Druckgradienten an den Messstellen ausgewertet.

In der CFD-Simulation liegen bis auf eine Ausnahme alle Datenpunkte innerhalb von  $\pm 1\%$  der Schallgeschwindigkeit von 347.20 m/s bei einer Temperatur von 300 K. Der Mittelwert der Datenpunkte beträgt 347.88 m/s.

Im TSG-Versuch liegt die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kopfeinfahrwelle bei 347.80 m/s, die Datenpunkte liegen innerhalb von weniger als  $\pm 1\%$  um diesen Mittelwert.

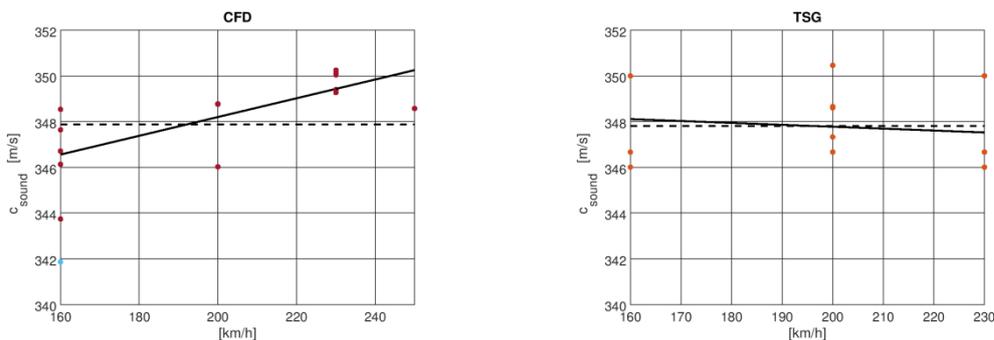


Abbildung 27: Vergleich der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kopfeinfahrwelle im Modelltunnel: gestrichelt: Mittelwert der Ausbreitungsgeschwindigkeit über Zuggeschwindigkeit, durchgezogen: Ausbreitungsgeschwindigkeit als lineare Funktion der Zuggeschwindigkeit. Links: CFD für querschlagslose (= glattwandig) Tunnel mit Querschnittsflächen von 38-62 m<sup>2</sup>. Rechts: TSG-Versuch für die verschiedenen Querschlagsvariationen im 38 m<sup>2</sup> Tunnel.

## 2.3 Variation exzentrische Gleislage

Im Eisenbahntunnel sind Gleis- und Tunnelachse exzentrisch. Im folgendem wird der Einfluss einer Exzentrizität von 300 mm (Maßstab 1:1) untersucht. Exemplarisch erfolgt ein Vergleich der Druckverläufe an der Messstelle  $x = 3$  m.

### 2.3.1 Simulationsmatrix

Tabelle 5: Matrix zur Ermittlung des Einflusses der Exzentrizität von Tunnel- und Gleisachse

Tunnel	Zugtyp	Massstab	Tunnellänge [m]		Reflexion	Geschwindigkeit [km/h]		
			Modell	Real		160	200	230
38 m <sup>2</sup>	RJ	1:25	14	350	Ja			

### 2.3.2 Ergebnisse

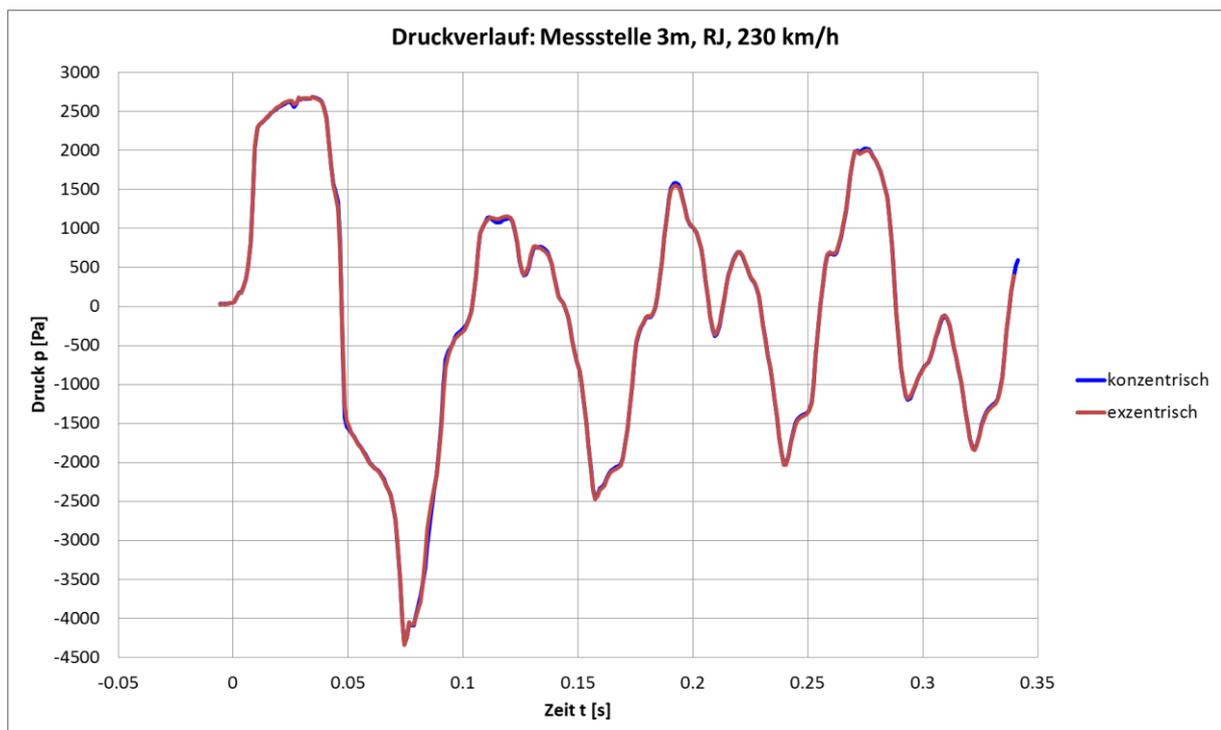


Abbildung 28: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunnelleinfahrt; Einfluss der Achsenlage bei 230 km/h

Der in Abbildung 28 dargestellte Druckverlauf bei einer Zuggeschwindigkeit von 230 km/h lässt keinen signifikanten Einfluss der Achsenlage auf Druckniveau und zeitlichen Verlauf erkennen. Daher wird in den Untersuchungen konzentrische Achsenlage angenommen.

## 2.4 Variation von Tunnelquerschnittsfläche (global) und Zuggeschwindigkeit

Die Untersuchung erfolgte an verschiedenen Tunnelgeometrien entsprechend Tabelle 1 mit konstantem Querschnitt über die gesamte Tunnellänge und variierten Geschwindigkeiten zwischen 160-250 km/h. Die durchgeführten Berechnungen sind in Tabelle 6 dargestellt.

### 2.4.1 Simulationsmatrix

Tabelle 6: Matrix der berechneten Tunnelgrößen und Zuggeschwindigkeiten

Tunnel	Zugtyp	Maßstab	Tunnellänge [m]		Reflexion	Geschwindigkeit [km/h]			
			Modell	Real		160	200	230	250
38 m <sup>2</sup>	RJ	1:25	14	350	ja				
					Nein				
42 m <sup>2</sup>	RJ	1:25	14	350	ja				
44 m <sup>2</sup>	RJ	1:25	14	350	ja				
50 m <sup>2</sup>	RJ	1:25	14	350	ja				
55 m <sup>2</sup>	RJ	1:25	14	350	ja				
					Nein				
62 m <sup>2</sup>	RJ	1:25	14	350	ja				

Abweichend von der Validierung (Abschnitt 2.2) haben alle Tunnel eine Länge von 14 m.

### 2.4.2 Ergebnisse

Die Auswertung erfolgt auf Basis des Druckverlaufs an der definierten Messstelle  $x = 3 \text{ Meter}$  nach Tunneleinfahrt. (Abbildung 29). Der Einfluss der Querschnittsfläche auf das Druckniveau ist deutlich sichtbar. Dies betrifft Kompressionswellen (Abbildung 30)- und Expansionswellen (Abbildung 31). In Abhängigkeit der betrachteten Basisfläche ist eine Reduktion der Beträge bis zu 50% möglich (Vergleich der Tunnelquerschnitte 38 m<sup>2</sup> und 62 m<sup>2</sup>).

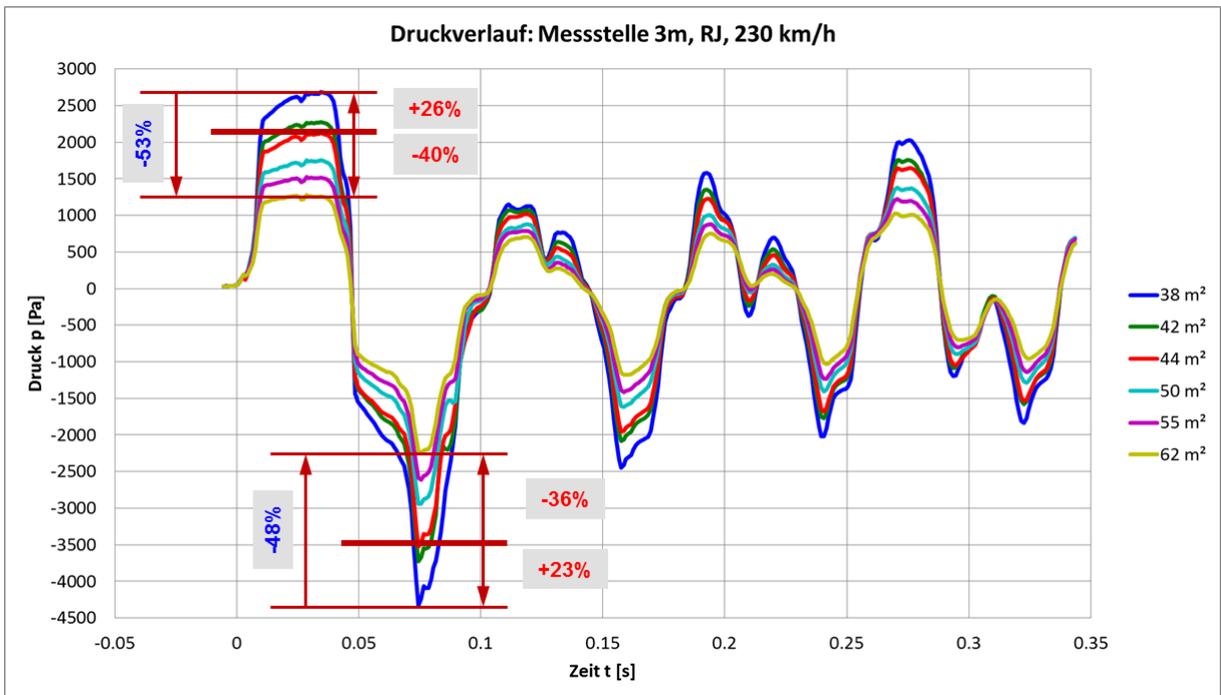


Abbildung 29: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss globale Tunnelquerschnittsfläche bei glatter Tunnelröhre, 230 km/h

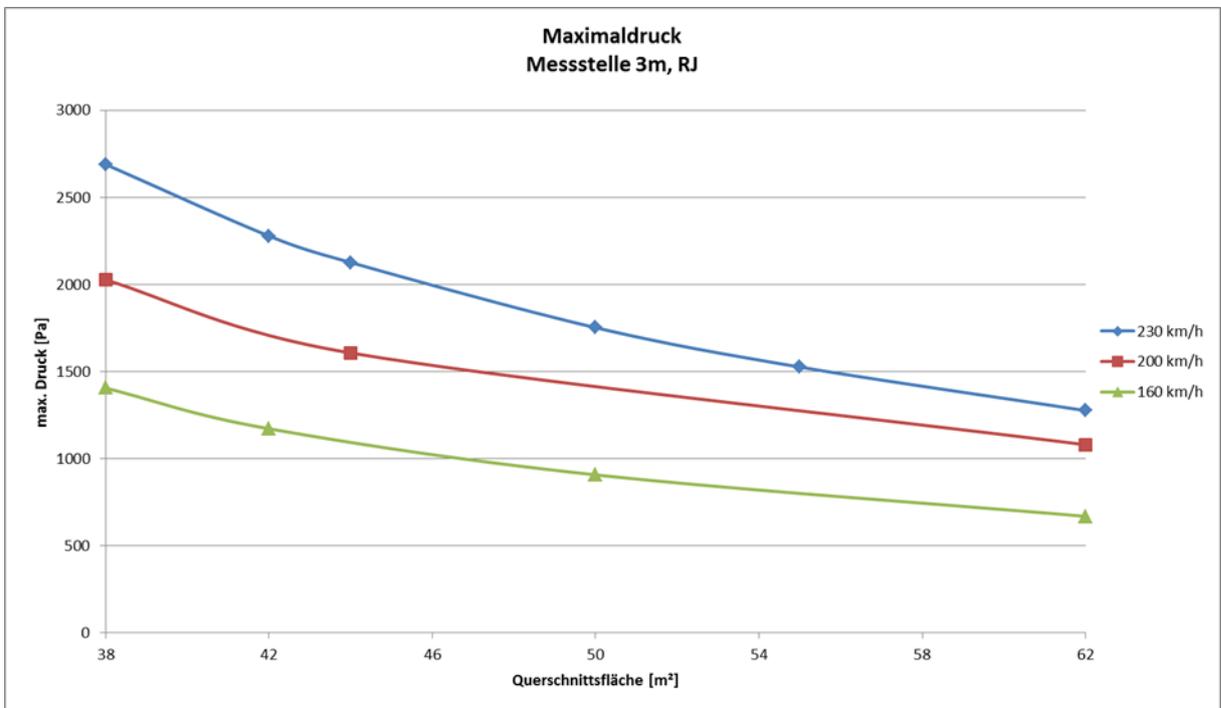


Abbildung 30: Maximaldruck an Messstelle x = 3 Meter in Abhängigkeit von Tunnelquerschnitt und Geschwindigkeit

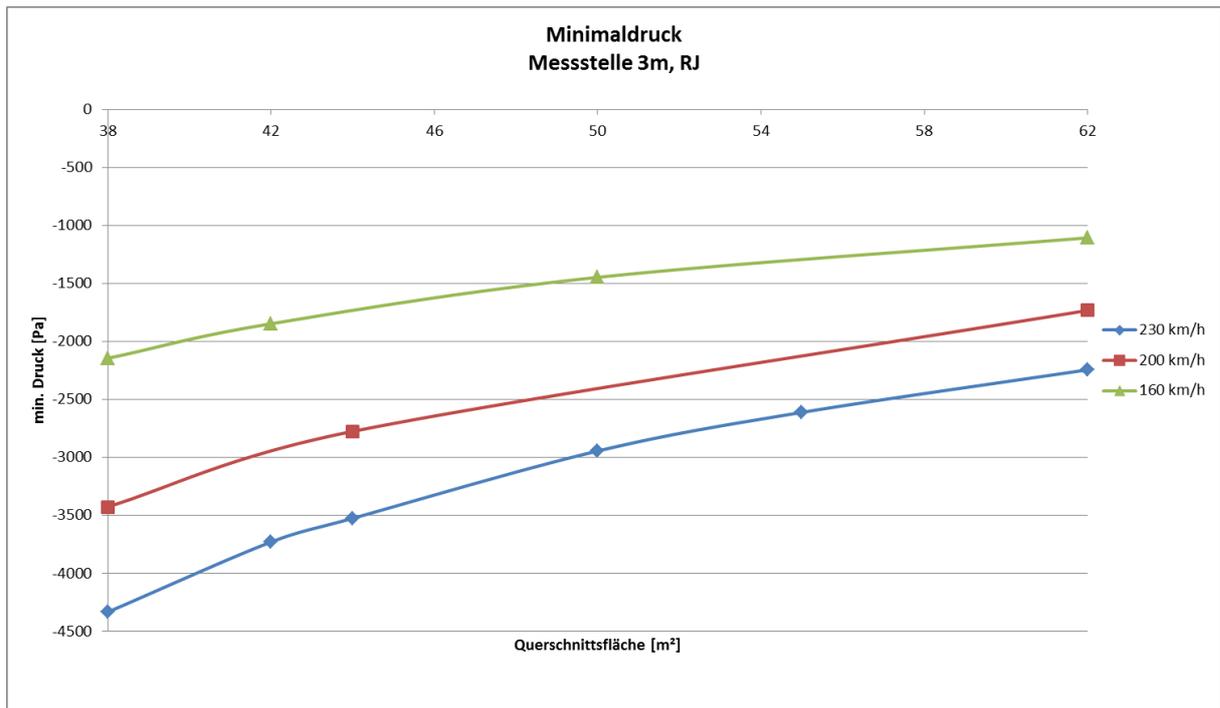


Abbildung 31: Minimaldruck an Messstelle  $x = 3$  Meter in Abhängigkeit von Tunnelquerschnitt und Geschwindigkeit

Der Einfluss der Zuggeschwindigkeit ist in Abbildung 32 erkennbar. Die Einfahrwelle (erstes Maximum) zeigt das zu erwartende Verhalten. Je schneller der Zug, desto höher ist der Druck. Aufgrund der Messposition hat das erste lokale Druckminimum bei 250 km/h einen geringeren Betrag als im Fall 230 km/h. Ursache ist die nicht optimale Lage des Messpunktes für alle Geschwindigkeiten (vergl. Kap. 2.1.8).

Die Ausfahrt des Zuges aus dem Tunnel beeinflusst stark das Abklingverhalten der Wellen. Die Überlagerung der Ausfahrwelle mit den Reflexionen der Einfahrwellen kann konstruktiv oder destruktiv erfolgen. Eine konstruktive Überlagerung tritt bei einer Zuggeschwindigkeit von  $\approx 200$  km/h (Abbildung 32: rotbraun) auf: Das vierte Druckmaximum ( $p \approx 1100$  Pa) liegt deutlich über dem dritten Druckmaximum ( $p \approx 600$  Pa). Bei einer Zuggeschwindigkeit von 250 km/h (Abbildung 32: grau) tritt destruktive Überlagerung auf: die Ausfahrwellen überlagert sich mit den Reflexionen so, dass sich die Wellen nahezu auslöschen (siehe Abbildung 21 und Abbildung 140).

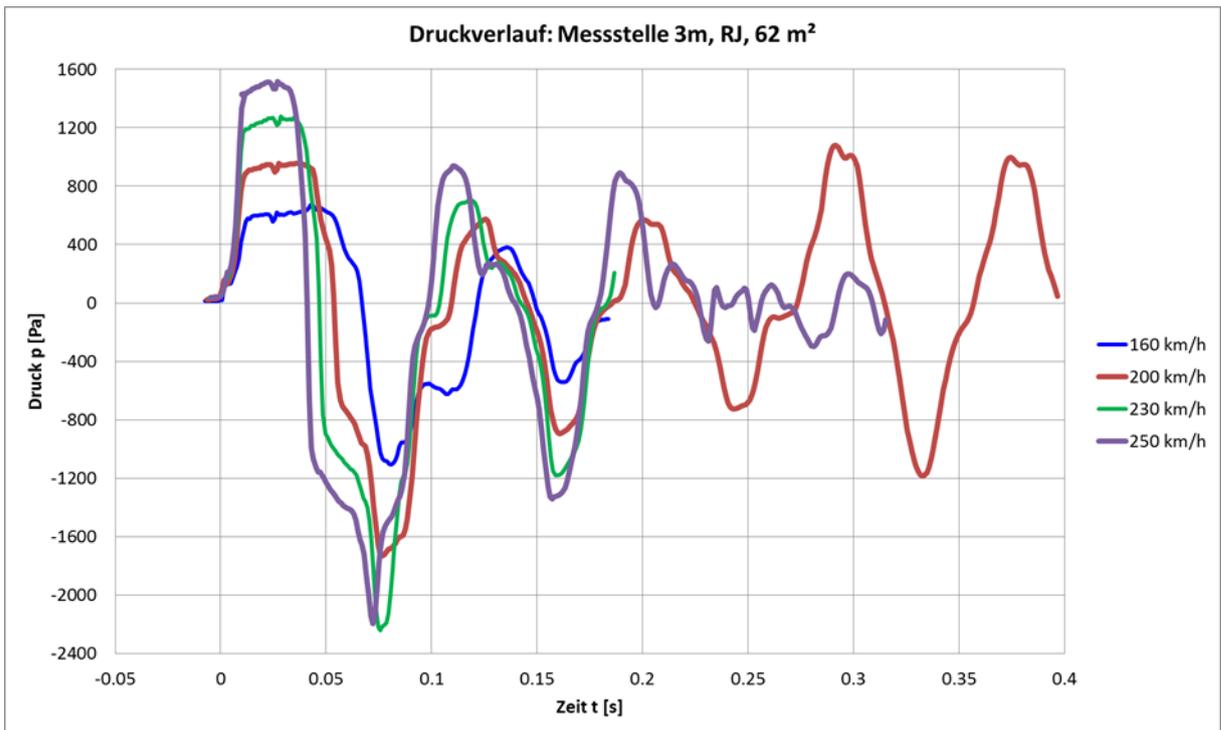


Abbildung 32: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt, Querschnittsfläche: 62 m<sup>2</sup>; Einfluss der Zuggeschwindigkeit

## 2.5 Skalierung 1:25 vs 1:1

### 2.5.1 Methodik

Die Ergebnisse im vorherigen Kapitel im Maßstab 1:25 zeigen eine grundsätzliche Übereinstimmung von Messung und Simulation. Die CFD-Simulation erlaubt eine einfache Skalierung der Geometrie und somit die Änderung des Maßstabs.

Im Folgenden wird der aus Messung und Simulation bekannte Fall „RJ, Tunnel 38 m<sup>2</sup>, Zuggeschwindigkeit 230 km/h“ im Maßstab 1:25 mit denselben Randbedingungen im Maßstab 1:1 verglichen.

Die Modellgeschwindigkeit ist unabhängig vom Maßstab: die Realgeschwindigkeit wird nicht skaliert. Vom Referenzdruckverlauf aus Maßstab 1:25 wird daher nur die Zeitachse skaliert, um mit der Zeitachse des Maßstabs 1:1 deckungsgleich zu sein.

### 2.5.2 Simulationsmatrix

Tabelle 7: Matrix des Vergleichs unterschiedlicher Maßstäbe

Tunnel	Zugtyp	Tunnellänge		Reflexion	Geschwindigkeit [km/h]		
		Modell [m]	Real [m]		160	200	230
38 m <sup>2</sup>	RJ	14	350	Ja			

### 2.5.3 Ergebnisse

In ist der Druckverlauf an der Standardmessstelle:  $x = 3$  m (1:25) bzw. 75 m (1:1) dargestellt. Die Druckkurven beider Modelle haben einen nahezu identischen Verlauf. Es ist davon auszugehen, dass ein vereinfachtes RJ-Modell im Maßstab 1:1 in einem Tunnel mit glatten Wände ohne Türnischen oder Querschnittsprünge (Geometrievariationen entsprechend Abschnitt 2.4) vergleichbare Ergebnisse liefert wie das verwendete Modell im Maßstab 1:25.

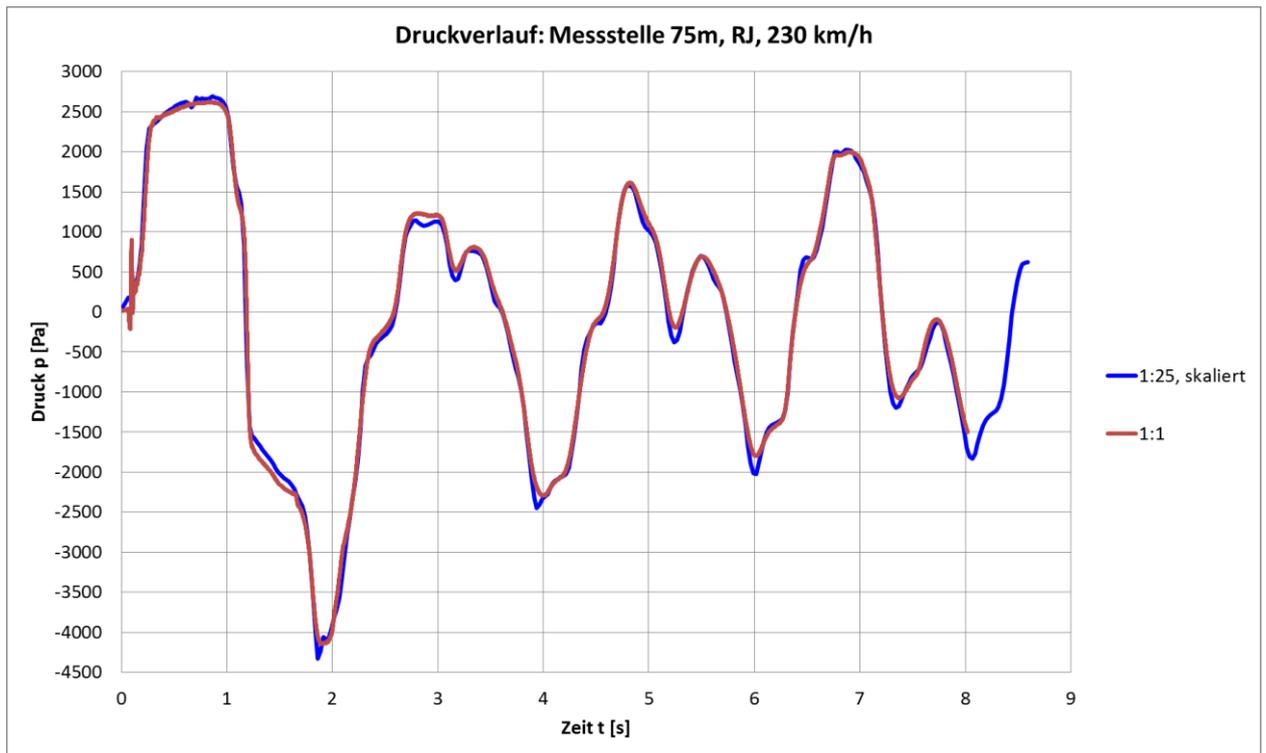


Abbildung 33: Druckverlauf, Messstelle 3 m (Maßstab 1:25) bzw. 75 m (Maßstab 1:1)

## 2.6 Variation der Geometrie des Querschlaganschlusses

### 2.6.1 Simulationsmatrix

Tabelle 8: Matrix der verglichenen Konfigurationen unterschiedlicher Nischen vor den Notausgangstüren

QSTyp	Zugtyp	QS Länge	Tunnel	Tunnellänge [m]		Reflexion	Geschwindigkeit [km/h]		
				Modell	Real		160	200	230
kurz (6m)	RJ	6 m	38 m <sup>2</sup>	14	350	Ja			
						Nein			
lang (30m)	RJ	30 m	38 m <sup>2</sup>	14	350	Ja			
						Nein			
schräg (6 ... 30m)	RJ	6/30 m	38 m <sup>2</sup>	14	350	Ja			
						Nein			

### 2.6.2 Ergebnisse

Der Druckverlauf in Abhängigkeit des Designs der Nische vor der Notausgangstür und einer Zuggeschwindigkeit von 230 km/h ist in Abbildung 34 dargestellt. Gegenüber dem Referenzverlauf einer glatten Tunnelwand ist für keine der Varianten eine Absenkung des Drucks zu erkennen. Die Kompressionswelle der Zugeinfahrt (vergl. Abbildung 19 (2)) ist nahezu unabhängig von der Tunnelgeometrie. Die zusätzliche Fläche bewirkt keine Absenkung der Amplitude. Aufgrund der partiellen Reflexion der Einfahrwelle am Übergang von der Nische zum Basisprofil (Querschnittsverengung -> phasenrichtige Reflexion) tritt eine leichte Druckerhöhung bei  $t \approx 0.025$  s auf.

Der Zug verursacht an den Querschnittssprüngen zusätzliche Druckwellen.

Insbesondere für großräumige Nischen (Tabelle 3: *großer Querschlag*, *schräger Querschlag*) bewirkt die Überlagerung der Wellen an der Messstelle im Kompressionsfall eine Drucküberhöhung um  $\approx 500$  Pa im Vergleich zum glattwandigen Tunnel (Abbildung 34, lokale Druckmaxima bei  $t \approx 0.11$  s,  $t \approx 0.19$  s und  $t \approx 0.27$ ).

Lokal begrenzte Querschnittsvergrößerungen im Bereich der Notausgangstür tragen daher nicht zur signifikanten Absenkung des Druckniveaus bei. Im Gegenteil: Eine glattwandige Tunnelröhre mit konstantem Querschnitt hat an der Messstelle die geringsten Druckamplituden.

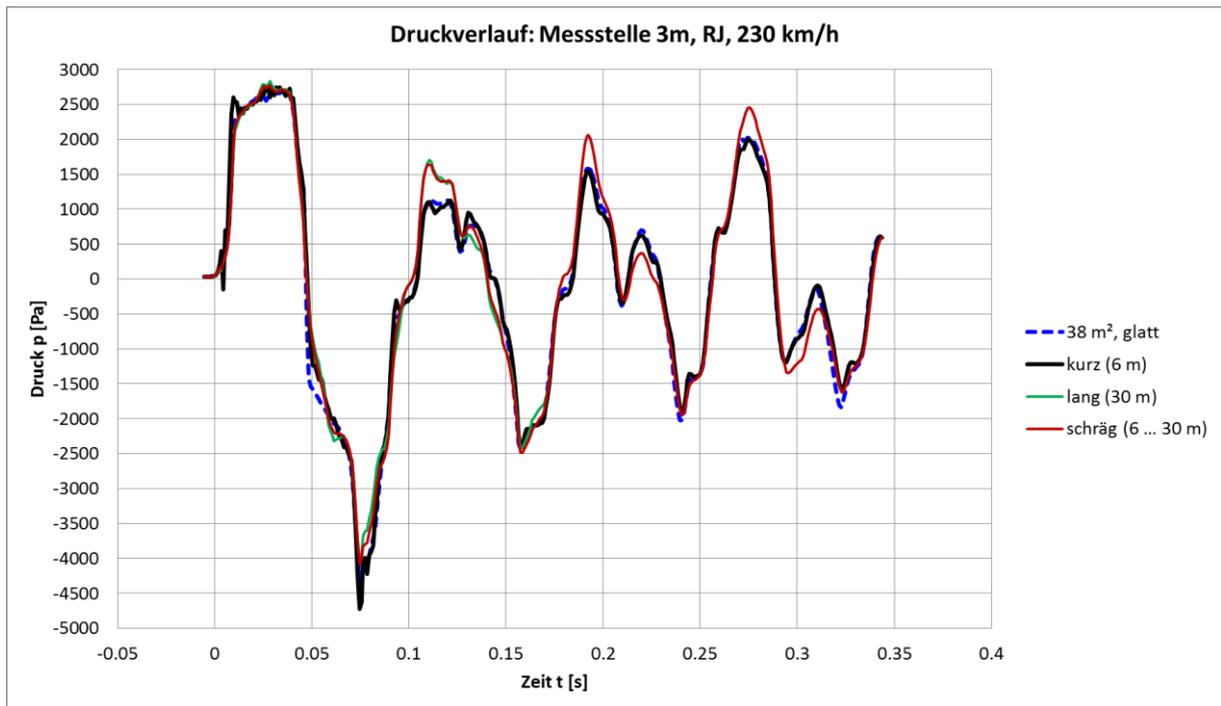


Abbildung 34: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Geometrie des Querschluss, 230 km/h

## 2.7 Tunnelaufweitung (38 → 44 → 38 m<sup>2</sup>)

### 2.7.1 Simulationsmatrix

Tabelle 9: Matrix der verglichenen Konfigurationen mit lokaler, konzentrischer Querschnittsvergrößerung

QSTyp	Zugtyp	QS Länge real	Tunnel	Tunnellänge [m]		Reflexion	Geschwindigkeit [km/h]		
				Modell	Real		160	200	230
Aufweitung	RJ	50 m	38 m <sup>2</sup> ⇒ 44 m <sup>2</sup>	14	350	ja			
						Nein			

### 2.7.2 Ergebnisse

Abbildung 35 zeigt den Druckverlauf an der Messstelle 3 Meter nach Tunneleinfahrt. Die Messstelle liegt im mittig aufgeweiteten Bereich (Aufweitung von  $l = 2$  m bis  $l = 4$  m nach Tunneleinfahrt). Diese Geometrievariante kann daher auch als sehr große Nische um die Notausgangstür angesehen werden.

Im Vergleich zur Referenzsimulation einer glatten Tunnelwand ist für die Einfahrdruckwelle eine leichte Drucküberhöhung feststellbar. Dies entspricht den Druckverläufen aus Kap. 2.6, Abbildung 34. Für die anschließenden stehenden Wellen ist eine Phasenverschiebung und Drucküberhöhung festzustellen. Zusammen mit aufgrund durch die Zugausfahrt ausgelösten Welle ist bei  $t \approx 0.27$  s ein etwa 500 Pa höherer Überdruck feststellbar. Ähnlich den Ergebnissen in Kap. 2.6 ist bei einer konzentrischen Aufweitung keine signifikante Absenkung des Druckniveaus feststellbar. Aufgrund zusätzlicher Reflexionen an den Querschnittänderungen innerhalb der Tunnelröhre und Überlagerung der unterschiedlichen Wellen ist eine lokale Drucküberhöhung im Vergleich zu glattwandigen Tunnel zu erwarten.

Der Vergleich zu den Messergebnissen der TSG (Abbildung 37) zeigt unter Berücksichtigung der in Kap. 2.2.3 dargelegten Abweichungen (schnelleres Abklingen der stehenden Welle und Phasenverschiebung) in etwa das gleiche Verhalten: die Druckmaxima der Reflexionen liegen über den Werten des glattwandigen Tunnel (Abbildung 23:  $t \approx 0.12$ s, zweites Druckmaximum  $< 1000$  Pa).

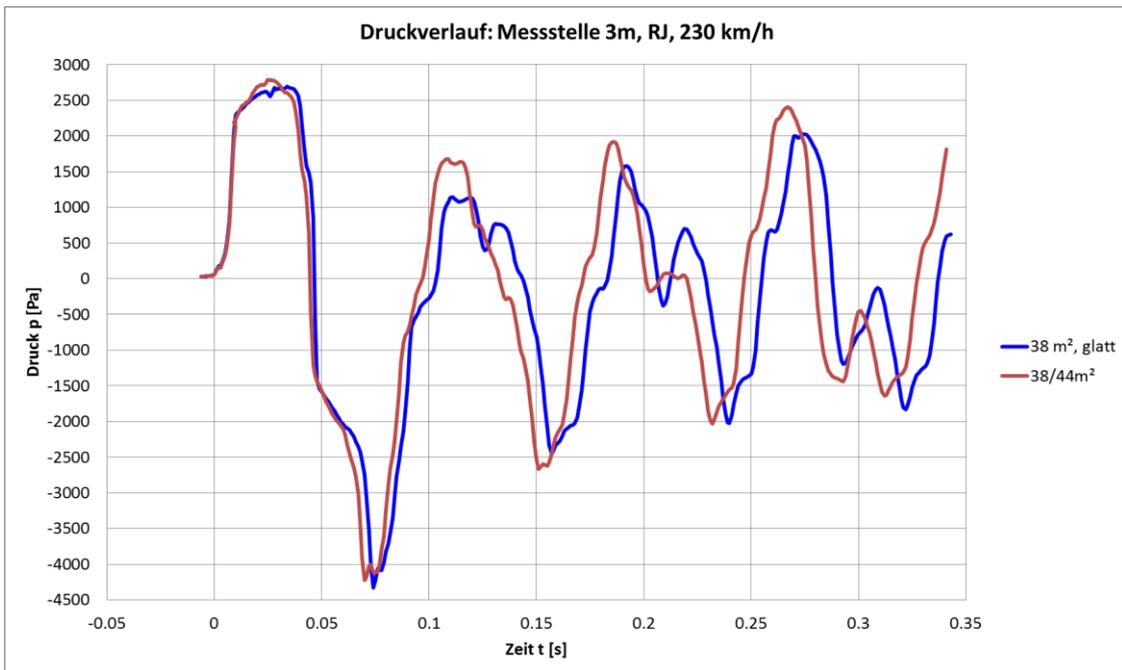


Abbildung 35: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunnelleinfahrt; Einfluss der Tunnelaufweitung von 38 m<sup>2</sup> auf 44 m<sup>2</sup> im Bereich der Messstelle; Zuggeschwindigkeit 230 km/h

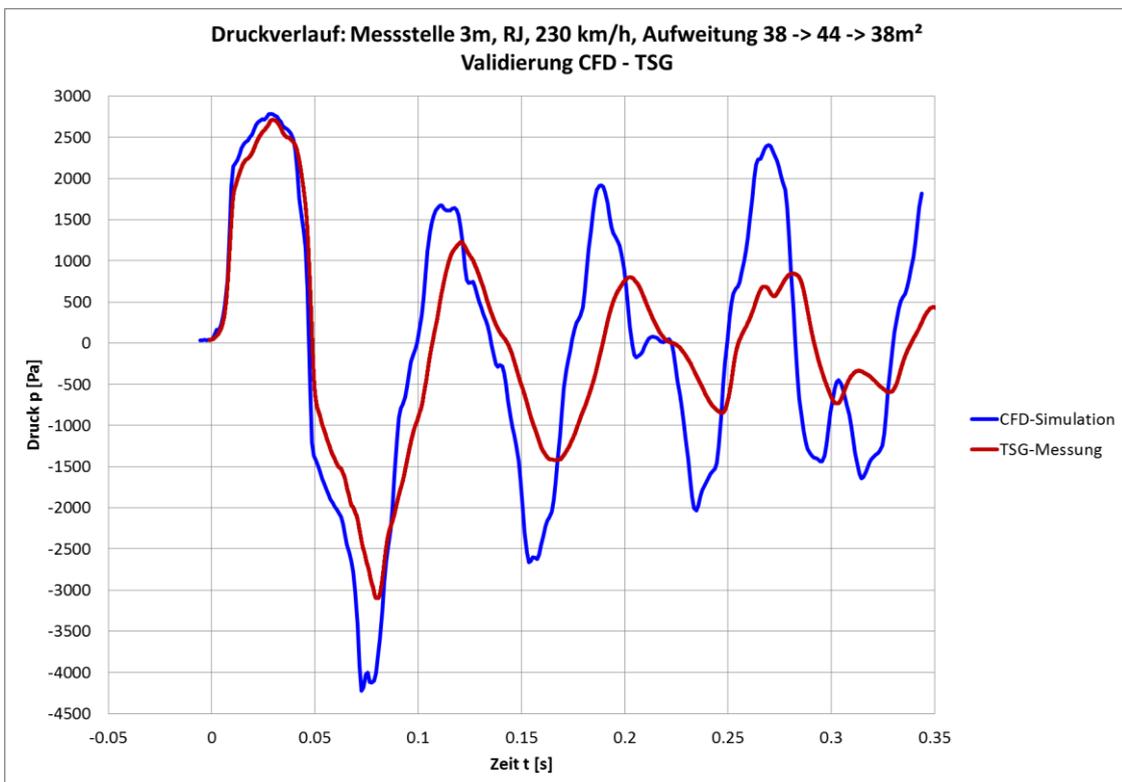


Abbildung 36: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunnelleinfahrt; Vergleich CFD-Simulation mit TSG-Messungen für der Tunnelaufweitung von 38 m<sup>2</sup> auf 44 m<sup>2</sup> im Bereich der Messstelle; Zuggeschwindigkeit 230 km/h

## 2.8 Kurzer vs halb-unendlich langer Tunnel

### 2.8.1 Methodik

In den bisherigen Betrachtungen liegt die Messstelle in einem Bereich hoher Druckunterschiede zwischen dem Druckmaximum aufgrund der Einfahrtwelle und dem Druckminimum (Summe aus Überlagerung Heckeneinfahrt, Zugvorbeifahrt und Reflexion der Kopfeinfahrtwelle). Die Berechnung ist als Extremwertbetrachtung max. Druckunterschieds zu betrachten. Eine Veränderung der Tunnellänge, des Absorptionsverhaltens oder der Reflexionseigenschaften lassen geringere Druckunterschiede erwarten. Zur Abschätzung des minimalen Druckunterschieds (Druckminimum gebildet aus Heckeneinfahrtwelle und gleichzeitiger Zugvorbeifahrt) wird mit einem angepassten Tunnel gearbeitet; siehe Kapitel 2.1.2, Abbildung 12. Die Reflexion am Tunnelausgang wird durch Wahl der Randbedingung unterdrückt.

### 2.8.2 Simulationsmatrix

Tabelle 10: Matrix der verglichenen Konfigurationen „kurzer Tunnel <-> halbusendlicher Tunnel“

QSTyp	Zugtyp	QS Länge	Tunnel	Tunnellänge [m]		Reflexion	Geschwindigkeit [km/h]		
				Modell	Real		160	200	230
ohne Nische/QS	RJ		38 m <sup>2</sup>	14	350	Ja			
						Nein			
kurz (6m)	RJ	6 m	38 m <sup>2</sup>	14	350	Ja			
						Nein			
lang (30m)	RJ	30 m	38 m <sup>2</sup>	14	350	Ja			
						Nein			
schräg (6 ... 30m)	RJ	6/30 m	38 m <sup>2</sup>	14	350	Ja			
						Nein			
Aufweitung	RJ	50 m	38 m <sup>2</sup> => 44 m <sup>2</sup>	14	350	ja			
			Nein						
ohne Nische/QS	RJ		55 m <sup>2</sup>	14	350	ja			
						Nein			

### 2.8.3 Ergebnisse

Der Druckverlauf bei glattwandigem Tunnel (Abbildung 37) zeigt zwei markante Unterschiede, die durch das geänderte Reflexionsverhalten hervorgerufen werden:

1. Betrag des Minimaldruck um ~ 1830 Pa ( $\pm$  42%) reduziert  
Im Fall des 55 m<sup>2</sup> großen Tunnels beträgt die Reduktion 33%.
2. Nach Zugvorbeifahrt nur geringer Unterdruck der Nachlaufströmung und keine stehende Welle im Tunnel

Konfigurationen mit Querschnittsänderungen des Tunnels zeigen grundsätzlich ein ähnliches Verhalten. Aufgrund zusätzlich ausgelöster Wellen innerhalb des Tunnels erfolgt das Abklingen etwas langsamer

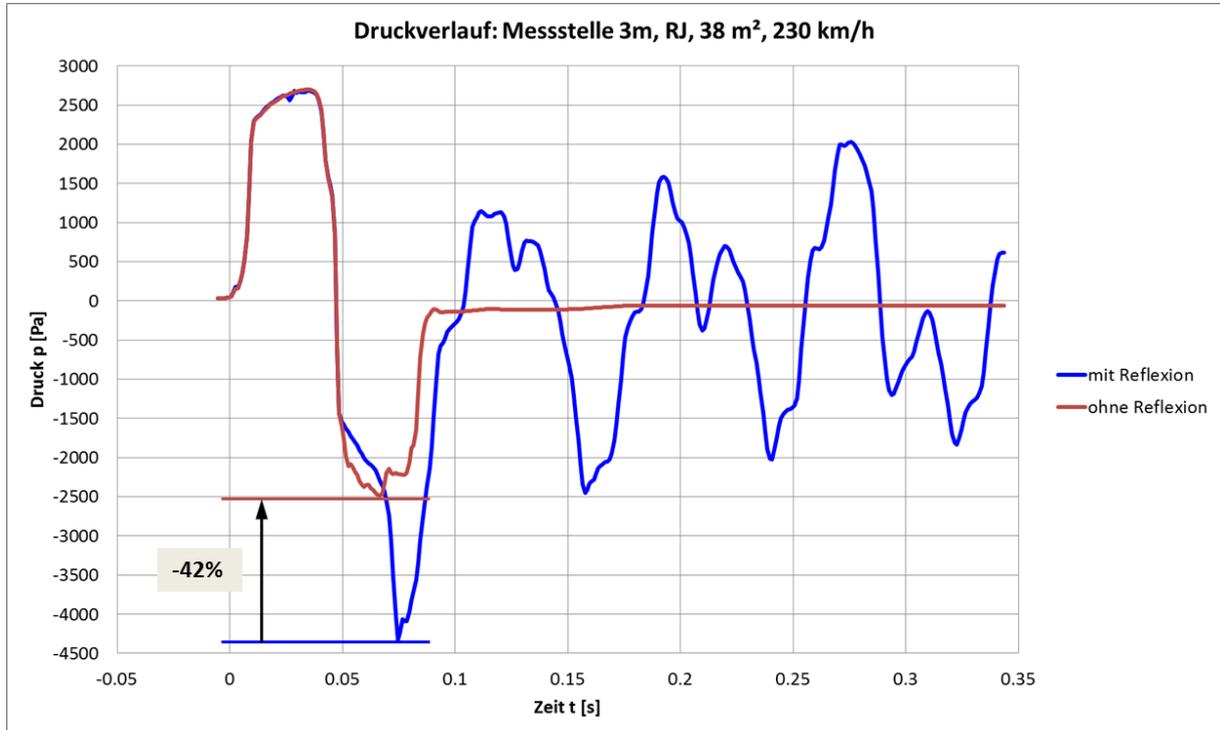


Abbildung 37: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Reflexion am Tunnelende; Zuggeschwindigkeit 230 km/h

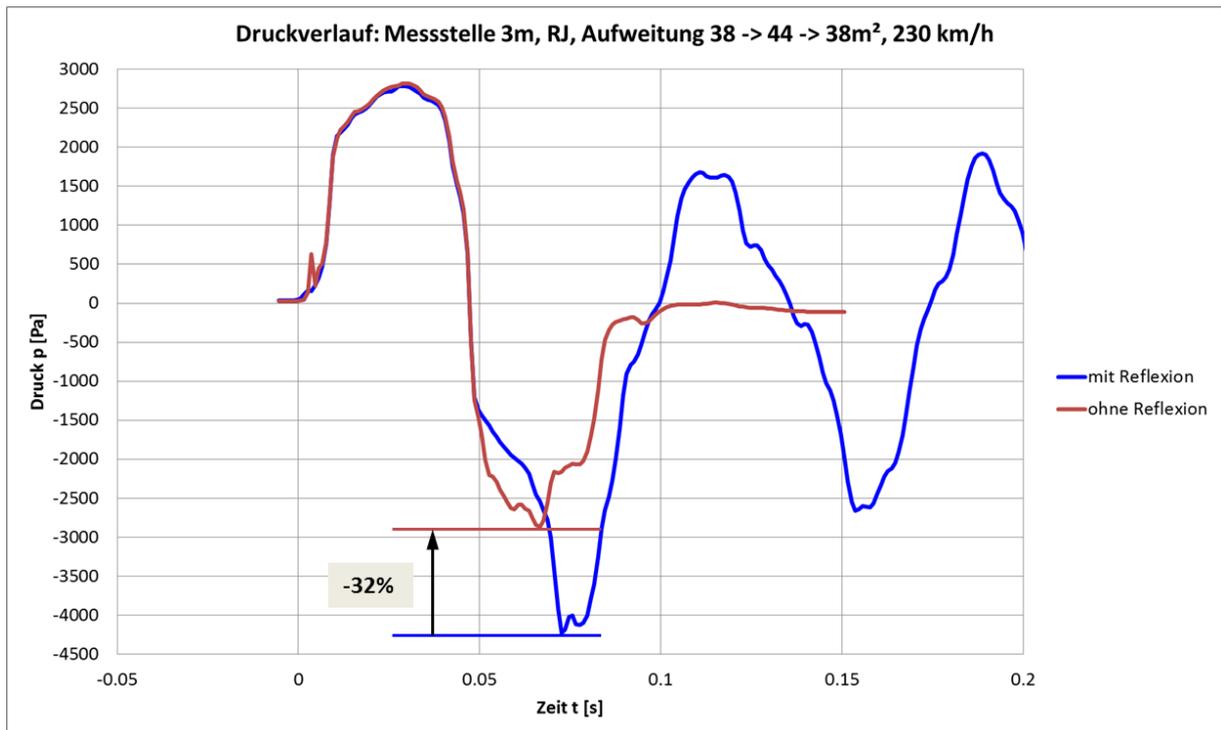


Abbildung 38: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Reflexion am Tunnelende und abgeschrägter Nische vor Notausgang; Zuggeschwindigkeit 230 km/h

### 3 1D-STRÖMUNGSSIMULATION

Zur Simulation längerer Tunnel wurde ein eigener 1D-Solver erstellt und implementiert. Dies war aus folgenden Gründen erforderlich:

- 1) Die numerische Analyse von nicht-standardisierten Konfigurationen (unübliche Verläufe des Tunnelquerschnitts oder der Tunnelrauigkeit) benötigt vollen Zugriff auf die Geometrie von Zug und Tunnel sowie auf sämtliche Modellparameter, was in kommerzieller Software nicht gewährleistet ist.
- 2) Eine Lizenzierung von Thermotun [1] (ein kommerzielles 1D Tunnel CFD Programm) war nicht möglich, da der Hersteller nur eine Lizenz pro Land vergibt (und diese für Österreich bereits vergeben war). Außerdem konnte der Bezug einer Forschungslizenz aus Kostengründen nicht in Betracht gezogen werden, da die Lizenzkosten einen substantiellen Teil des Projektbudgets betragen hätten.

#### 3.1 Methodik

##### 3.1.1 Grundgleichungen

Es wurde ein in der Literatur beschriebenes [2, 3, 4] und auch in kommerzieller Berechnungssoftware bewährtes [4, 1] eindimensionales Modell für das Zug / Tunnel-System verwendet.

Die Strömung, die im Tunnel bei Zugsdurchfahrt auftritt, wird mittels der eindimensionalen Strömungsgleichungen für eine kompressible, instationäre Strömung in einer zylindrischen Röhre mit zeitlich und örtlich variablem Querschnitt modelliert. Reibungs- und 3D-Effekte werden mittels Quelltermen dargestellt.

Die Strömungsvariablen in jedem Tunnelquerschnittssegment werden uniform angenommen, so kann das System mit folgendem Satz von Erhaltungsgleichungen beschrieben werden:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} = \mathbf{S} \quad (1)$$

mit entsprechenden Start- und Randbedingungen. Hierbei der Vektor der Erhaltungsgrößen  $\mathbf{U}$  und der Flussvektor  $\mathbf{F}$  wie folgt gegeben sind:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho A \\ \rho u A \\ \rho E A \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho u A \\ (\rho u^2 + p) A \\ \rho u H A \end{bmatrix} \quad (2)$$

Hier sind  $\rho$  die Dichte,  $p$  der Druck,  $u$  die Geschwindigkeit in Tunnelrichtung und  $A$  die Querschnittsfläche.

Die rechte Seite von Gleichung (1) stellt den Quellterm  $S$  dar:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ p \frac{\partial A}{\partial x} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D_m \\ D_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Q_m \\ Q_h \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Der erste Term resultiert aus der 1D-Näherung der variablen Querschnittsfläche. Die Funktionen  $D_m$  und  $D_h$  beschreiben die Reibungs- und Turbulenzverluste der Impuls- und Energiegleichung mittels empirischer Wandreibungskoeffizienten von Zug  $C_{f_t}$  und Tunnel  $C_{f_g}$ .  $Q_m$  und  $Q_h$  modellieren empirische Korrekturen für lokale 3D Strömungseffekte, die Funktionen der Querschnittsänderung im Bereich von Zugnase und -heck sind.

### **Reibung**

Der Wandreibungskoeffizient von Zug und Tunnel kann mittels Moody-Diagramm, siehe Abbildung 39, abgeschätzt werden. Es zeigt im logarithmischen Maßstab den Zusammenhang der einheitenlosen Größen des Reibungsfaktor  $\lambda$ , der Reynolds-Zahl  $Re$  und der relativen Rauheit  $\varepsilon/d$  ( $\varepsilon$  = gemittelte Rautiefe,  $d$  = Durchmesser des Rohres).

Hier ist der Darcy-Weisbach-Reibungsfaktor  $\lambda$  dargestellt ist, der zum Wandreibungskoeffizienten  $C_f$  im Verhältnis  $\lambda = C_f/4$  steht.

Die Reynoldszahl  $Re$  der lokalen Strömung (basierend auf dem hydraulischen Durchmesser) liegt für den Tunnel bei  $Re \approx O(10^6)$  und für den Zug bei  $Re \approx O(10^7)$ . Wie in Abbildung 39 ersichtlich, ist der Reibungskoeffizient bei diesen Reynoldszahlen, für eine repräsentative relative Rauigkeit von  $\varepsilon/d \approx 10^{-3}$ , näherungsweise konstant, so dass für die Simulationen konstante Werte für  $C_{f_t}$  (Zug) und  $C_{f_g}$  (Tunnel) angenommen werden können.

Vardy [5] gibt in ThermoTun Online für den Tunnel Reibungswerte  $C_{f_g}$  zwischen 0.005 und 0.01 an, für den Zug  $C_{f_t} \approx 0.003 / 0.005 / 0.007$  für einen modernen, stromlinienförmigen Zug / einen konventionellen Regionalzug / einen Container-Frachtzug.

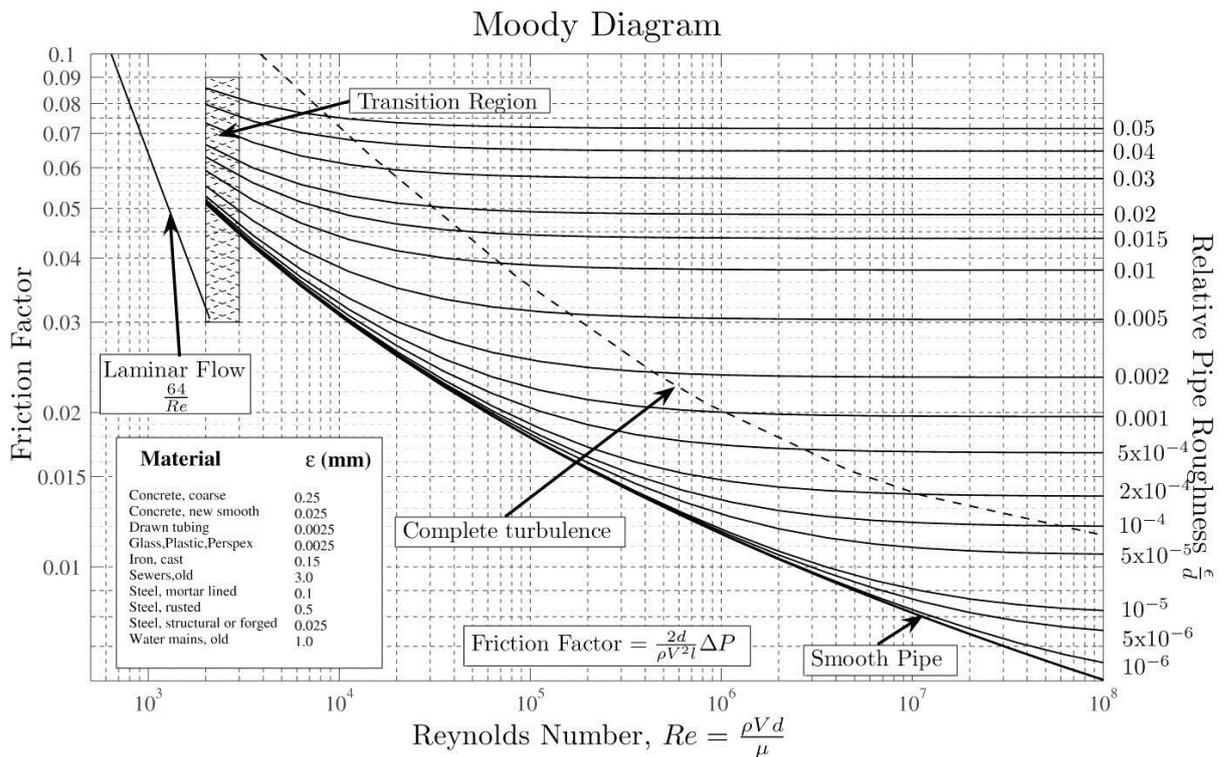


Abbildung 39: Moody Diagramm [6], zeigt den Darcy-Weisbach-Reibungskoeffizienten gegen die Reynoldszahl für verschiedene relative Rauigkeiten

### 3.1.2 Lösungsmethode und Implementierung

Die Lösung der Gleichungen (1) – (3) erfolgt mittels Discontinuous Galerkin (DG) Methode. Die DG Methode zeichnet sich für ihre Robustheit und geringe numerische Dissipation aus, und ist daher geeignet zur Propagation von Druckwellen mit hoher Intensität über lange Distanzen.

Dabei wurden die Gleichungen (1) – (3) in der in [3] beschriebenen modifizierten Form verwendet, in der die Querschnittsfläche nicht in den Erhaltungsgrößen eingeschlossen ist, was numerische Oszillationen der Lösung verringert.

Als Implementierungsbasis diente das Open Source Projekt Nektar++ [7], [www.nektar.info](http://www.nektar.info).

Die Implementierung gestaltete sich ziemlich aufwändig, da der Nektar++ objektorientiert programmiert ist und eine hochkomplexe Struktur aufweist, die erst nachvollzogen werden musste, wozu die verfügbare Dokumentation nur bedingt ausreichend ist. Weiters stellte sich heraus, dass der Code nicht sehr performant ist. In Zusammenarbeit mit den Entwicklern von Nektar++ konnte zwar eine substantielle Steigerung der Rechenperformance erzielt werden,

die Rechenzeit konnte um ungefähr einen Faktor 20 reduziert werden. Dennoch ist der Code noch immer wesentlich langsamer als anfänglich angenommen. Dies ist zum einen der Lösungsmethode geschuldet aber auch ihrer Implementierung in Nektar++, der laut Aussage der Entwickler primär bezüglich 2D und 3D Simulation optimiert wurde.

### 3.1.3 Validierung

Die Validierung des Codes erfolgte mittels des Referenzproblems einer Strömung durch eine Düse mit variablem Querschnitt, für das eine analytische Lösung existiert, siehe Abbildung 40.

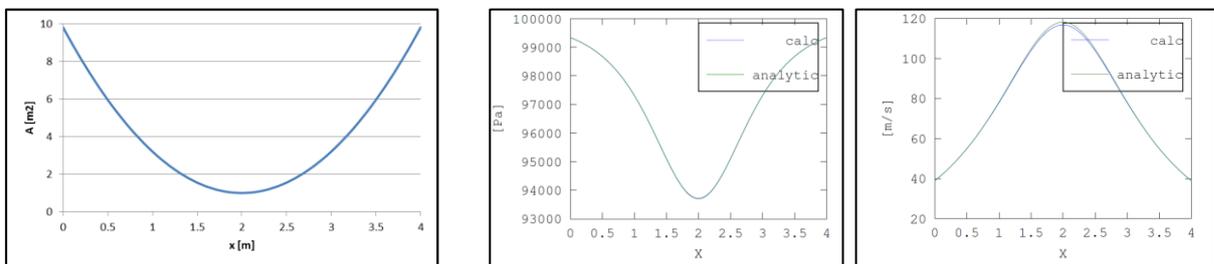


Abbildung 40: Geometrie (links), Druck (Mitte) und Geschwindigkeit (rechts) des Validierungsproblems

### 3.1.4 Zug – Tunnel Setup

#### Geometrie

In den Gleichungen treten Orts- und Zeitableitung der Querschnittsfläche auf. Um die Differenzierbarkeit der die Querschnittsfläche beschreibenden Funktion in Ort und Zeit zu gewährleisten, wird die Geometrie von Zug und Tunnel mittels glatter, analytischer Funktionen definiert. Dazu wurden Tunnel- und Zugsquerschnitt aus Arkustangens-Funktionen mit unterschiedlicher Steilheit zusammengesetzt.

#### Tunnel

Der Tunnel besteht aus einlauf- und auslaufseitigen Erweiterungen ("Umgebung"), die mit dem 50-fachen des Tunnelquerschnitts angenommen werden und an den Tunnelportalen rasch zum definierten Tunnelquerschnitt abfallen. Innerhalb des Bereichs des engen Tunnelquerschnitts wurde die Rauigkeit der Tunnelwand auf einen, in den meisten Fällen konstanten, Wert gesetzt. Es werden 2 Tunnelkonfigurationen, kurz (1km) und lang (10km)

mit unterschiedlichen Querschnitten, Rauigkeiten und Geschwindigkeiten untersucht. Die Konfigurationen sind nachfolgend gemeinsam mit den Berechnungsergebnissen ersichtlich.

## Zug

Wie in Abbildung 41 ersichtlich decken sich der Flächenverlauf von Railjet-Kopf (aus dem CFD-Modell ausgemessen) und der analytische Form mit einem Längenparameter  $L_n = 1$  m gut im oberen Bereich und mit  $L_n = 3$  m im unteren Bereich recht gut, sind aber sonst entweder deutlich zu steil oder zu flach. Als Kompromiss wurde  $L_n = 1.5$  m für Kopf und Heck gewählt.

In allen Simulationen wurden folgende weitere Daten des Zugs angenommen:

- Länge: 200 m
- Umfang des Regelquerschnitts: 11 m
- Rauigkeit:  $C_{ft} = 0.003$  (moderner stromlinienförmiger Zug)

Der turbulente Nachlauf des Zugs wurde als Verlängerung des Zughecks auf 10 hydraulische Durchmesser modelliert, wie in [2] vorgeschlagen.

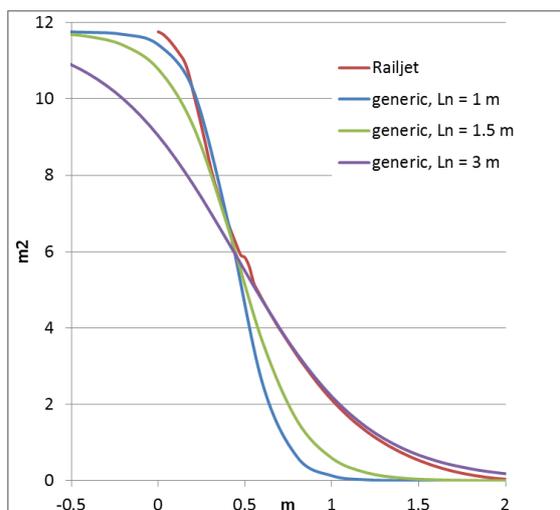


Abbildung 41: Flächenverlauf des Railjet-Kopfs und des generischen Kopfs mit Variation des Längenparameters  $L_n$ .

Abbildung 42 zeigt den Querschnittsverlauf eines 1 km langen Tunnels und des Zugs mit Nachlauf.

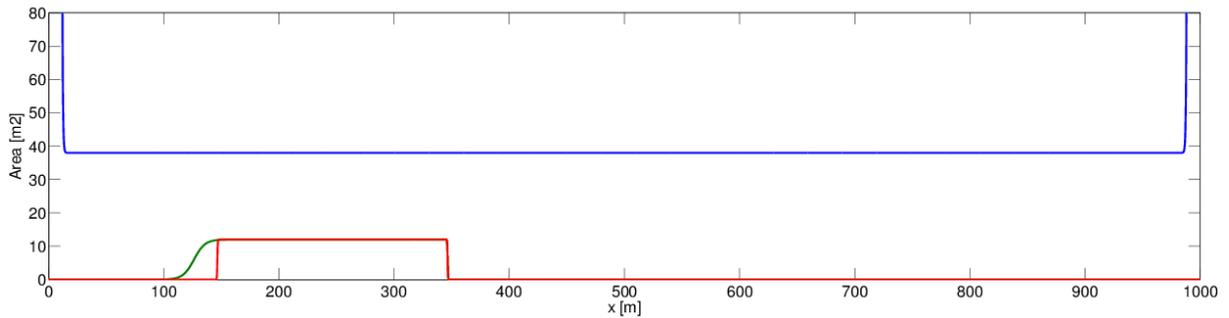


Abbildung 42: Querschnittsverlauf von Tunnel (blau), Zug (rot) mit Nachlauf (grün)

### Randbedingungen

Ein- und Auslass wurden bei am linken ( $x = 0$ ) bzw. rechten Rand ( $x = L_{Tunnel}$ ) gesetzt. Der Zug bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit von links nach rechts durch das Simulationsgebiet.

Der Zug steht zu Beginn der Simulation außerhalb des Simulationsgebiets. Er tritt durch den linken Rand ein bzw. durch den rechten Rand aus. Beim Eintritt entsteht eine Druckwelle am linken Rand, die durch das Simulationsgebiet propagiert. Allerdings ist ihrer Amplitude relativ gering (geschwindigkeitsabhängig). Ein abruptes Anfahren eines sich im Simulationsgebiet befindlichen Zugs würde eine Druckwelle mit wesentlich höherer Amplitude auslösen. Ein graduelles Beschleunigen würde einen wesentlich längeren Umgebungsbereich vor dem Einfahrportal benötigen.

Für den Einlass wurde eine gemischte Druck/Geschwindigkeitsrandbedingung entwickelt, die die initiale Druckwelle aufgrund des Eintritts des Zugs in das Simulationsgebiet minimiert, so dass, ähnlich wie in der 3D Simulation, der Umgebungsbereich reduziert werden kann.

Am Auslass werden die Umgebungsbedingungen  $\rho = \rho_\infty$ ,  $v = 0$ ,  $p = p_\infty$  gesetzt, was Reflexionen von Druckwellen effektiv verhindert.

## 3.2 Kurzer Tunnel (1 km) – Variation von Querschnittsfläche und Geschwindigkeit

### 3.2.1 Simulationsmatrix

Es wurden folgende Konfigurationen für einen 1 km langen Tunnel untersucht:

	Länge	Fläche	Reibungs- koeffizient	Geschwindigkeit
<b>Zug</b>	200 m	12 m <sup>2</sup>	0.003	200 km/h
				250 km/h
<b>Tunnel</b>	980 m + 2*10 m	38 m <sup>2</sup>	0.003	
	Umgebung	44 m <sup>2</sup>		

### 3.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind nachfolgend für jede Geschwindigkeit und Tunnelquerschnitt in Druck/Lage/Zeit-Flächenplots dargestellt, in denen die bei Zugdurchfahrt entstehenden Druckwellen zeitlich wie örtlich übersichtlich dargestellt sind. Das Druckniveau ist farblich gekennzeichnet, rot ist das Druckmaximum, blau das Druckminimum. Betrachtet man Abbildung 43 im Detail, so ist ersichtlich, dass die Zugspitze bei  $t = L/V$  (daher  $t = 0.225$  s bzw.  $0.157$  s für eine Länge des Einfahrtbereichs vor dem Portal  $L = 10$  m bei 200 bzw. 250 km/h, sowie  $t = 0.78$ s bzw.  $1.125$ s bei  $L = 50$  m bei 200 bzw. 250 km/h) in den Tunnel einfährt und eine Kompressionswelle erzeugt, welche sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Diese trifft etwa 3,48 s später am Ausfahrtsportal auf, wird gegenphasig reflektiert und läuft somit als Expansionswelle zurück. Trifft wiederum eine Expansionswelle am Portal ein, wird sie als Kompressionswelle reflektiert. Da diese beiden Wellen eine gewisse Breite besitzen, überlagern sie sich destruktiv im Bereich des Portals (rote bzw. blaue Dreiecke). Bei den Reflektionen wird jeweils ein Teil der Energie in die Umgebung abgestrahlt, der überwiegende Teil verbleibt jedoch im Tunnel. An etwa der Stelle  $x = 330$ m trifft die rücklaufende Expansionswelle auf den Zugkopf und überlagert sich mit dem Unterdruckgebiet über den Zug, was den Unterdruck über den Zug verstärkt (blau). Ähnliches passiert mit dem Zugheck, welches nach 3,6 sec in den Tunnel einfährt und wiederum Druckwellen erzeugt, welche an den Portalen reflektiert werden. Nach 18 sec fährt der Zug aus dem Tunnel und erzeugt wiederum Wellen bei Ausfahrt von Kopf und

Heck. Diese Wellen überlagern sich und sind als ein „Zick-Zack-band“ in den Druck/ Lage/ Zeitplots ersichtlich. Die initiale Amplitude der Druckwellen wird im Wesentlichen vom Querschnittsverhältnis von Tunnel und Zug, der Zuggeschwindigkeit und der Kopfform beeinflusst, das Timing (daher die Phasenlage und die sich damit ergebende Amplitude) der Überlagerungen von Tunnellänge und Schallgeschwindigkeit im Tunnel. Das Abklingen der Druckwellen wird durch das Reflexionsverhalten der Portale und die Reibung (Dämpfung) des Tunnels beeinflusst.

Nachfolgend sind die Ergebnisse für unterschiedliche Geschwindigkeiten angeführt.

Drucksignale für  $V=200$  km/h

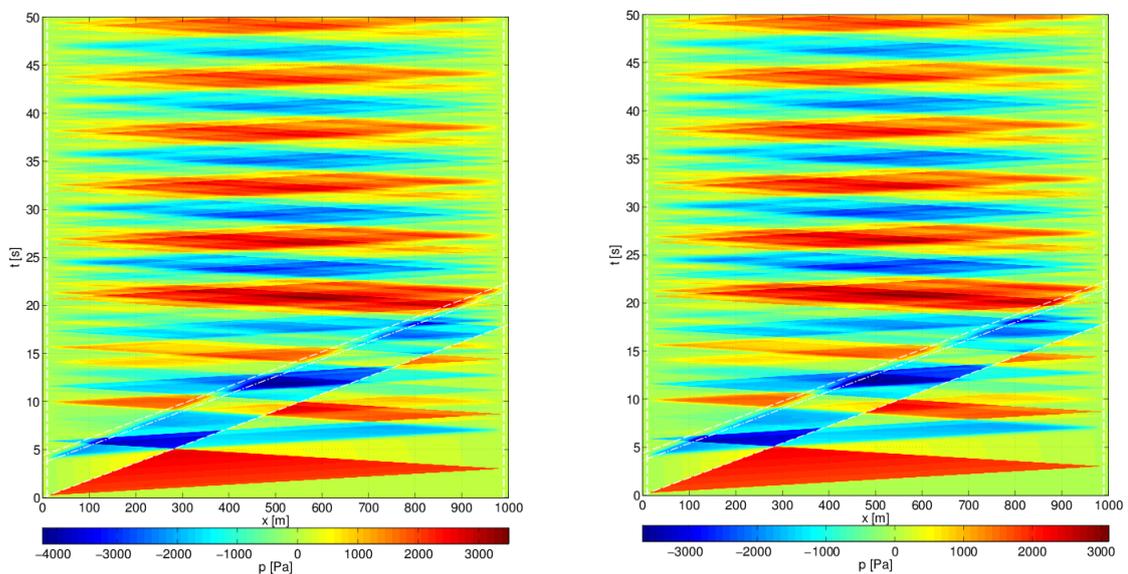


Abbildung 43: Drucksignal über Tunnellänge und Zeit, für  $38 \text{ m}^2$  (links) und  $42 \text{ m}^2$  Tunnel (rechts) bei  $V = 200$  km/h.

Drucksignale für  $V=250$  km/h

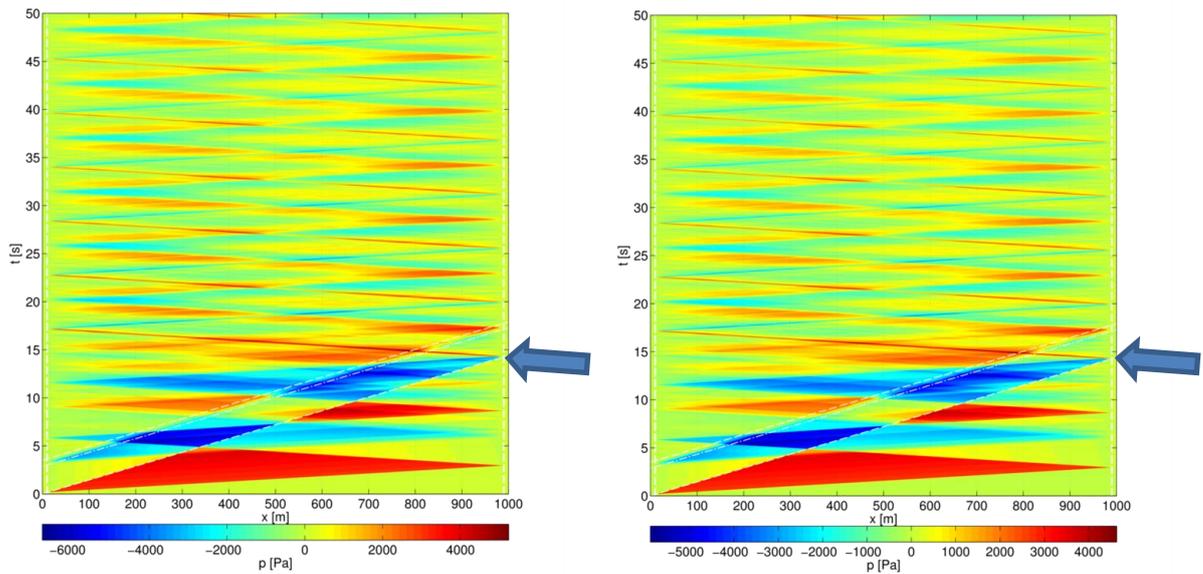


Abbildung 44: Drucksignal über Tunnellänge und Zeit, für 38 m<sup>2</sup> (links) und 42 m<sup>2</sup> Tunnel (rechts) bei  $V = 250$  km/h. Die Pfeile kennzeichnen den Moment, in dem am Tunnelausgang eine Druckwelle aufgrund der Koinzidenz von Zugkopf-Ausfahrt und Einfall der mehrfach reflektierten Kopfeinfahrwelle ausgelöst wird.

Ein Spezialfall tritt für Geschwindigkeit von 250 km/h und 1 km auf. Aufgrund der Tunnellänge treffen die Ausfahrt des Zugkopfs aus dem Tunnel und der Einfall der bereits 4-fach reflektierten Kopfeinfahrwelle genau zusammen. Dies führt dazu, dass in diesem Moment ein kurzer Überdruckimpuls im hinteren Ende des Tunnels ausgelöst wird, siehe Pfeile in Abbildung 44.

Die Drucksignale an den Positionen, an denen (geschwindigkeitsabhängig) Zugkopf und reflektierte Kopf-Einfahrwelle zusammentreffen, sind für den 38 m<sup>2</sup> Tunnel in Abbildung 45 dargestellt.

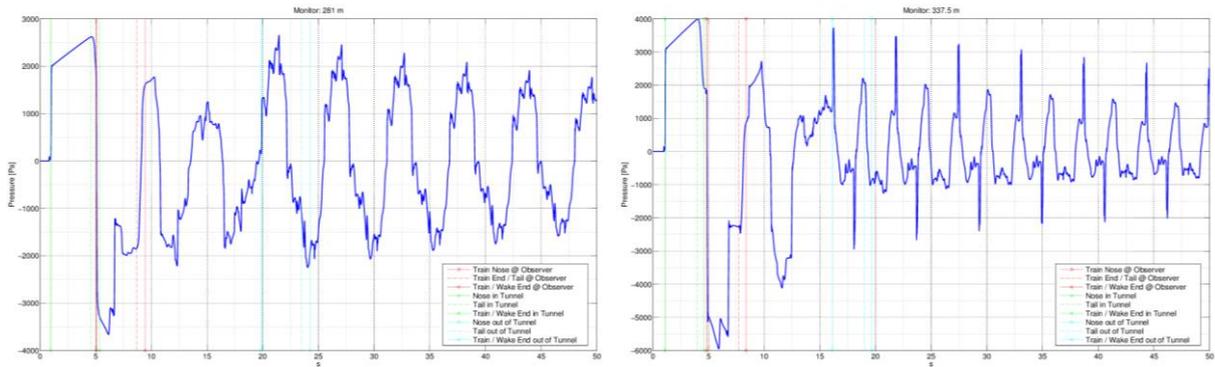


Abbildung 45: 1 km Tunnel,  $A = 38 \text{ m}^2$ : Drucksignal an der Position der Koinzidenz von Zugkopf und reflektierter Kopf-Einfahrwelle. Links:  $V = 200 \text{ km/h}$ ,  $x = 281 \text{ m}$ ; Rechts:  $V = 250 \text{ km/h}$ ,  $x = 337.5 \text{ m}$

In der nachfolgenden Abbildung 46 sind für die gesamte Tunnellänge die umhüllenden Druck- und Sogkurven sowie die Summenkurve der Druckbeträge der unterschiedlichen Konfigurationen dargestellt.

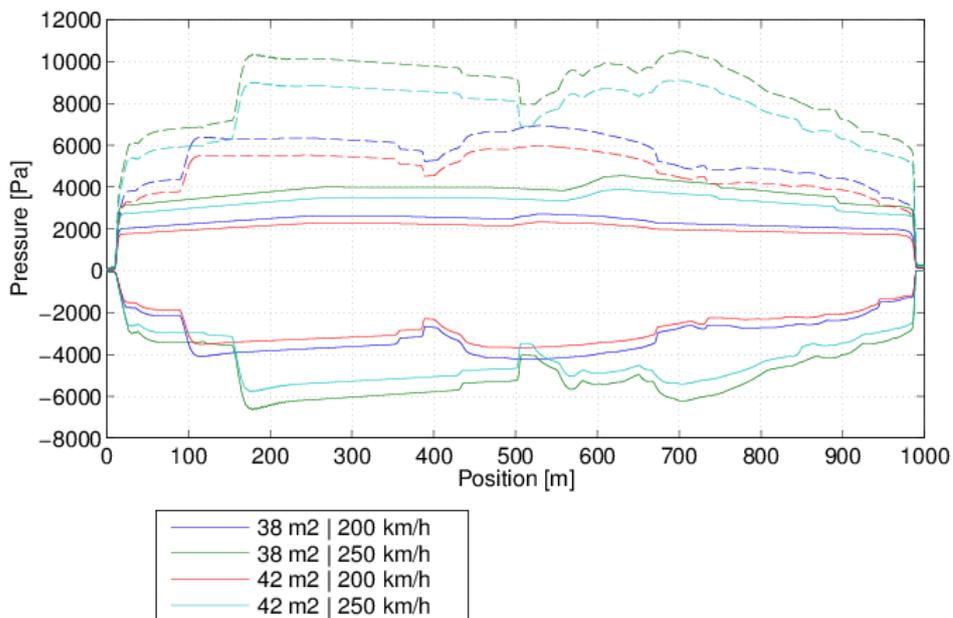


Abbildung 46: 1 km Tunnel: Vergleich Tunneldurchmesser und Geschwindigkeit. Maximal- und Minimaldruck sowie Differenz der Extremwerte (- -) über die Tunnellänge während sich der Zug im Tunnel befindet.

Die Erhöhung der Geschwindigkeit von  $200 \text{ km/h}$  auf  $250 \text{ km/h}$  erhöht den Maximal-/Minimaldruck im Tunnel um  $67\%$  bzw.  $57\%$  während der Zugdurchfahrt (ohne Ausfahrwelle), gleichermaßen für beide Tunnelquerschnittsflächen. Die Erhöhung der

Tunnelquerschnittsfläche von 38 m<sup>2</sup> auf 42 m<sup>2</sup> verringert den Maximal-/Minimaldruck um 14% bzw. 13%, gleichermaßen für beide Zuggeschwindigkeiten.

### 3.3 Kurzer Tunnel (1 km) – Variation der Tunnelrauigkeit

#### 3.3.1 Simulationsmatrix

	Länge	Fläche	Reibungskoeffizient	Geschwindigkeit
<b>Zug</b>	200 m	12 m <sup>2</sup>	0.003	250 km/h
<b>Tunnel</b>	980 m + 2*10 m	38 m <sup>2</sup>	0	
Umgebung			0.003 + 0.01 (Case I, Case II)	
			0.005	

Der Reibungskoeffizient wurde zwischen 0 und 0.005 variiert, wobei 0.003 als Standard angenommen wurde. Der theoretische Fall ohne Tunnelreibung wurde zu Referenzzwecken mit aufgenommen. Er ist allerdings in der Praxis nicht relevant.

In zwei Fällen wurde der Reibungskoeffizient von 0.003 in mehreren Abschnitten von 100 m auf 0.01 erhöht: an den Tunnelportalen (Case I), sowie an den Tunnelportalen und an der Stelle im Tunnel, an der sich die einmal-reflektierte, rücklaufende Kopf-Einfahrwelle mit dem Druckabfall an der Zugkopfs überlagert (Case II), siehe Abbildung 47.

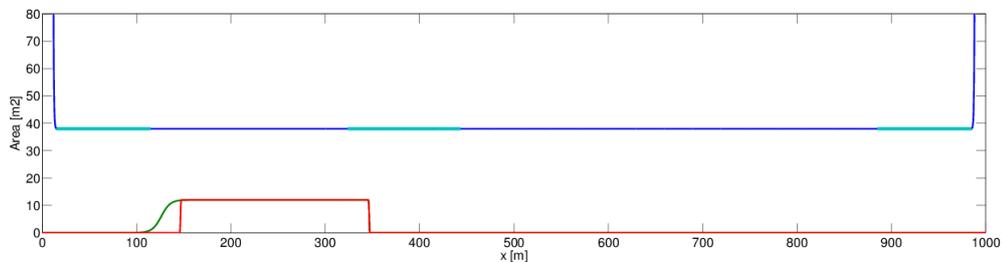


Abbildung 47: Variation der Tunnelreibung: Die Zonen in Türkis bezeichnen die Abschnitte mit hoher Reibung (Case I und II).

#### 3.3.2 Ergebnisse

Die folgenden Abbildungen 48 - 50 zeigen den Druck bei verschiedenen Messstellen im Tunnel.

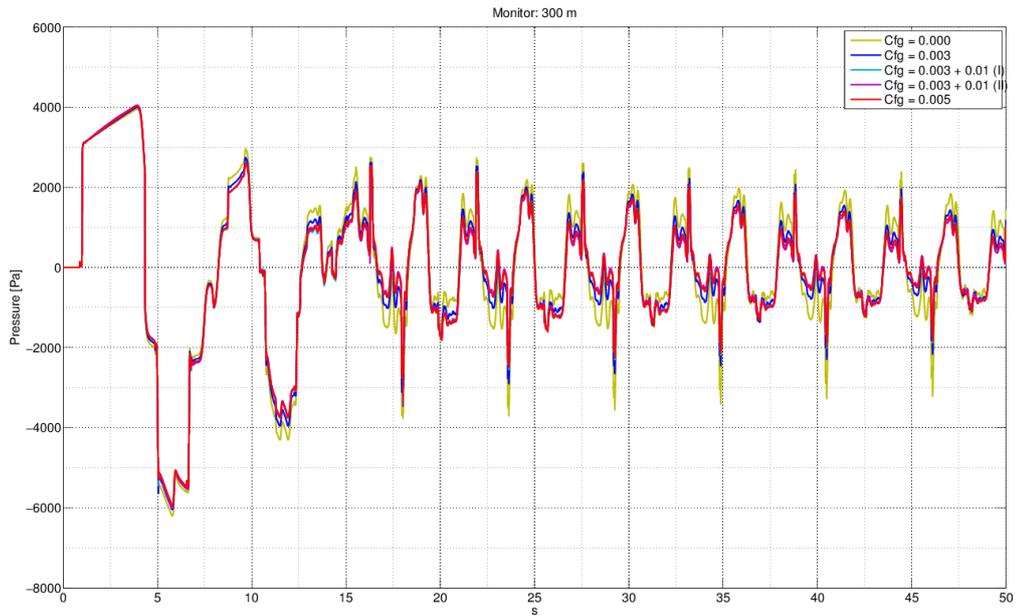


Abbildung 48: Vergleich Tunnelrauigkeit: Druck bei 300 m

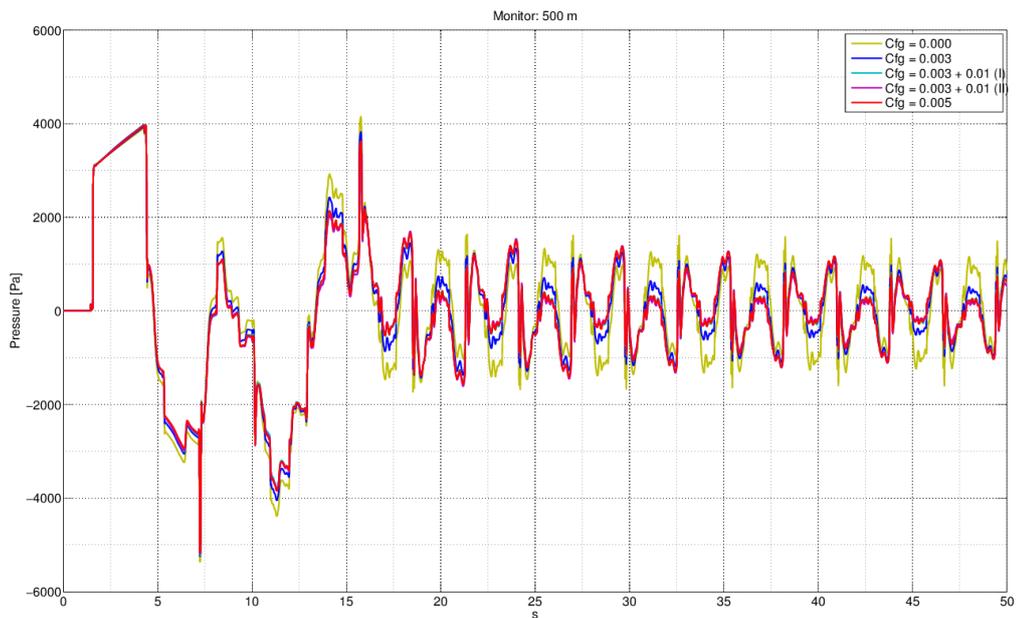


Abbildung 49: Vergleich Tunnelrauigkeit: Druck bei 500 m

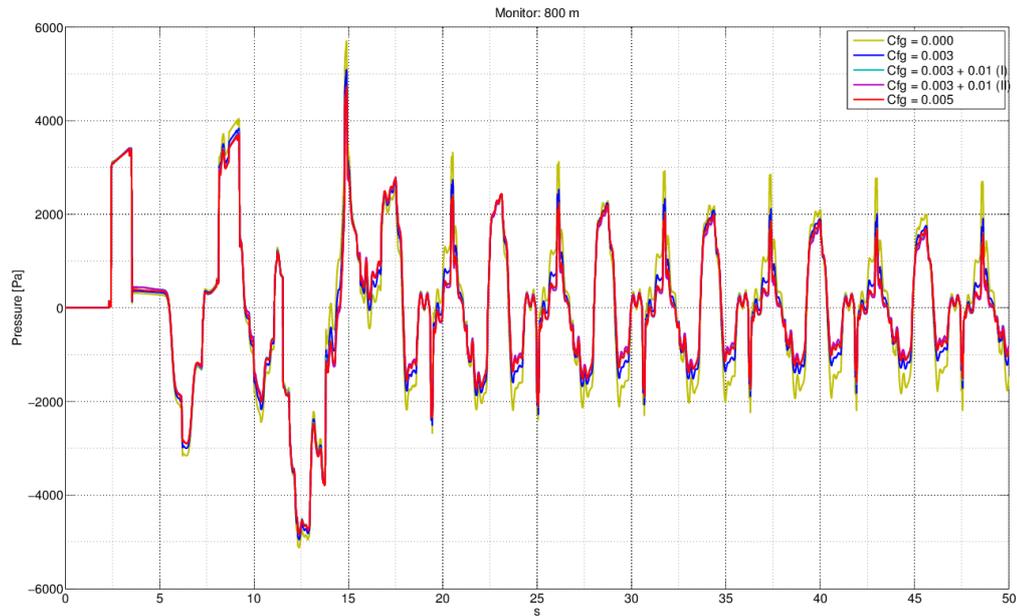


Abbildung 50: Vergleich Tunnelrauigkeit: Druck bei 800 m

Die Erhöhung der Tunnelrauigkeit erhöht primär die Dissipation der Druckamplitude nach der ersten Reflexion der Kopfwelle. Die zusätzliche Erhöhung des Reibungsanstiegs des Drucks ist bei den gewählten Reibungskoeffizienten zwar grundsätzlich vorhanden aber von geringem Betrag. Die abschnittsweise Erhöhung des Reibungskoeffizienten an den Tunnelportalen ( $C_{fg} = 0.003 + 0.01$  – Case I und Case II) hat eine vergleichbare Wirkung auf die Erhöhung der Dissipation wie die Erhöhung von  $C_{fg} = 0.003$  auf  $0.005$  über die komplette Tunnellänge. Dies spiegelt sich auch in den Extremwerten des Drucks während der Zugdurchfahrt und während des Abklingvorgangs wider, siehe Abbildung 51.

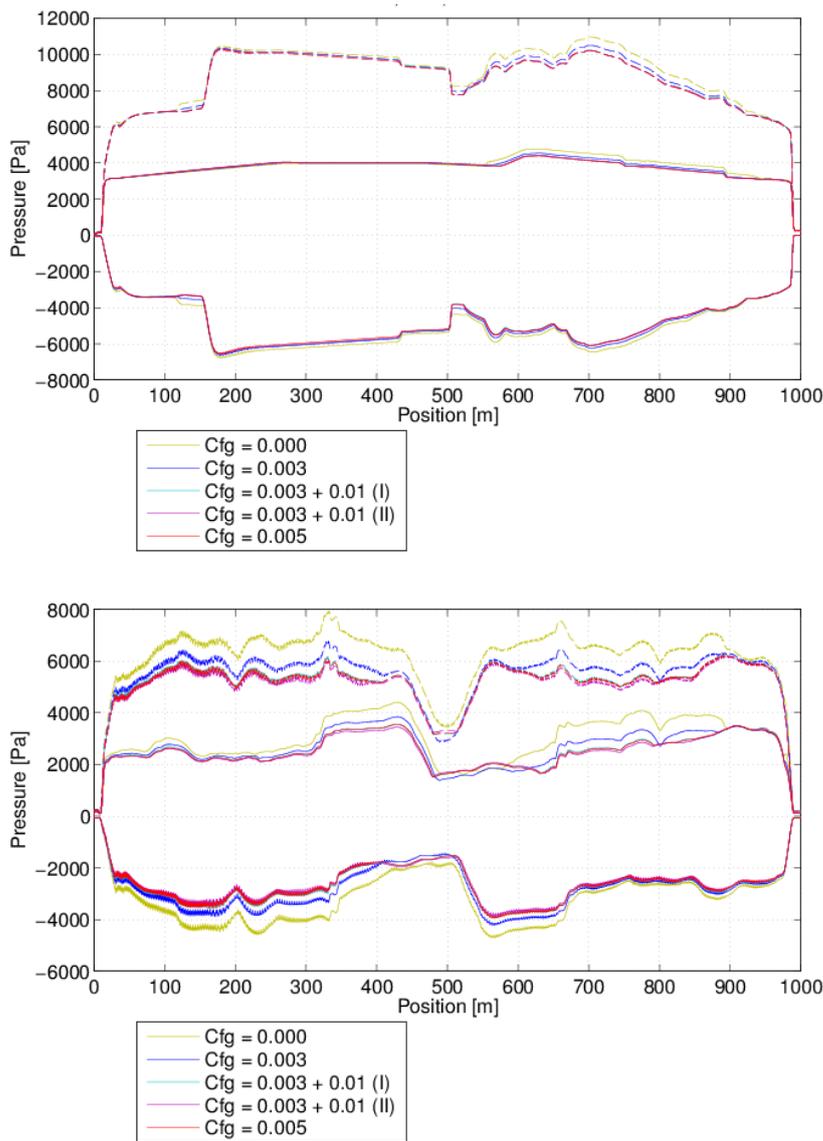


Abbildung 51: Vergleich Tunnelrauigkeit; maximaler und minimaler Druck im Tunnel, sowie Differenz der Extremwerte (- - -): Zugdurchfahrt (oben), Abklingvorgang (unten)

### 3.4 Abklingvorgang im kurzen Tunnel unter Einfluss der Rauigkeit

Der Abklingvorgang, nach Ausfahrt des Zugs, kann beispielsweise durch die Zeit beschrieben werden, in der der Schalldruck auf ein Zehntel des Anfangsdrucks abgefallen ist, der Schalldruckpegel ist dann 20 dB abgefallen.

Die Abklingzeiten wurden bei 800 m durch Mittelwertbildung von Fits einer Exponentialfunktion durch die Maxima und Minima des Druckverlaufs bestimmt, siehe Abbildung 52. Im als Standard angenommenen Fall von  $C_f = 0.003$  sieht man, dass die Abklingzeit tendenziell mit der Tunnelquerschnittsfläche und Zuggeschwindigkeit zunimmt (max 6%). Zwischen  $C_f = 0.003$  und  $C_f = 0.003 + 0.01$  (Fall II) ( $38 \text{ m}^2$  Tunnel,  $250 \text{ km/h}$ ) reduziert sich die Abklingzeit um 17%. Ohne Reibungseffekte der Tunnelwand geben die der laufenden Welle ihre Energie nur durch die Portale an die Umgebung ab, die Abklingzeit ist ungefähr doppelt so lange wie bei  $C_f = 0.003$ .

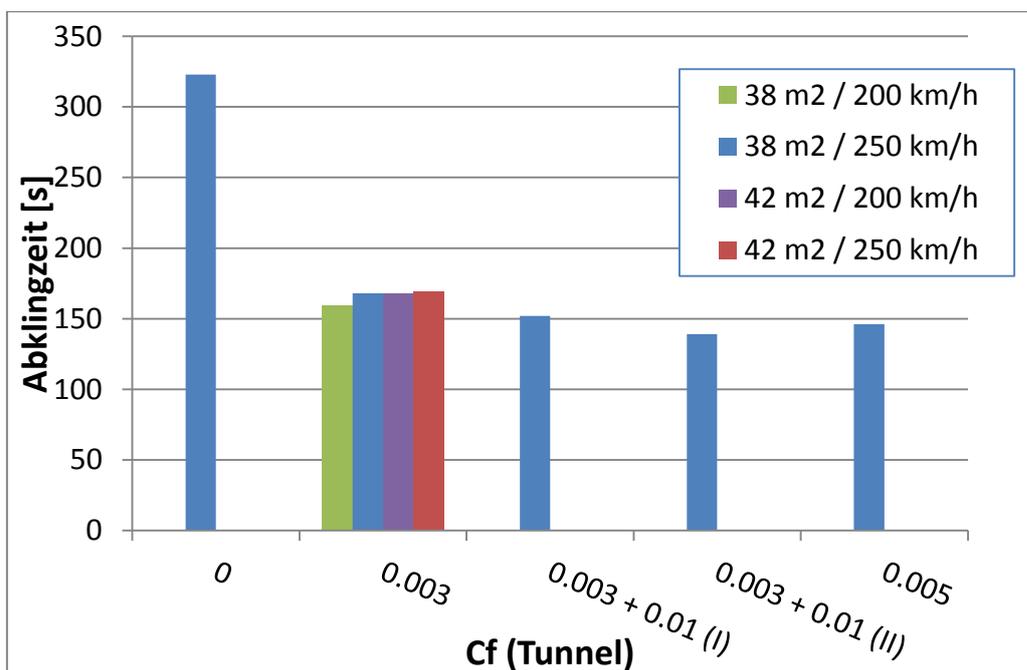


Abbildung 52: Abklingzeiten im kurzen Tunnel

### 3.5 Langer Tunnel 1 (10 km)

#### 3.5.1 Simulationsmatrix

Folgende Konfigurationen des langen Tunnels wurden untersucht:

	Länge	Fläche	Reibungskoeffizient	Geschwindigkeit
<b>Zug</b>	200 m	12 m <sup>2</sup>	0.003	250 km/h
<b>Tunnel</b>	9900 m + 2*50 m Umgebung	38 m <sup>2</sup> 42 m <sup>2</sup>	0.003	

Es wurden wiederum die Zeit/ Lage Druck- plots dargestellt. Bei 250 km/h beträgt die Durchfahrt 144 s. Aufgrund der langen Rechenzeit wurde hier nur bis 50 sec Durchfahrtszeit gerechnet, wo bereits die Einfahrwellen von Spitze und Heck wiederum auf den fahrenden Zug getroffen sind.

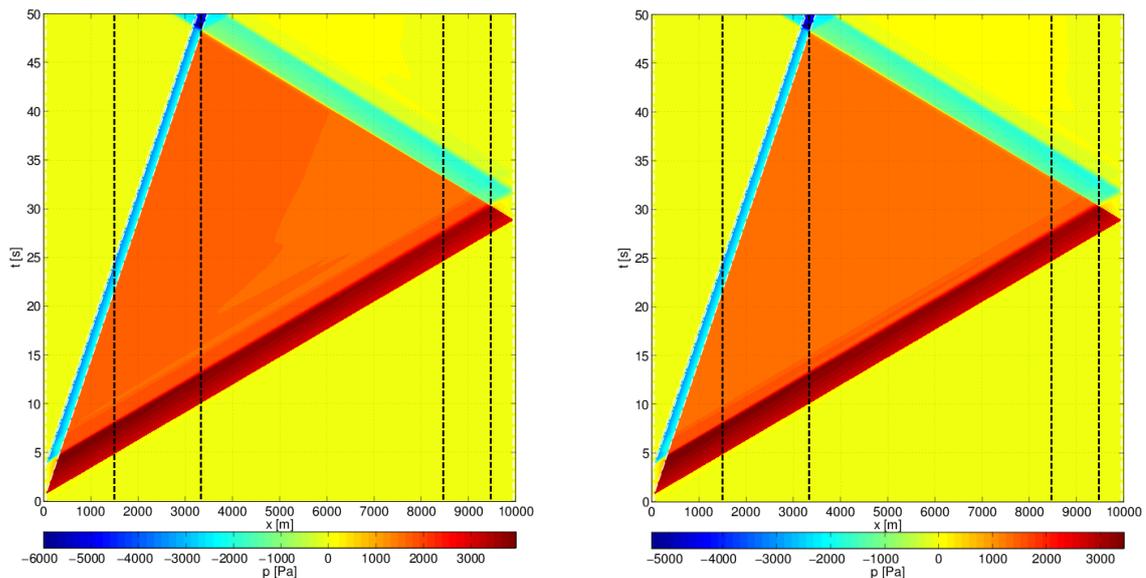


Abbildung 53: Drucksignal über Tunnellänge und Zeit, für 38 m<sup>2</sup> (links) und 42 m<sup>2</sup> Tunnel (rechts) bei  $V = 250$  km/h. Die gestrichelten Linien markieren die in Abbildung 54 dargestellten Positionen.

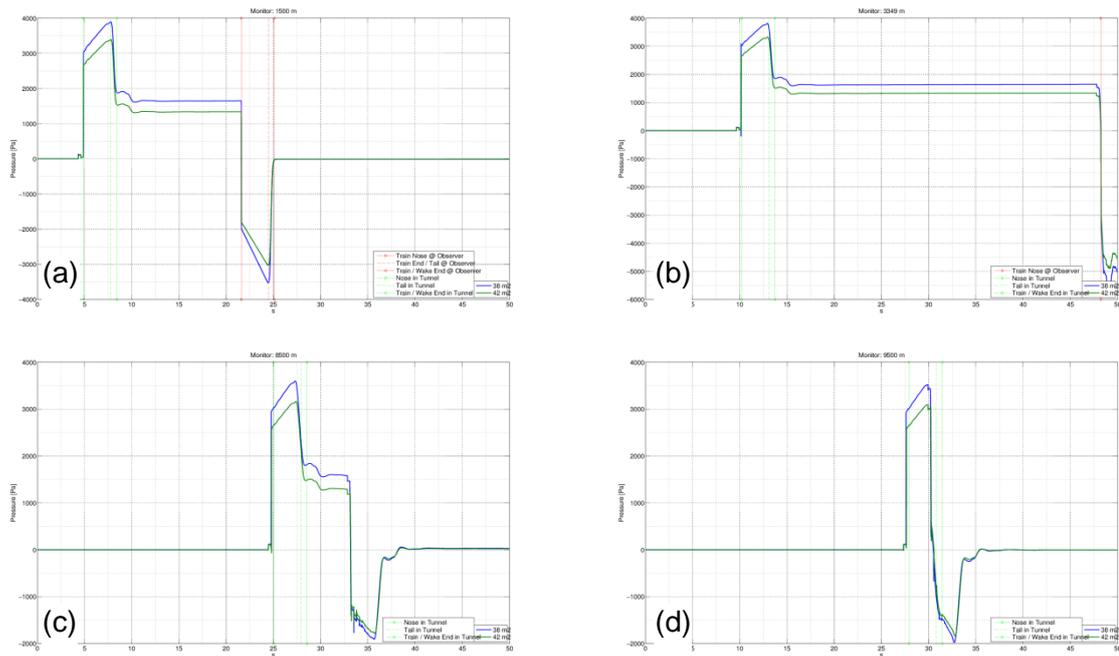


Abbildung 54: Vergleich der Tunnelquerschnittsfläche: Drucksignal bei (a) 1500 m, (b) 3349 m, (c) 8500 m, (d) 9500 m. Blau: 38 m<sup>2</sup>, grün: 42 m<sup>2</sup>

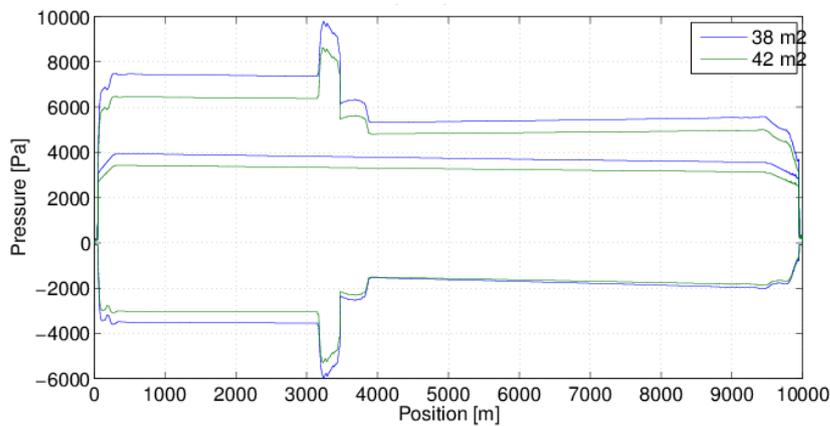


Abbildung 55: Maximal- und Minimaldruck sowie Differenz der Extremwerte (oberste Kurven) bei  $V = 250$  km/h, bis zum Zeitpunkt des Eintreffens der reflektierten Kopfwelle am Zugkopf

Aus Abbildung 55 ergibt sich, dass eine Erhöhung der Tunnelquerschnittsfläche von 38 m<sup>2</sup> auf 42 m<sup>2</sup> den Maximal-/Minimaldruck im Tunnel um 13% bzw. 11% verringert, sehr ähnlich wie im Fall des 1 km Tunnels. Der Maximaldruck bei ca. 300 m ist vergleichbar mit dem Maximaldruck an derselben Stelle im 1 km Tunnel (ca. 4 kPa für 38 m<sup>2</sup> und 250 km/h),

während der Minimaldruck, bedingt durch Dissipation aufgrund der Wandreibung über die deutlich längere Distanz, für beide Tunnelquerschnittsflächen um etwa 10% geringer ist.

### 3.6 Langer Tunnel 2 (35 km)

#### 3.6.1 Simulationsmatrix

	Länge	Fläche	Reibungskoeffizient	Geschwindigkeit
<b>Zug</b>	200 m	12 m <sup>2</sup>	0.003	200 km/h
				250 km/h
<b>Tunnel</b>	34900 m +	38 m <sup>2</sup>	0.003	
	2*50 m	44 m <sup>2</sup>		
	Umgebung			

Laufzeit der Simulation: 115 s Realzeit. Die Kopfeinfahrwelle wurde am Tunnelausgang reflektiert und läuft als Expansionswelle im Tunnel zurück. Abbildung 56 zeigt den Maximaldruck, bestimmt durch die vorlaufende, sich abschwächende Kompressionswelle der Kopfeinfahrt sowie den Minimaldruck, der im Bereich des linken Tunnelportal durch den Zug bestimmt wird und im Bereich des rechten Tunnelportal von der rücklaufenden Expansionswelle (Reflexion der Kopfeinfahrwelle).

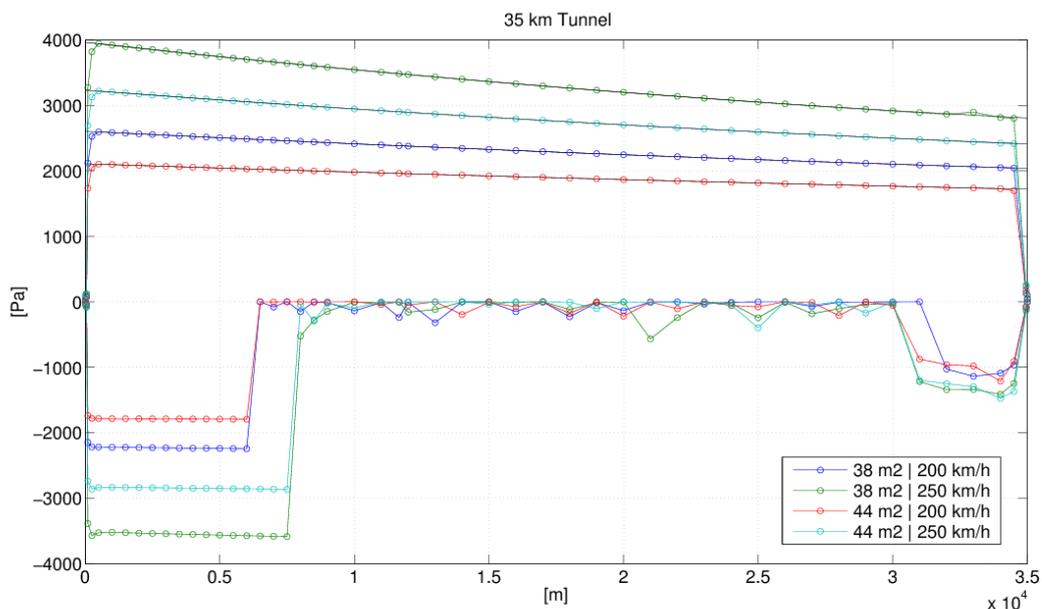


Abbildung 56: Maximal und Minimal-Druck an den Messpositionen im Tunnel bis T = 115s.

### Maximaldruck:

Das Maximum des Maximaldrucks tritt bei 500 m auf und liegt zwischen 2 und 4 kPa.

Steigerung um

etwa +52% von 200 km/h auf 250 km/h (für beide Tunnel)

etwa +23 % von 38 m<sup>2</sup> auf 44 m<sup>2</sup> (für beide Geschwindigkeiten)

Aufgrund der Tunnelrauigkeit wird die Kopfeinfahrwelle während ihrer Propagation zum Tunnelausgang abgeschwächt und weist einen **Druckabfall** auf, der sich durch eine quadratische Funktion annähern lässt. In Tabelle 11 ist der Druckabfall pro km nach 1, 10, 20 und 30 km sowie über eine Länge von 30 km wiedergegeben.

Tabelle 11: Druckabfall der Kopfeinfahrwelle pro km

Tunnel	38 m <sup>2</sup>					44 m <sup>2</sup>				
	1. km [Pa/km]	10. km [Pa/km]	20. km [Pa/km]	30. km [Pa/km]	auf 30 km [Pa]	1. km [Pa/km]	10. km [Pa/km]	20. km [Pa/km]	30. km [Pa/km]	auf 30 km [Pa]
200 km/h	-20	-16	-15	-13	-497	-13	-12	-11	-9	-340
250 km/h	-44	-38	-31	-24	-1033	-30	-26	-22	-18	-728

### Minimaldruck (im Bereich des Zugs, bis 10 km):

Verhältnisse sind ähnlich wie beim Maximaldruck:

etwa +60% von 200 km/h auf 250 km/h (für beide Tunnel)

etwa -25 % von 38 m<sup>2</sup> auf 44 m<sup>2</sup> (für beide Geschwindigkeiten)

### Minimaldruck (im Bereich des Tunnelausgangs, ab 30 km):

Ist nicht primär von einfallendem Druck und Querschnittsfläche abhängig, eher der von Geschwindigkeit des Zugs.

Dies deutet auf Nichtlinearitäten in der Wellenausbreitung und im Reflexionsverhalten am Tunnelausgang hin. Tatsächlich zeigen die Simulationen, dass im Bereich vor dem Tunnelausgang die Luft in Richtung Tunnelausgang strömt. Vor der Reflexion liegt die Strömungsgeschwindigkeit zwischen 4 und 7 m/s und steigt nach der Reflexion auf 6 bis 10 m/s an, mit einem Maximum am Tunnelportal von bis zu 12 m/s, siehe Abbildung 57.

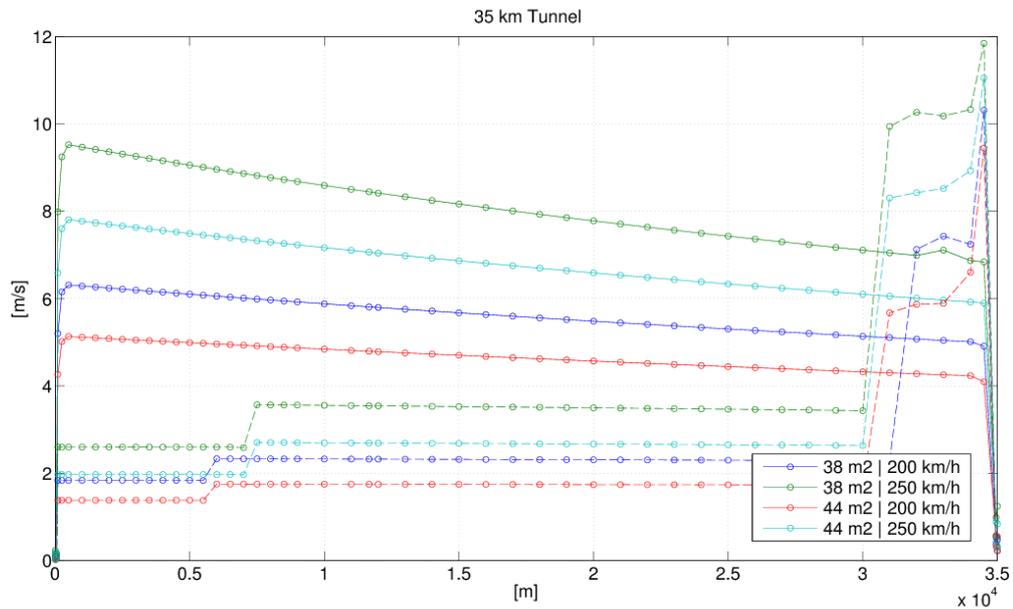


Abbildung 57: Maximale Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Tunnel bis die Einfahrwelle den Tunnelausgang erreicht, sowie nach Reflexion (- - -)

Die Bewertung der Maßnahmen wird gemeinsam mit den Versuchsergebnissen zusammenfassend im Kapitel 6 dargestellt.

# Optimierung der Tunnelaerodynamik für Hochgeschwindigkeitsstrecken OPTUNAMIK

## ERGEBNISBERICHT AP3 Strukturdynamische Untersuchung

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2014)

**AutorInnen:**

**Dr. Stefan LACHINGER**

**Dr. Alois VORWAGNER**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

## 4 STRUKTURDYNAMISCHE BERECHUNGEN

Dieser Bericht umfasst die Ergebnisse welche im Rahmen von Arbeitspaket 3 des Projekts OPTUNAMIK durchgeführt wurden und beinhalten die Erhebung der strukturdynamischen Auswirkungen von Zugsvorbeifahrten auf Tunnelausrüstungsgegenstände am Beispiel „Notausgangstüre von Querschlägen“.

### 4.1 Methodik & Modell

Eine Aussage betreffend Auswirkung der Drucksignatur auf Ausbauteile und deren Einfluss auf die Lebensdauer auf Basis der Druckwelle allein ist im Allgemeinen unzureichend, da bei dynamischen Lasten strukturdynamische Eigenschaften einen essentiellen Einfluss auf die auftretende Belastung haben können. Durch die zeitlich veränderten Lasten können dynamische Erhöhungen der Einwirkungen auftreten, welche in der Bemessung einen wesentlichen Einfluss haben. Entscheidend ist es vor allem welche betrachteten Eigenfrequenzen die Bauteile besitzen und wie sie bei der Zugsvorbeifahrt und folgendem Abklingen der Druck/ Sog – Kurve angeregt werden. Notausgangstüren in Tunnelquerschlägen von eingleisigen Eisenbahntunnels werden durch Zugsvorbeifahrt einer starken dynamischen Druckbelastung ausgesetzt. Dieses Bauteil wurde ausgewählt um exemplarisch die Auswirkung unterschiedlicher Tunnelkonfigurationen im Tunnel mit Hinblick auf die dynamische Strukturantwort zu untersuchen und darzustellen.

Als Eingangsparameter in die Analyse dienen ausgewählte Ergebnisse aus der CFD-Rechnung (AP2) als aber auch aus der versuchstechnischen Validierung (AP 4).

#### 4.1.1 Festgelegte Methode

Die generisch festgelegte Notausgangstür (siehe Abschnitt **1.1.6 Tunneltür**) wurde im Finite Elemente (FE) - Programm „Ansys®“ modelliert. In einer transienten FE-Simulation wurden die zuvor in AP2 und bzw. versuchstechnisch im AP 4 ermittelten Druckverläufe als Belastung auf das Türmodell aufgebracht und analysiert. Mittels numerischer Berechnungen im Zeitbereich wurden im Anschluss die Spannungen und Verformungen an der Tür berechnet. Der ermittelte Spannungsverlauf wurde im kritischen Befestigungspunkt ausgewertet.

Ein Vergleich der ermittelten Spannungen für unterschiedliche Tunnelkonfigurationen zeigte die Auswirkung der entwickelten Vorschläge aus strukturdynamischer Sicht. Dabei wurden unterschiedliche Eigenfrequenzen der Tür betrachtet.

An den kritischen Detailpunkten der Befestigungen und Aufhängungen (Scharniere, etc.) wurden die Spannungsverläufe extrahiert um dann später mit Schadensakkumulation nach Palmgren- Miner die ermüdungsrelevanten Spannungszyklen berücksichtigt.

#### 4.1.2 Geometrie und Randbedingungen.

Da ein definitives Türmodell nicht fixiert wurde und um die Berechnungen Herstellerunabhängig zu gestalten, wurde gemeinsam mit der Projektbetreuung seitens der ÖBB eine künstliche Tür – angelehnt an reale Konstruktionen – festgelegt und dessen Parameter sind im Abschnitt 1.1.6 **Tunneltür** geregelt.

## 4.2 FE- Modellierung

Modelliert wurden zwei unterschiedliche Türmodelle unter Verwendung von Schalenelementen in ANSYS. Einerseits ein detailliertes Modell mit modellierter Unterkonstruktion und Dämmeigenschaften, andererseits ein vereinfachtes Modell mit monolithischem Türblatt, welches eine schnellere Berechnung ermöglichte. Beide Modelle zeigten eine gute Übereinstimmung in den Ergebnissen. In Abbildung 58 ist das Modell mit modellierter Unterkonstruktion entsprechend der mit der ÖBB vereinbarten Skizze (siehe Abbildung 8) dargestellt.

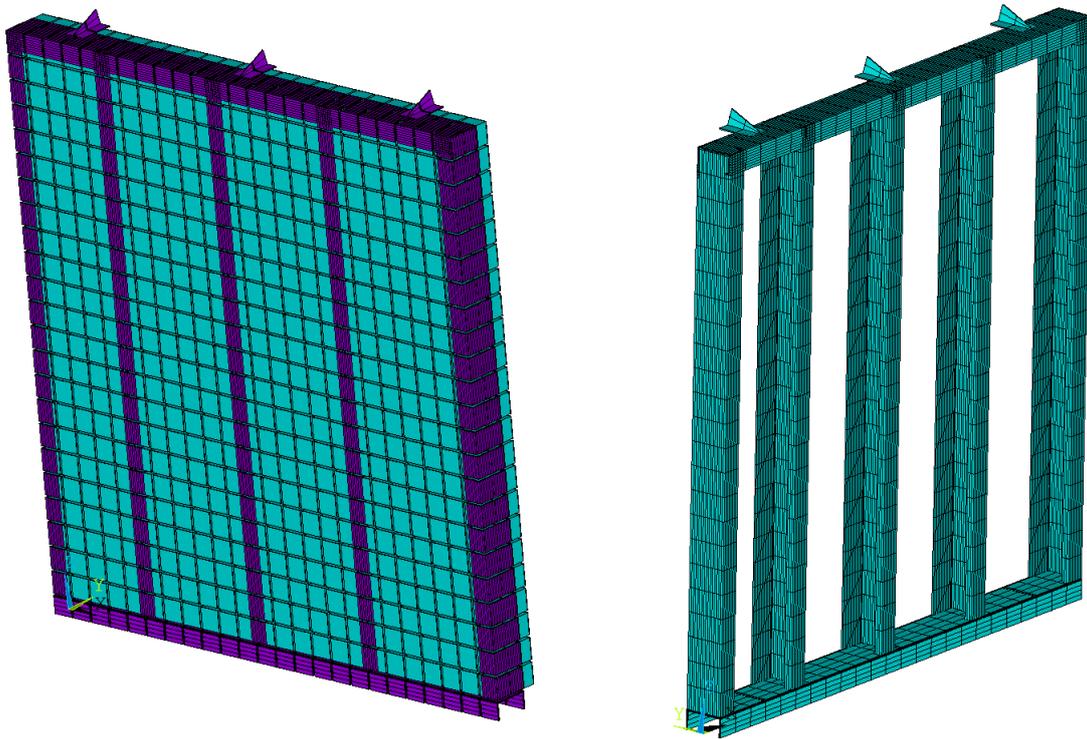


Abbildung 58: ANSYS Modell Notausgangstüre. Links vollständiges Modell; Rechts Rahmenstruktur

Berechnet wurden jeweils vier unterschiedliche Parametersätze, welche unterschiedliche Eigenfrequenzen der Tür repräsentieren. Berechnet wurden Türen mit ersten Eigenfrequenzen von 28, 38, 57 und 76 Hz. Dieser Bereich der ersten Eigenfrequenz deckt sich mit seitens ÖBB übermittelten Messungen an realen Notausgangstüren. Beim detaillierten Modell wurde hierzu jeweils die Dichte des in den Hohlräumen liegenden Isoliermaterials geändert, während beim einfachen Modell jeweils der Elastizitätsmodul des Türmaterials variiert wurde. Die wesentlichen Parameter sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Maßgebliche Parameter Türmodelle

Modell	Wert	$F_1=28$ Hz	$F_1=38$ Hz	$F_1=57$ Hz	$F_1=76$ Hz
Detailliert	E-Modul Isolierung [N/m <sup>2</sup> ]	$15 \times 10^6$	$15 \times 10^6$	$15 \times 10^6$	$15 \times 10^6$
	Dichte Isolierung [kg/m <sup>3</sup> ]	3000	1500	500	140
	Dicke Stahlprofile [mm]	6	6	6	6
	Dicke Abdeckblech [mm]	2	2	2	2
Einfach	E-Modul Türblatt [N/m <sup>2</sup> ]	$350 \times 10^6$	$620 \times 10^6$	$1,40 \times 10^9$	$2,45 \times 10^9$

Dicke Türblatt [mm]	200	200	200	200
---------------------	-----	-----	-----	-----

Als Belastung für die Zeitverlaufsrechnungen wurden die aus den 3D CFD-Berechnungen bzw. Versuchen an der Tunnelsimulationsanlage in Göttingen ermittelten Druckverläufe auf das Türblatt aufgebracht. Als Ergebnisse wurden die sich ergebenden Haltekräfte in den Befestigungspunkten (drei oben, drei unten) extrahiert.

Die modalen Eigenformen zeigten bei allen vier untersuchten Konfigurationen sowohl bei der detaillierten, als auch der einfachen Modellierung eine grundsätzlich eine vergleichbare Ausbildung, wobei sich bei der detaillierten Modellierung die modellierte Unterkonstruktion aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnisse in den Eigenformen abzeichnet, wie ein Vergleich der Abbildungen 59 und 60 zeigt.

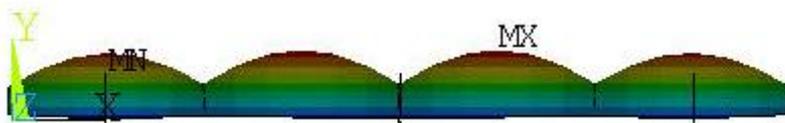


Abbildung 59: Erste Eigenform des detaillierten Modells. Horizontaler Schnitt in Türmitte



Abbildung 60: Erste Eigenform des einfachen Modells. Horizontaler Schnitt in Türmitte

### 4.3 Ergebnisse

Berechnet wurden Drucksingnaturen ausgewählter 3-CFD-Analysen mit beiden Modellen sowie alle vier Eigenfrequenzen. Die Ergebnisse der Tunnelsimulationsanlage in Göttingen wurden, um die Rechenzeit zu minimieren, nur mit dem einfachen Modell berechnet, da sich in der Auswertung der Berechnungen mit CFD-Ergebnissen hier keine nennenswerten Unterschiede zwischen einfachen und detaillierten Modell zeigten.

Beispielhaft werden hier Ergebnisse einer 3D CFD-Berechnung am 38 m<sup>2</sup> Tunnel mit dem Railjetmodell bei 230 km/h dargestellt. Gewählt wurde die Berechnung mit ausgeschalteten Reflexionen (unendlicher Tunnel) (Vergleiche dazu Abschnitt 2.8). Gewählt wurde hier dieser

Extremfall mit ausgeschalteten Reflexionen, um den Einfluss des Nachschwingens des Bauteils möglichst gut darzustellen.

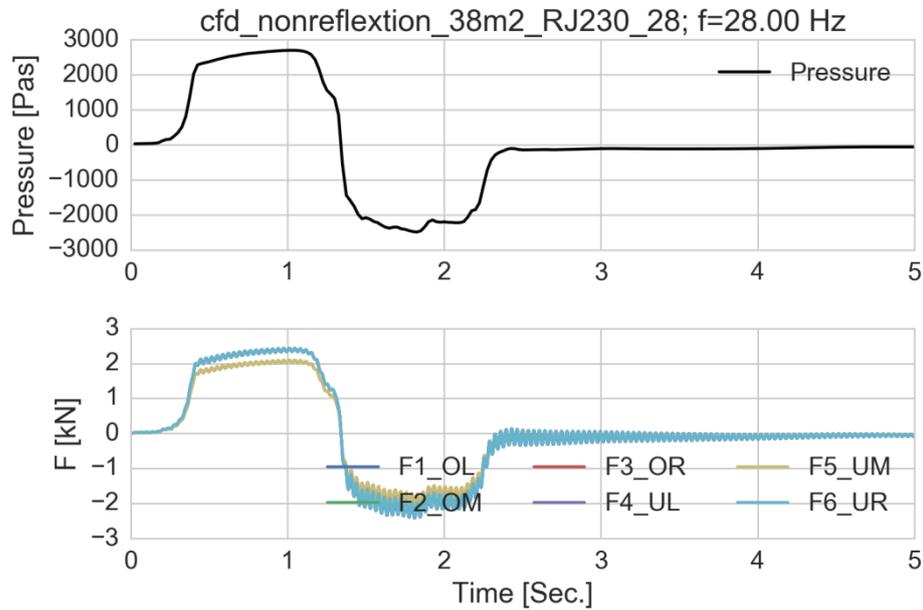


Abbildung 61: Ergebnisse der Strukturdynamischen Berechnungen. Drucksignatur aus CFD-Berechnungen für RJ mit 230 km/h.  $F_1=28$  Hz. Oben: Drucksignatur aus CFD-Berechnung; Unten: Resultierende Kräfte in Aufhängungen bzw. Verriegelungen

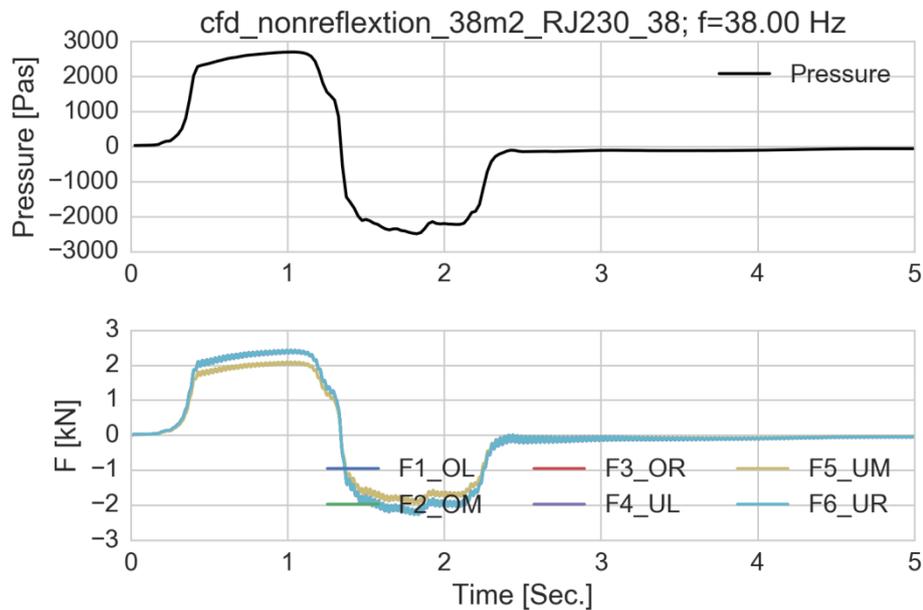


Abbildung 62: Ergebnisse der Strukturdynamischen Berechnungen. Drucksignatur aus CFD-Berechnungen für RJ mit 230 km/h.  $F_1=38$  Hz. Oben: Drucksignatur aus CFD-Berechnung; Unten: Resultierende Kräfte in Aufhängungen bzw. Verriegelungen

Resultierende Kräfte in Aufhängungen bzw. Verriegelungen

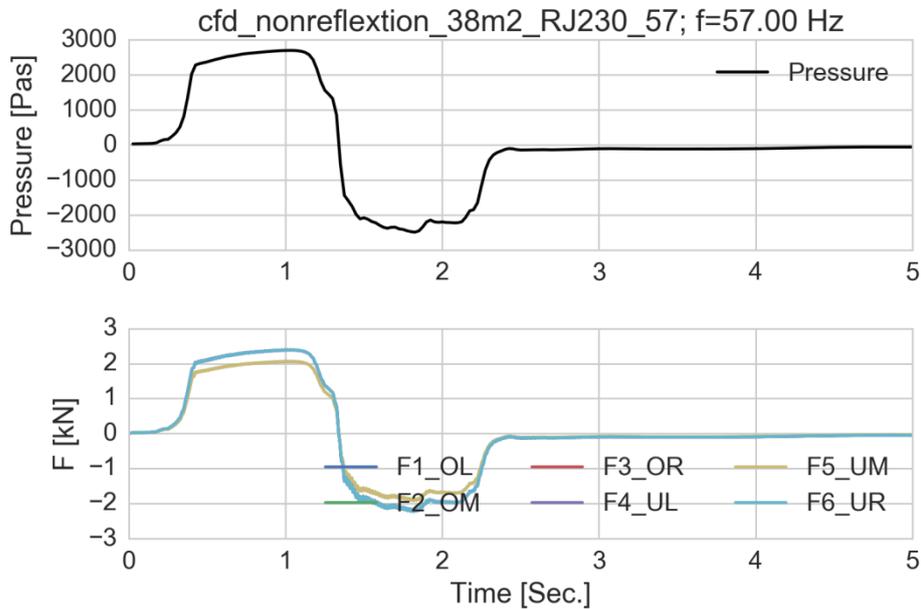


Abbildung 63: Ergebnisse der Strukturdynamischen Berechnungen. Drucksignatur aus CFD-Berechnungen für RJ mit 230 km/h.  $F_1=57$  Hz. Oben: Drucksignatur aus CFD-Berechnung; Unten: Resultierende Kräfte in Aufhängungen bzw. Verriegelungen

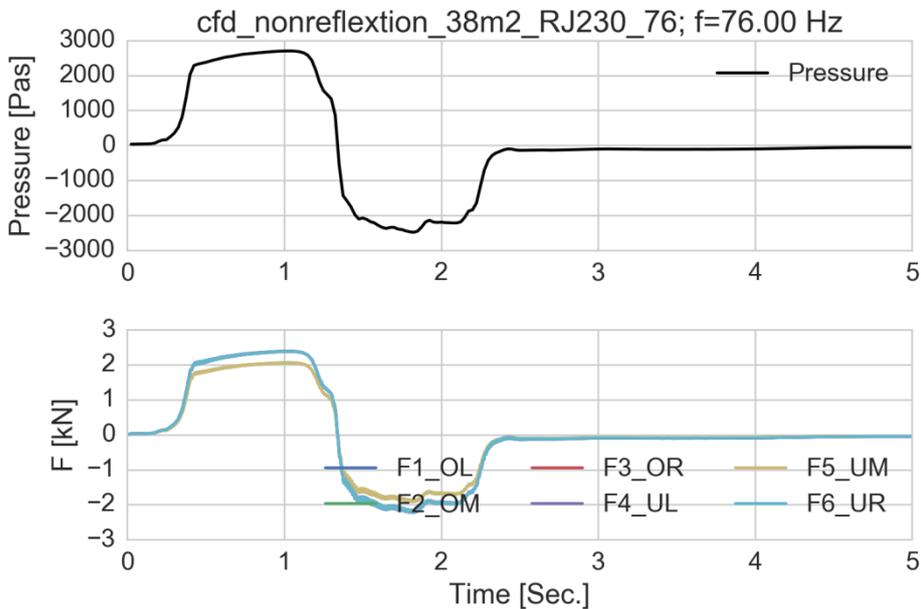


Abbildung 64: Ergebnisse der Strukturdynamischen Berechnungen. Drucksignatur aus CFD-Berechnungen für RJ mit 230 km/h.  $F_1=76$  Hz. Oben: Drucksignatur aus CFD-Berechnung; Unten: Resultierende Kräfte in Aufhängungen bzw. Verriegelungen

In den Abbildungen 61 - 64 ist jeweils die einwirkende Drucksignatur des berechneten Ereignisses im oberen Diagrammteil dargestellt. Der untere Diagrammteil zeigt die ermittelten Kräfte in den Aufhängungen (F1 bis F3) bzw. den Verriegelungen (F4 bis F6). Der Vergleich der Berechnungsergebnisse zeigt, dass die Reaktion der Struktur der Druckbelastung folgt. Bei der niedrigen Türeigenfrequenz von 28 Hz (siehe Abbildung 61) zeigt sich eine leichte Anregung der ersten Türeigenfrequenz, welche mit steigender Türeigenfrequenz (siehe Abbildungen 62 bis 64) immer geringer wird. Da die erste Eigenfrequenz der geschlossenen Tür in realen Fällen höherfrequent zu erwarten ist, wird für die weitere Auswertung nur diese leichte Erhöhung berücksichtigt. Es ist jedoch zu beachten, dass bei nicht festsitzenden Verriegelungen eine Starrkörperbewegung der Tür auftreten kann und die Tür (und vor allem das Befestigungsdetail) dann durch eine Stoßbelastung beansprucht wird, welche höhere Belastungen verursachen. Dies wurde im Projekt jedoch nicht betrachtet.

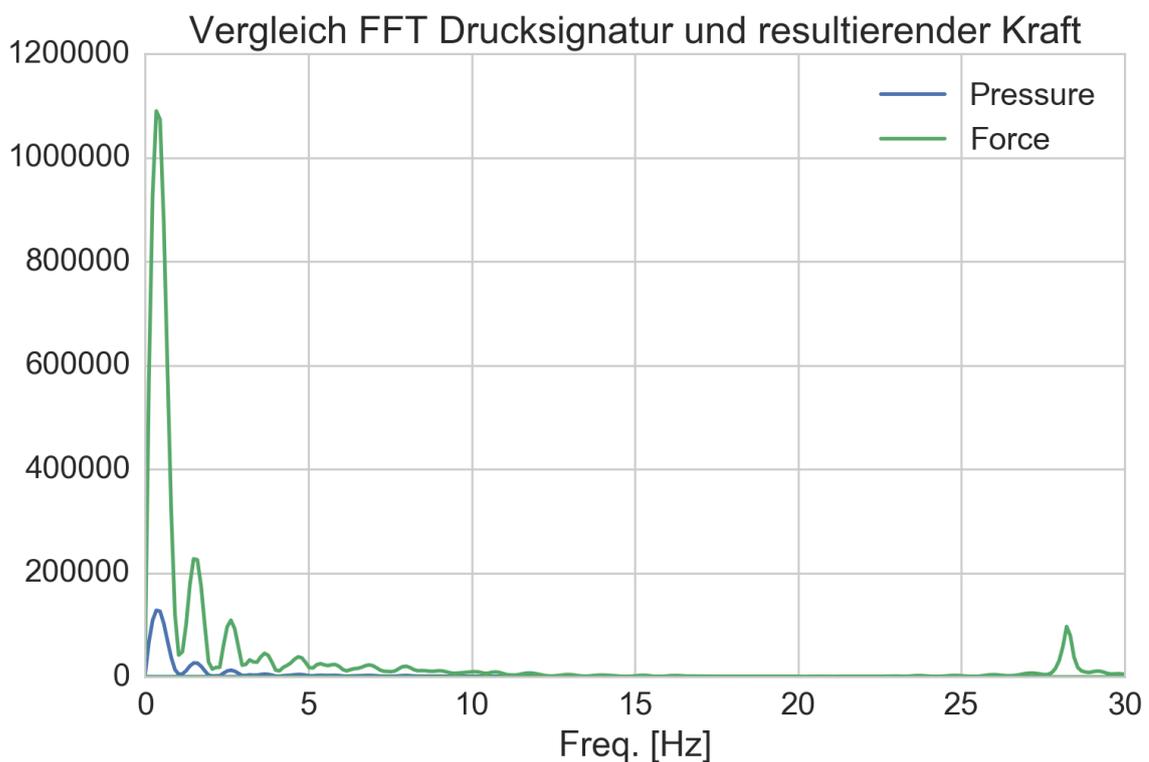


Abbildung 65: Vergleich des Frequenzspektrums (FFT) der Drucksignatur aus CFD-Berechnungen für RJ mit 230 km/h mit dem resultierenden Kraftverlauf der mittleren Befestigung für die Tür mit  $F_1=28$  Hz.

In Abbildung 65 ist ein Vergleich der Frequenzspektren (Absolutwerte) nach einer Fast Fourier Transformation (FFT)-Analyse von Druckeinwirkung und Reaktionskraft (exemplarisch für den mittleren Befestigungspunkt) für die Tür mit  $F_1=28$  Hz dargestellt. Abgesehen von der unterschiedlichen Skalierung, sind die Spektren fast ident. Nur bei der Frequenz  $F=28$  Hz, welches der ersten Eigenfrequenz des Türblattes entspricht, zeigt sich die bereits in Abbildung 61 sichtbare leichte Anregung als Peak im Frequenzspektrum, welcher in der Anregung jedoch nicht auftritt, da Erreger und Eigenfrequenzen weit genug auseinanderliegen. Die Amplitude dieses Peaks ist im Vergleich zu den Maximalamplituden gering und im Bereich von 10% der Maximalamplitude im Spektrum.

Im Vergleich dazu, zeigt Abbildung 66 die entsprechende Abbildung für die Tür mit  $F_1=36$  Hz. Entsprechend zeigt sich hier der Peak bei der Frequenz  $F=36$  Hz. Hier jedoch mit deutlich geringerer Amplitude als in Abbildung 65. Dies entspricht auch dem Vergleich der Abbildungen 61 und 62. Bei den Türen mit noch höherer Eigenfrequenz ist der Peak im Spektrum nur noch schwer zu identifizieren.

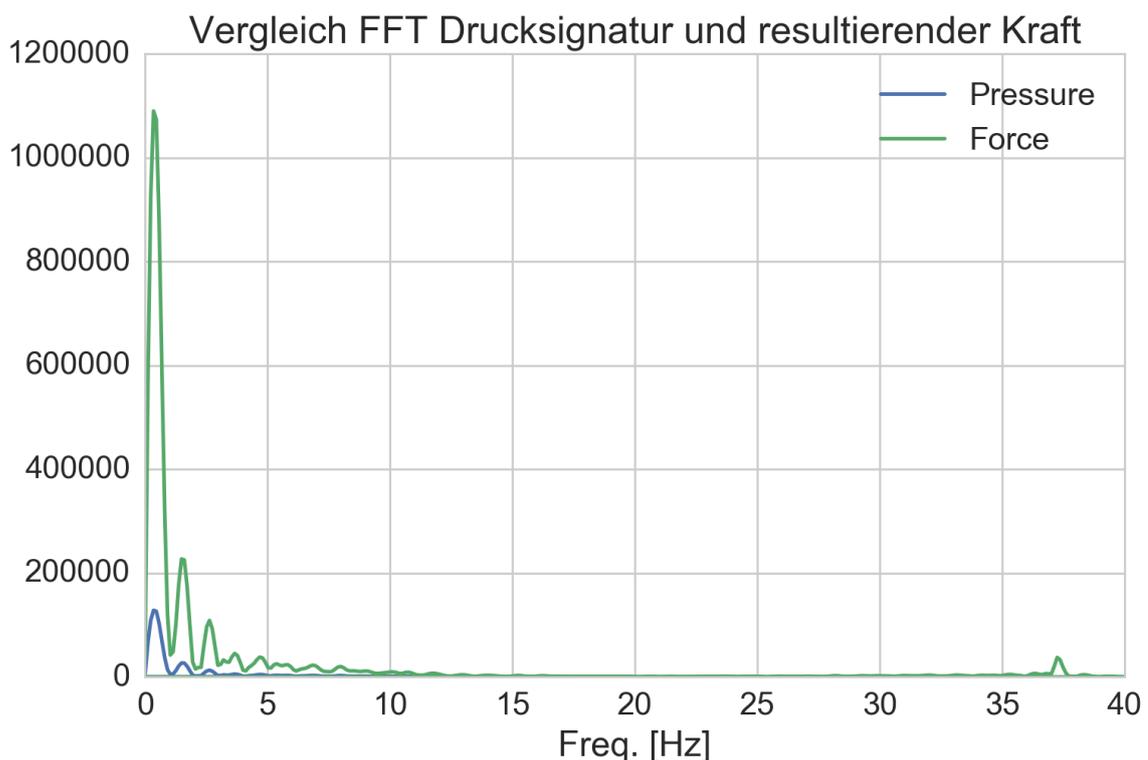


Abbildung 66: Vergleich des Frequenzspektrums (FFT) der Drucksignatur aus CFD-Berechnungen für RJ mit 230 km/h mit dem resultierenden Kraftverlauf der mittleren Befestigung für die Tür mit  $F_1=38$  Hz.

Ein Vergleichbares Verhalten zeigte sich auch bei den anderen durchgeführten Berechnungen. Basierend auf diesen Untersuchungen und unter Berücksichtigung, dass die Tür willkürlich festgelegt wurde und kein reales Produkt repräsentiert, wurde festgelegt, dass für die Lebensdauerberechnungen (siehe Abschnitt 6.2.1) die Tür quasi statisch mit der Drucksignatur und deren Abklingkurven berechnet wird und auftretende dynamische Lasterhöhungen mit einem dynamischen Lasterhöhungsfaktor von  $\varphi_{\text{dyn}}=1,1$  berücksichtigt werden.

# Optimierung der Tunnelaerodynamik für Hochgeschwindigkeitsstrecken OPTUNAMIK

## ERGEBNISBERICHT AP4 Versuchstechnische Validierung

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2014)

**AutorInnen:**

**Dr. Daniela HEINE**

**Dr. Klaus EHRENFRIED**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

## 5 VERSUCHSTECHNISCHE VALIDIERUNG

### 5.1 Übersicht über die durchgeführten Arbeiten

Die im AP4 durchgeführten Arbeiten beinhalten die Messungen der Druckverläufe in den Tunneln, speziell an der Position einer Notausgangstür. Dazu werden die beiden in AP1 definierten Tunnelmodelle und zwei Zugmodelle verwendet, von denen eines speziell erstellt wird.

### 5.2 Versuchsanlage und -aufbau

#### 5.2.1 Tunnelsimulationsanlage Göttingen (TSG)

Die experimentelle Studie wurde an der Tunnelversuchsanlage Göttingen durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine in ihrer Charakteristik weltweit einzigartige Versuchsanlage zur Untersuchung instationärer Aerodynamik bewegter, bodengebundener Verkehrsfahrzeuge. Die zu untersuchenden Modelle bewegen sich durch die Messstrecke hindurch. Aufgrund der Modellbewegung lassen sich Vorbei- und Durchfahrten untersuchen, was in konventionellen Windkanälen nur bedingt möglich ist. Die Modellgeschwindigkeit beträgt dabei je nach Modellmasse bis zu 360km/h.

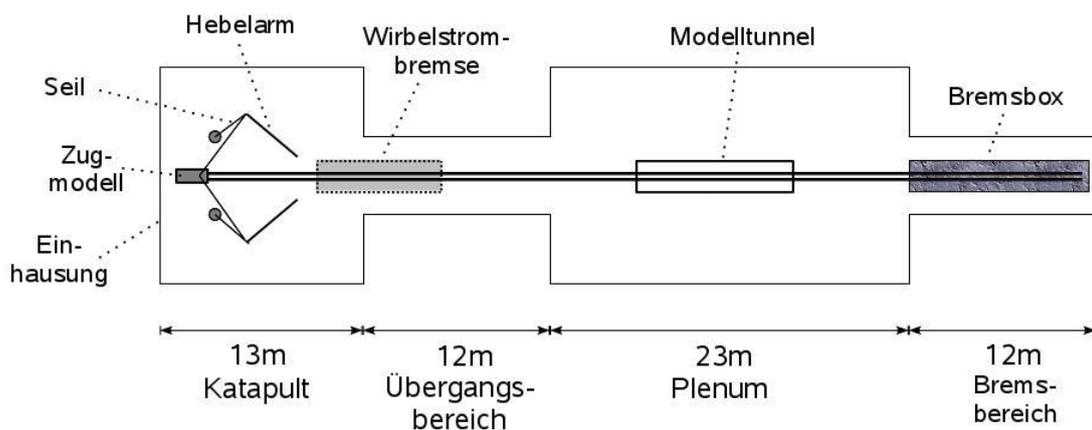


Abbildung 67: Schematische Darstellung der TSG

Die Anlage ist in Abbildung 66 in der Übersicht gezeigt. Sie besteht aus einem Katapultbereich, in dem die verwendeten Modelle mittels eines hydraulisch betriebenen Katapults beschleunigt werden. Nach Verlassen des Katapults durchfahren die Modelle den

Übergangsbereich, in sich dem mögliche Seitwärtsbewegungen des Modells, die durch das Katapult entstehen könnten, ausgleichen. In der nun folgenden, 23m langen Messstrecke kann sowohl die Umströmung des Zugs, als auch dessen Wirkung auf Auf- und Umbauten der Strecke studiert werden. Typische Beispiele sind die Lasten auf den Untergrund zur Analyse von Schotterflug oder auch die Lasten auf Menschen in Gleisumgebung. Zusätzlich und nicht in der Abbildung gezeigt existiert ein Seitenwindmodell, mit dem man instationäre und instantane Seitenwindfelder auf den fahrenden Zug aufbringen und die Folgen analysieren kann. Der Schwerpunkt der Anlage und daher auch namensgebend ist die Untersuchung der Auswirkungen von Tunneldurchfahrten, insbesondere der Druckwellen in Eisenbahntunneln.

### 5.2.2 Verwendete Zugmodelle

In den Experimenten werden zwei Zugmodelle ÖBB Railjet (RJ) und ICE3 verwendet, welche sich sowohl in Bezug auf die Querschnittsfläche, als auch die Formgebung unterscheiden. Das RJ-Modell weist zu dem bereits vorhandenen ICE3-Modell einen relativ stumpfen Kopf auf, und musste eigens für die Versuche angefertigt und für eine Maximalgeschwindigkeit von 230 km/h ausgelegt werden. Das neu zu fertigende Modell setzt sich aus 2 Teilen

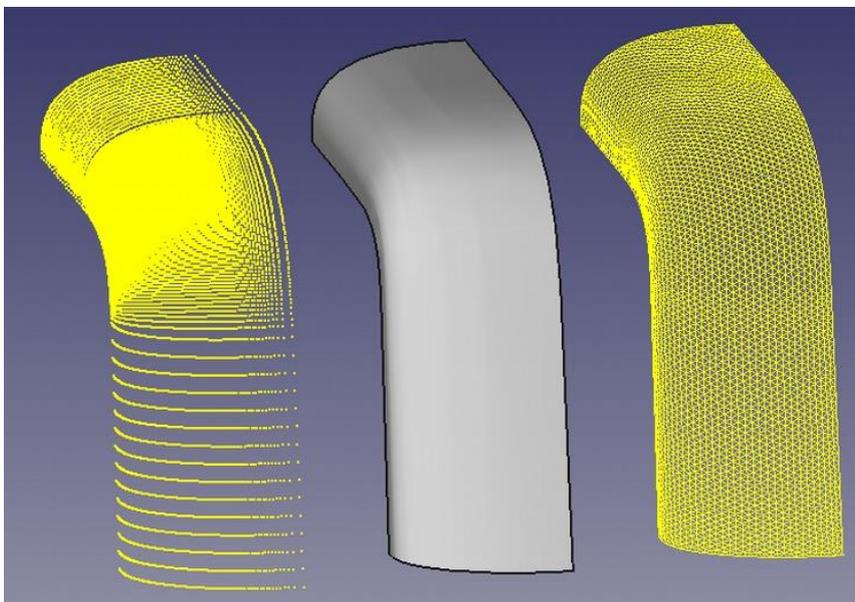


Abbildung 68: Konstruktion der Railjet-Geometrie

zusammen aus einem Unterbau oder Wagenkasten oder Träger und einer Haube bzw. Modellaufbau welche die Geometrie des RJ widerspiegelt.

Die Geometrie des Wagenkastens entspricht in Breite und Höhe etwa der des ÖBB Railjets. Sämtliche Krümmungen der Haube werden mittels Superellipsen dargestellt. Insbesondere die Geometrie des Kopfes wurde in jeder Raumrichtung aus Superellipsen konstruiert, die so entstehende Geometrie ist in Abbildung 60 dargestellt. Diese gekrümmten Flächen werden an der Mittelebene des Zugs gespiegelt und gehen an den Seiten in ebene Flächen über. Auch das Dach ist, vergleichbar mit dem Zug in Echtgröße, leicht gewölbt. Die Art der Konstruktion wurde gewählt, damit keine Krümmungssprünge auftreten, welche leicht zu Strömungsablösung führen könnten. Die Punktwolke, welche mittels der Superellipsen erzeugt wurde, ist in Abbildung 60 links zu erkennen. Aus ihr wurde mithilfe von Splines Kurven eine geschlossene Oberfläche erzeugt (Abbildung 60 mittig), auf welcher ein Netz generiert wurde (Abbildung 60 rechts, zur Anschauung hier gröberes Gitter mit ungefähr doppeltem Punktabstand). Dieses Netz definiert die dreidimensionale Oberfläche der Haube. Zusätzlich zu den gekrümmten Flächen wurde der für die Geometrie des betrachteten Zuges typische Schneepflug vereinfacht nachgebildet, durch welchen aufgrund von Ablösung oder Wirbelgenerierung die Strömung um den Zugkopf und damit auch die Wirkung desselben auf Druckwellen oder gleisnahe Objekte wie Türen maßgeblich beeinflusst werden kann. Die Geometrie des Modells wird in Form einer Haube mittels eines 3D-Druckers aus Polylactide (PLA) gedruckt, welche dann auf einem Träger befestigt wird. Der Träger ist aus Kohlefaserverbundwerkstoff gefertigt und mit Rädern ausgestattet. Diese modulare Bauweise ermöglicht einen einfachen Wechsel der untersuchten Geometrie und reduziert die Baukosten für neue Modelle. Zur Reduzierung des Modellgewichts und damit Optimierung

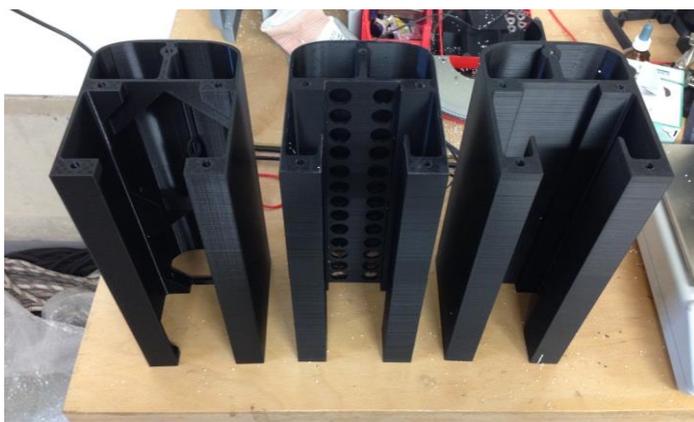


Abbildung 69: Probedrucke des Wagenkastens

der Maximalgeschwindigkeit, auf die das Zugmodell in der TSG beschleunigt werden kann, wurden verschiedene Aufbauten der Substruktur von Kopf und Wagenkästen gedruckt, getestet und analysiert. In Abbildung 61 sind drei verschiedene Wagenkästen gezeigt, welche alle die gewünschte Außengeometrie aufweisen. Von rechts nach links sinkt dabei die Masse um insgesamt ca. 40%. Das in der Graphik links gezeigte Modell weist allerdings eine zu geringe Belastbarkeit auf,

sodass Beschädigungen während des Beschleunigungs- und Bremsprozesses nicht ausgeschlossen sind. Die letztlich verwendeten Wagenkästen werden daher mit einer geringfügig erhöhten Wandstärke gedruckt.

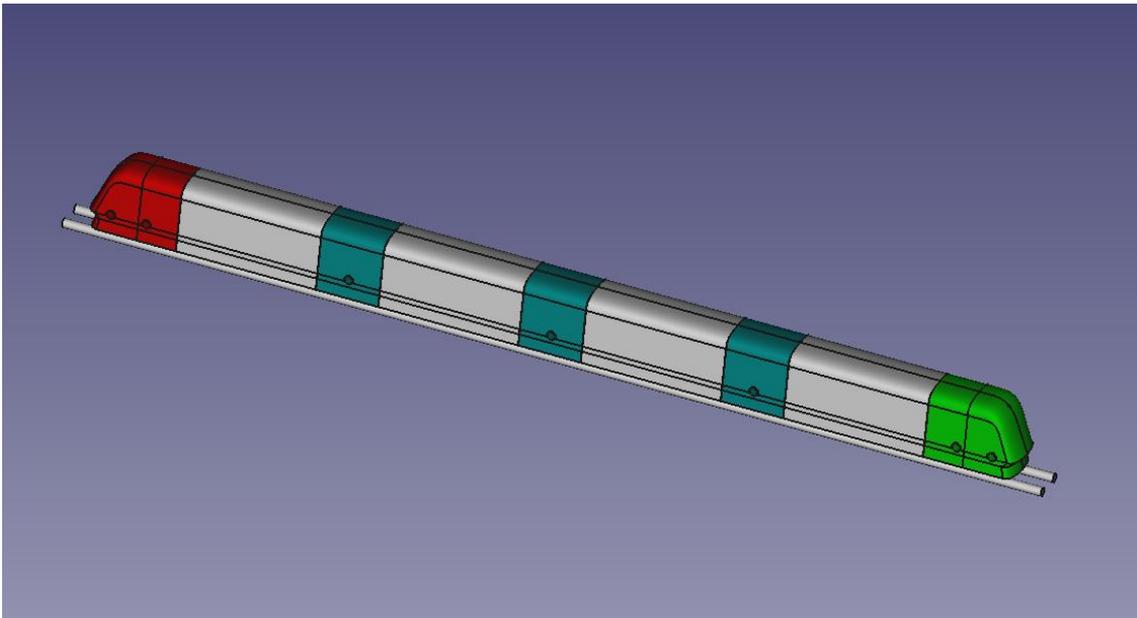


Abbildung 70: Einzelteile des Railjet-Modells

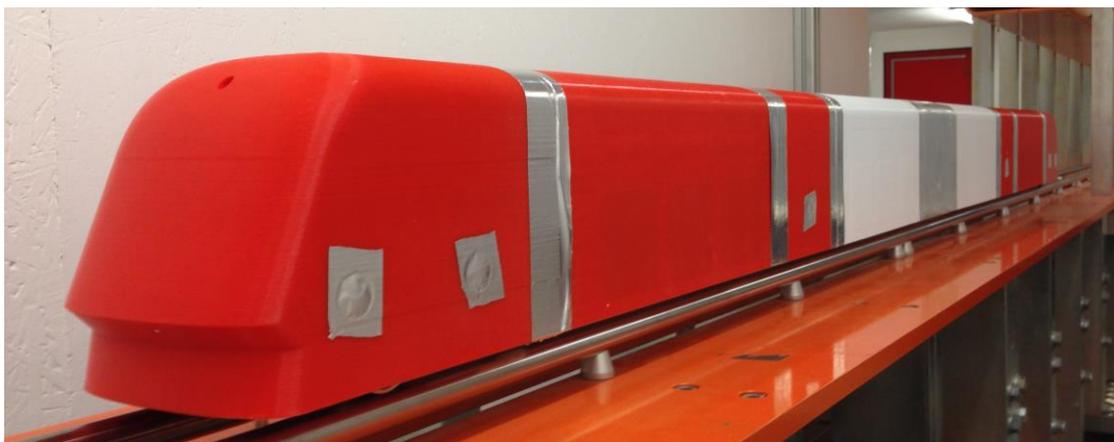


Abbildung 71: Gedrucktes und verwendetes Railjet-Modell

Die einzelnen Segmente des Zuges sind in Abbildung 69 gezeigt. In hellgrün und rot sind die Köpfe dargestellt, in grau die Wagenkästen. Die dunkelgrünen Bauteile zeigen die Teile der

Wagenkästen, welche mit dem Träger verschraubt werden. Da durch sie die wirkenden Kräfte vom Träger auf die Einzelteile übertragen werden, sind sie stabiler konstruiert als die anderen Wagenkästen. Das resultierende Zugmodell ist in Abbildung 70 gezeigt.

Es wiegt ca. 7680g, wovon 3770g auf den sich im Modellinneren befindlichen Karbonträger und die Drehgestelle entfallen. Zusätzlich zu dem ÖBB Railjet steht für die Versuche ein

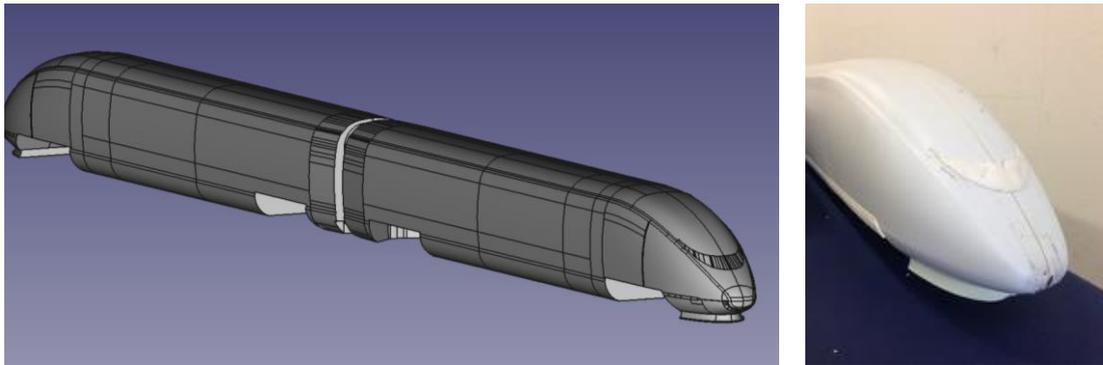


Abbildung 72: verwendetes ICE3-Modell

Modell des ICE3s zur Verfügung, welches, wie das des Railjets, im Maßstab 1:25 skaliert. Das Modell besteht aus zwei Endwagen mit einem Wagenübergang mit Einschnürung, welcher für die Versuche verschlossen wird. Er ist in Abbildung 71 gezeigt.

Auf der linken Seite ist eine Übersicht über das komplette Modell mit geöffnetem Übergang abgebildet. Gut erkennbar sind hier zudem die Aussparungen für die Drehgestelle, von denen jeder Wagen über zwei verfügt. Auf der rechten Seite ist ein Foto des Zugkopfes gezeigt. Die Drehgestellaussparungen wurden nach dem Zusammenfügen des Zuges mit zusätzlichen Abdeckungen versehen.

### 5.2.3 Tunnelmodelle und -anbauten

Für die Versuche waren ursprünglich die Untersuchung drei verschiedener Tunnelquerschnittsflächen angedacht, welche in Abbildung 73 zu sehen sind. Es handelt sich hierbei um zwei verschiedene Tunnel, von denen einer mittels Einlagen verkleinert werden sollte. Ein neues Tunnelmodell wurde geplant und konstruiert. Dieses Modell entspricht einem Tunnel mit einer Querschnittsfläche von  $38 \text{ m}^2$  und ist somit kleiner als der bereits an der Anlage verfügbare Tunnel mit umgerechnet  $43,75 \text{ m}^2$  Fläche.

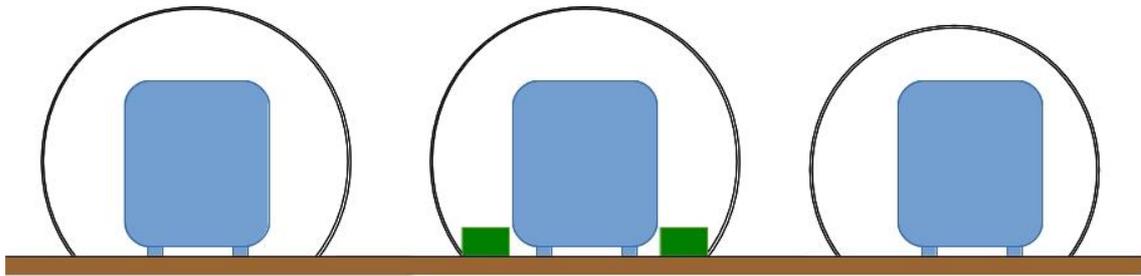


Abbildung 73: Drei Tunnelquerschnitte, links: ursprünglicher Tunnel, mittig: Tunnel mit zusätzlicher Versperrung, rechts: neue Tunnelröhre

Die Fläche des in der Mitte gezeigten Tunnels sollte 42 m<sup>2</sup> betragen. Von der Untersuchung dieses Tunnels wurde zugunsten zusätzlicher Fahrten mit den beiden anderen Tunneln verzichtet, da der zu erwartende Erkenntnisgewinn die zusätzlich notwendigen Modellbaukosten nicht rechtfertigte. Der neu geplante 38m<sup>2</sup>-Tunnel sollte zunächst eine asymmetrischen Gleisführung aufweisen, wodurch nur eine Seite des Unterbaus erneuert werden müsste. Der Einfluss der Asymmetrie wird in AP2 behandelt und für vernachlässigbar erklärt. Durch eine optimierte Befestigung der Tunnelröhren, die eine vereinfachte Abdichtung des Tunnels mit sich bringt, kann aber letztlich eine symmetrische Anordnung gewährleistet werden und wurde so umgesetzt. Die benötigten Teile wurden jeweils aus mitteldichter Faserplatte (MDF), Spanplatten und Polystyrol gefräst.

Die beiden Arten der Unterbauten sind in Abbildung 73 einander gegenübergestellt. Auf der

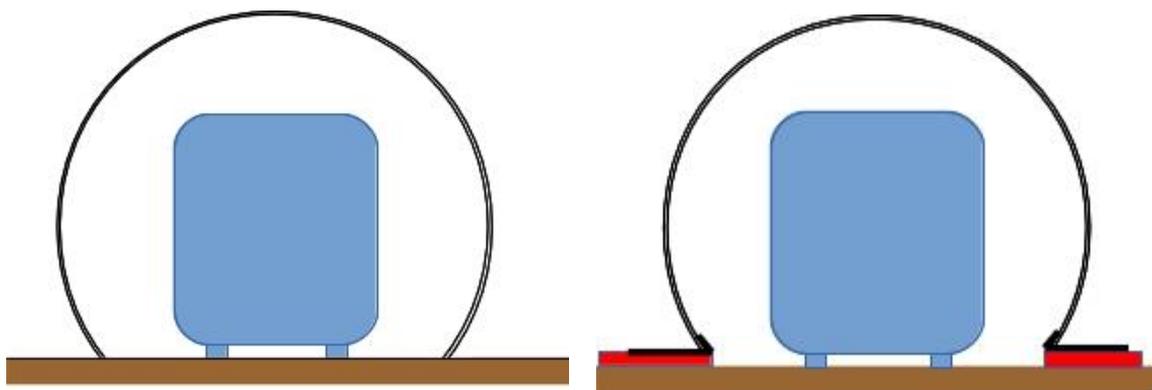


Abbildung 74: Tunnelunterbauten, links: vorhandener Tunnel rechts: neue Röhre

linken Seite sieht man den Unterbau des vorhandenen Tunnels. Der Tunnel wird lediglich in Nuten hineingestellt, welche in den Unterbau gefräst wurden. Rechts dargestellt ist der neu entwickelte Unterbau. Zusätzliche Unterbauplatten (in Rot gezeigt) lassen eine Feinjustage der Tunnelfläche zu. Die Tunnelröhren werden mithilfe von Metallwinkeln positioniert.

Die bereits bestehende Unterkonstruktion wurde außerdem verlängert, wodurch ein Tunnelaufbau mit der maximalen Länge von maximal 15 m im Vergleich zu 10 m vorher möglich ist. Der vorhandene 44m<sup>2</sup>-Tunnel ist 10m lang, der neue 38m<sup>2</sup> Tunnel verfügt jetzt über eine Länge von 14m. Die beiden Tunnelröhren sind in Abbildung 75 gezeigt. Insbesondere im linken Teilbild mit der 44 m<sup>2</sup> Tunnelröhre ist die Unterkonstruktion der Tunnel aus weißer Unterplatte aus Holz, Zwischenplatte aus Polystyrol und dem oberen MDF-Frästeil zu erkennen. Auf der rechten Seite sieht man die an den neuen 38m<sup>2</sup> Tunnel angepasste Unterkonstruktion. Die Befestigungsgurte, welche auf dem rechten Bild zu sehen sind, werden für beide Tunnel verwendet.

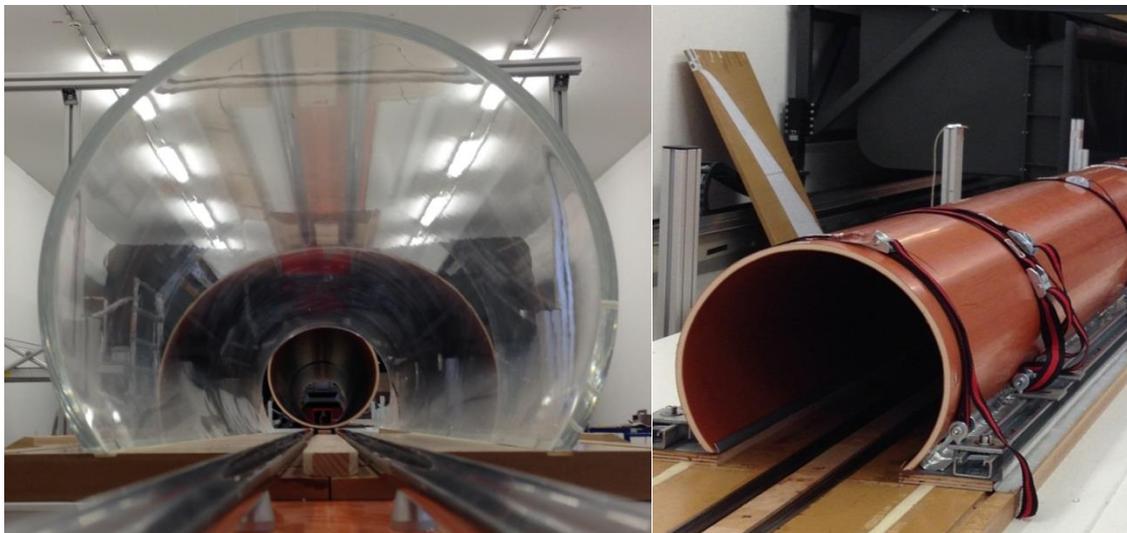


Abbildung 75: Tunnelröhren samt Unterbau, links: vorhandene Röhre, rechts: neue Röhre

An den 38m<sup>2</sup>-Tunnel wird für die Untersuchungen die Umgebung einer Notausgangstür seitlich angebaut. Die gewünschte, hauptsächliche Betrachtungsposition liegt bei 3m, was der Mitte dieser zusätzlichen Box entspricht. Diese ist, wie in AP1 festgelegt, 120cm lang und an der schmalsten Stelle 12cm tief.

Dieser Raum kann mit zwei verschiedenen Einsätzen versehen werden, durch die die Geometrie der Türumgebung variiert werden kann. Die Box und das schräge Paar Einsätze sind in Abbildung 76 gezeigt. Insgesamt werden drei Fälle untersucht. Die leere Box gilt als großer Querschlag mit scharfen Kanten am Anfang und Ende. Sind die geraden Einsätze eingebaut, so ist dies der kleine Querschlag, der ebenfalls über scharfe Abgrenzungen verfügt.

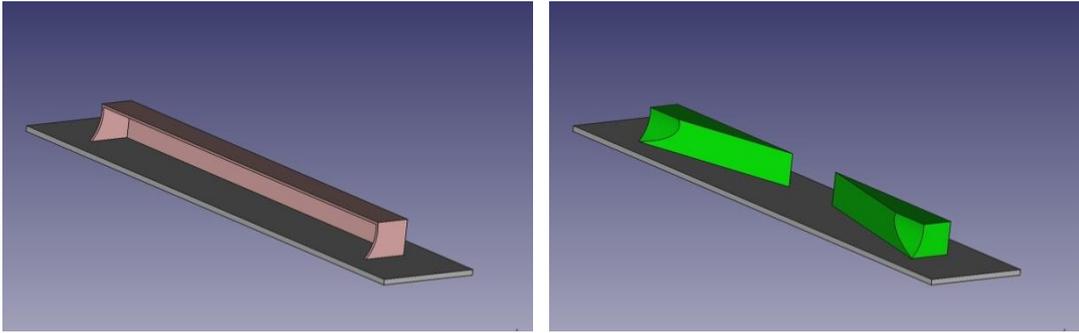


Abbildung 76: Umgebung der Notausgangstür, links: Box, rechts: schräge Einsätze

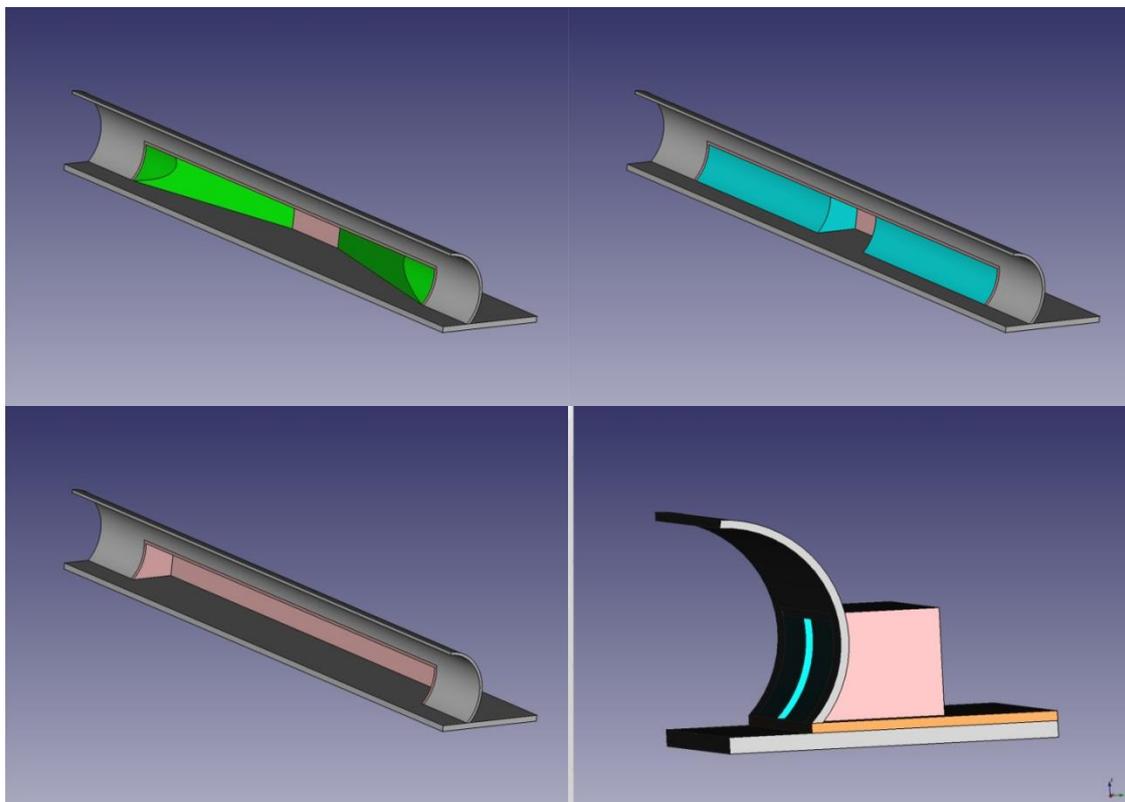


Abbildung 77: Notausgangstunnelumgebung, drei Varianten kleiner, grosser und Schräger Querschlaganschluss und Seitenansicht der Box an der Tunnelseite

Die schrägen Einsätze sind so an den Tunnel angepasst, dass sie der Tunnelkontur folgen und so einen glatteren Übergang zwischen Tunnel und Querschlag erzeugen.

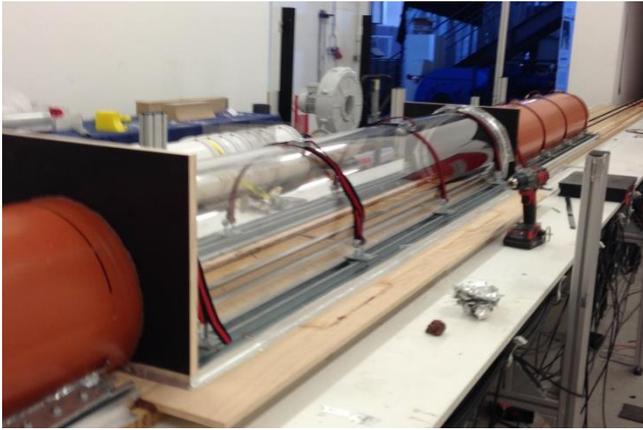


Abbildung 78: Eingesetztes Tunnelsegment

Alle drei Varianten sind als Ausschnitt aus dem Tunnel in Abbildung 77 gezeigt. Zusätzlich zu den verschiedenen Querschlagskonfigurationen wird beim  $38\text{m}^2$  großen Tunnel ein Tunnelsegment durch ein 2 m langes Segment des  $44\text{m}^2$ -Tunnels ersetzt. So kann der Einfluss lokaler Aufweitungen zum Beispiel mit unterschiedlich dimensionierter Tübbinge ermittelt werden. Die Messposition 3m befindet sich mittig im vergrößerten Tunnelsegment. Es schließt auf beiden Seiten mit einer Wand ab, die von dem  $38\text{m}^2$ -Tunnel durchstoßen wird. Die Konfiguration ist in Abbildung 78 dargestellt.

#### 5.2.4 Messtechnik

Beide Tunnel sind mit insgesamt mindestens 9 bzw. 13 Drucksensoren ausgestattet, die über die komplette Länge der Tunnel verteilt sind und somit zueinander den konstanten Abstand 1m haben. Ein Drucksensor befindet sich dabei genau im Abstand von 3 m zum Tunneleingang zentral in dem Bereich der simulierten Tür. Zusätzlich sind an den Ecken des Türbereichs vier weitere Sensoren eingebaut. Die Abmessungen entsprechen dabei der Größe der in AP3 festgelegten Türgeometrie.

Beide Tunnel sind mit bis zu zwei Hitzdrahtsonden zwecks Luftgeschwindigkeitsmessung im Tunnel ausgestattet, von denen eine an der Stelle 3 m gegenüber der Tür positioniert ist. Sie befindet sich mittig zwischen der Tunnel- und der Zugwand. In ist die Sonde im Bild unten links zu erkennen. Zudem sind die fünf die Tür darstellenden Drucksonden ersichtlic.

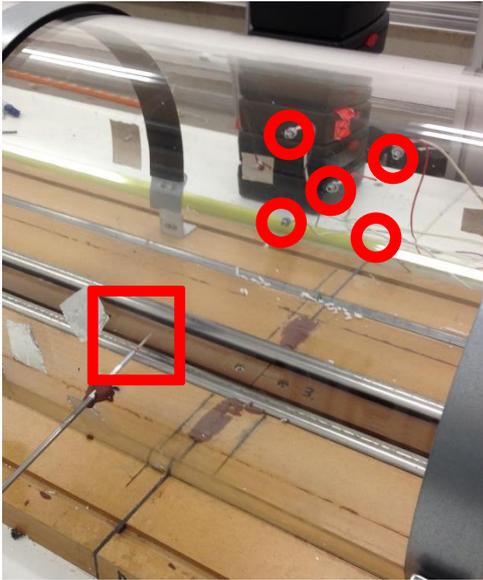


Abbildung 79: Hitzdrahtsonde (Kasten) und Drucksonden (runde Markierungen)

Die optionale zweite Hitzdrahtsonde kam im Fall der Querschläge zum Einsatz. Hier befindet sich die Sonde in allen drei Raumrichtungen mittig im Querschlag. Sie misst, wie die erste Sonde auch, den Betrag der Luftgeschwindigkeit in der horizontalen Ebene, welcher im Wesentlichen dem Betrag der Geschwindigkeit in Fahrtrichtung des Zuges entspricht.

Zusätzlich zu den Sonden im Tunnel wurde die Geschwindigkeit des Zuges mittels Lichtschranken vor und nach dem Tunnel gemessen.

### 5.2.5 Messprogramm und Datenverarbeitung

Die Tabelle 13 zeigt das umgesetzte Messprogramm. Die einzelnen Konfigurationen entsprechen jenen die in AP1 festgelegt wurden.

Die Messdaten mit dem ICE3 und dem 44m<sup>2</sup>-Tunnel bei 160 km/h wurden aus bestehenden Messungen entnommen, was kleinere Abweichungen in der Positionierung der Drucksonden zur Folge hat.

Tabelle 13: Messprogramm an der TSG

Variation	Bezeichnung	ICE		Railjet		
		160 km/h	200 km/h	160 km/h	200 km/h	230 km/h
1	38m <sup>2</sup> -Tunnel					
2	38m <sup>2</sup> -Tunnel mit großem Querschlag					
3	38m <sup>2</sup> -Tunnel mit schrägem Querschlag					
4	38m <sup>2</sup> -Tunnel mit kleinem Querschlag					
5	38m <sup>2</sup> -Tunnel mit großem Tunnelsegment					
6	44m <sup>2</sup> -Tunnel					

Jede Messung wurde viermal durchgeführt. Die jeweils zueinander gehörigen Messdaten wurden gemittelt, wodurch das messtechnisch nicht vermeidbare Rauschen reduziert wurde. Zudem konnten so die Einzelmessungen verifiziert werden. Die gemittelten Messdaten wurden zusätzlich mithilfe eines Filters geglättet, welcher das hochfrequente Rauschen reduziert.

### 5.2.6 Erweitertes Messprogramm: Rauigkeitselemente im Tunnelboden

Zusätzlich zur Studie des Einflusses verschiedener Querschlagsgeometrien wird bei der Geschwindigkeit 230km/h der Einfluss von Rauigkeitselementen im Tunnelboden untersucht. Hierzu wird der Tunnel mit porösen Einsätzen ausgestattet. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 80 gezeigt.

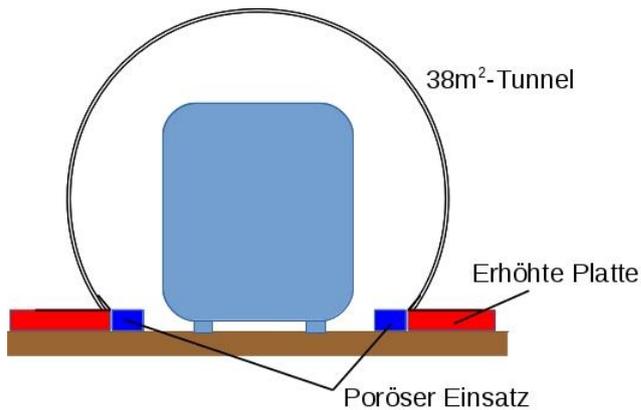


Abbildung 80: Rauigkeitselemente im Tunnelboden

Um die Elemente einsetzen zu können ohne die Tunnelfläche zu verkleinern, wurden die seitlichen Grundplatten des Tunnels (in der Abb. in rot gezeigt) erhöht. Die Einsätze sind so ausgelegt, dass sie eine Fläche von umgerechnet ca.  $0,9\text{m}^2$  zusätzlich zu den  $38\text{m}^2$  des Tunnels einnehmen. Als Referenzfall wurden anstatt der porösen Elemente nicht-durchlässige Einsätze aus Holz eingesetzt, wodurch die Querschnittsfläche immer den ursprünglichen Wert von  $38\text{m}^2$  aufweist. So kann vermieden werden, dass die im Vergleich zu den obigen Messungen leicht variierte Tunnelgeometrie einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Als poröse Elemente dient Filterschaum, also ein offenzelliger Schaumstoff. Die beiden verschiedenen Schäume unterscheiden sich durch ihre Zellgröße, die Anzahl der Poren pro Inch und demnach ihrer Durchlässigkeit. Es werden Filter mit einer Porendichte von 60 Poren pro Inch (fein) und 30 Poren pro Inch (grob) verwendet. In der folgenden Abbildung 81 ist links der Referenzfall und in der Mitte der Fall mit dem groben Schaumstoff gezeigt, rechts sind Proben der verwendeten porösen Einsätze zu sehen.

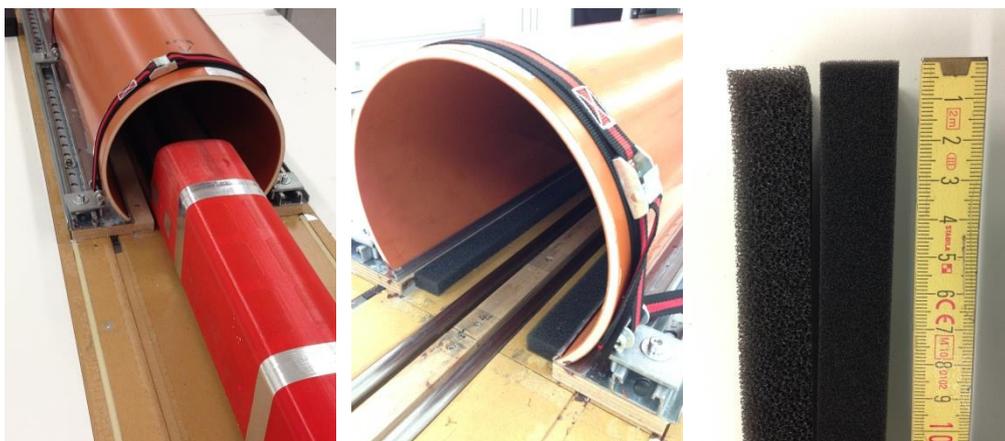


Abbildung 81: Rauigkeitselemente im Tunnel, links: Referenzfall mit Holzelementen, Mitte: Schaumstoff, rechts: zwei Sorten Filterschaum

Für jede Porosität werden zwei Fälle untersucht: einmal wird der Tunnel auf der kompletten Länge von 14m mit den porösen Einsätzen ausgelegt. Als zweites werden nur der erste und der letzte Meter des Tunnels mit porösem Filterschaum ausgestattet, der Rest des Tunnels mit den hölzernen Elementen. Das Ziel ist eine Abschwächung der Druckwellen einmal über die gesamte Länge des Tunnels vergleichbar mit der Wirkung eines Schotterbettes und dann während der Reflektion der Welle an den Tunnelenden.

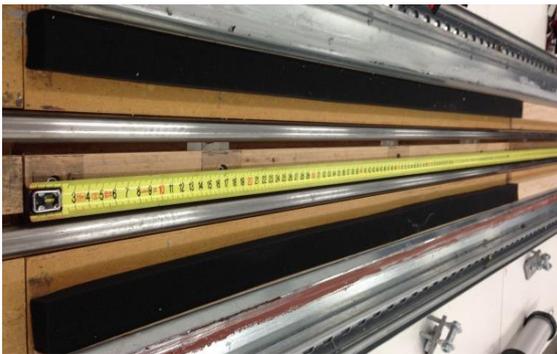


Abbildung 82: erster Meter des Tunnels porös, danach mit Holzelemente ausgelegt

### 5.3 Auswertung der Referenzmessungen

Die Messungen mit dem Railjet-Modell bei 200 km/h und der Variation 1 hat die in Abbildung 83 gezeigten Druckverläufe ergeben und stimmen in den wesentlichen Punkten mit der 3D CFD-Rechnung überein. Der zeitliche Nullpunkt liegt hier in dem Moment, in dem die Zugnase das Tunnelportal durchfährt. Zu sehen ist der erste Druckanstieg, der durch die Einfahrt des Zugkopfes in den Tunnel hervorgerufen wird. Ein zusätzlicher, leichter Druckanstieg entsteht folgend durch die anwachsenden Grenzschichten an Zug und Tunnel. Hierbei wird immer mehr Fläche des Tunnels durch die anwachsenden Grenzschichten ausgefüllt, was eine fiktive Verkleinerung des Tunnels zur Folge hat. Passiert das Zugheck das Tunnelportal, so wird eine Expansionswelle generiert, welche hier auf den ersten Druckanstieg und den reibungsbedingten Anstieg folgt. Dann erfolgt ein weiterer Druckabfall zu dem Zeitpunkt, an dem der Zugkopf die Messposition passiert. Der Zug verdrängt die vor ihm befindliche Luft, welche um den Zug herum beschleunigt wird. Daraus resultiert ein Unterdruckgebiet neben dem Zug, welches sich mit dem Zug mitbewegt. Bei der Passage des Zughecks an der Messposition steigt folglich der Druck wieder an.

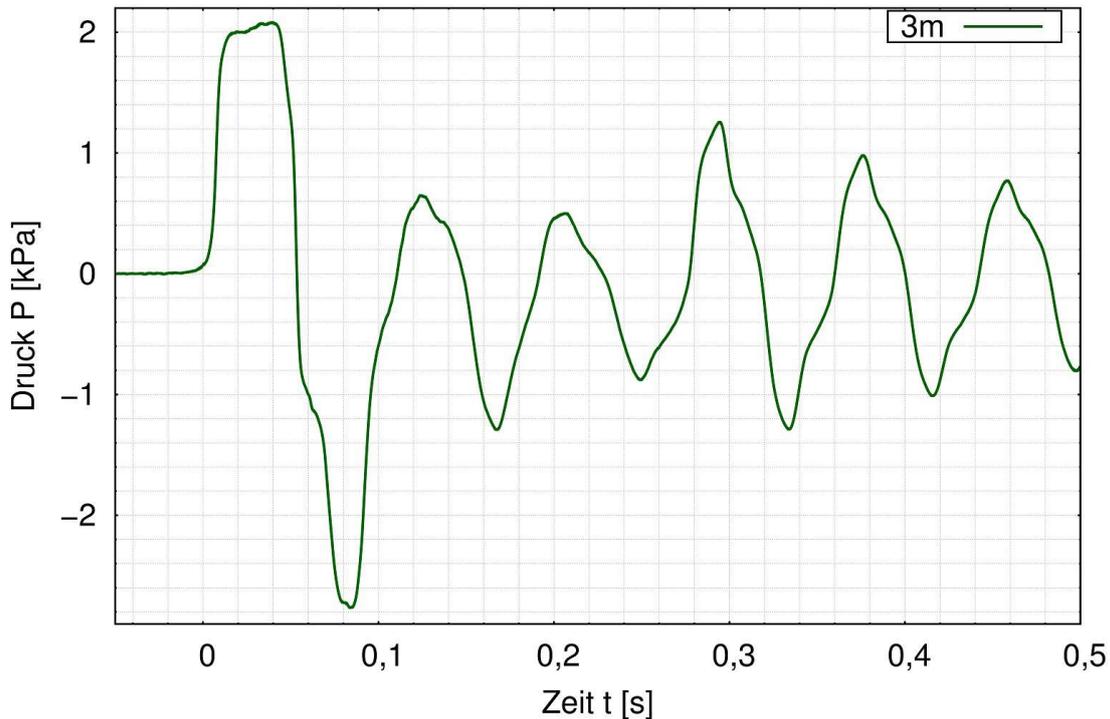


Abbildung 83: Druckwellen aufgrund der Durchfahrt des Railjet-Modells mit 200 km/h durch den 38m<sup>2</sup>-Tunnel, Messposition bei 3m

In der Abbildung 83 ersichtlich sind zudem Oszillationen. Die Druckwellen werden an beiden Tunnelenden reflektiert. Bei jeder Reflektion wandelt sich eine Kompressionswelle in eine Expansionswelle um und umgekehrt. Bei den Reflektionen wird jeweils ein Teil der Energie in den Tunnel zurück geleitet, der Rest wird in die Umgebung abgestrahlt. Je nach Steilheit der einfallenden Druckwelle kann der abgestrahlte Druckanteil als sogenannter Tunnelknall wahrgenommen werden. Die Reflektionen führen zu dem schwingenden Druckverhalten im Tunnel. Ab  $t=0,25$  s ist ein Druckanstieg zu verzeichnen, welcher durch die Tunnelausfahrt des Zugkopfes hervorgerufen wird. Auch nach Verlassen des Zuges finden die Oszillationen weiter statt, allerdings mit fallender Amplitude. Die Versuche wurden im M 1:25 durchgeführt um den Maßstabeffekt zu berücksichtigen muss die Zeitachse mit einem Faktor 25 beaufschlagt werden. Folgend werden nur die direkt gemessenen Druck/ Zeitverläufe dargestellt.

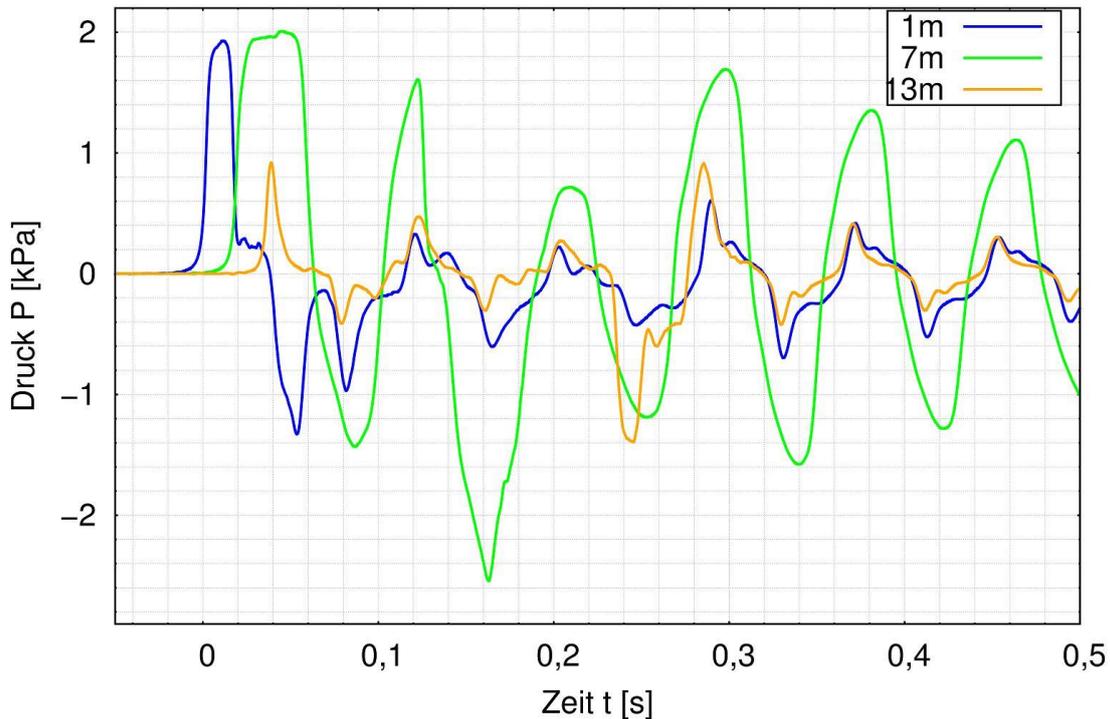


Abbildung 84: Druckwellen aufgrund der Durchfahrt des Railjet-Modells mit 200 km/h durch den 38m<sup>2</sup>-Tunnel, drei Messposition

Je nach Messposition variiert die Stärke der überlagerten Wellen. In Abbildung 84 sind die Druckverläufe an drei ausgewählten Positionen gezeigt, jeweils in 1m Entfernung von der Tunneleinfahrt und demnach am Anfang des Tunnels, dann nach 7m in der Mitte des Tunnels und nahe der Tunnelausfahrt bei 13m. Hierbei ist insbesondere auffällig, dass die Druckschwankungen bei der Position 13m vergleichsweise klein ausfallen. Die Einfahrwelle des Zugkopfes in den Tunnel, welche an den anderen Positionen einen Wert von ca. 2kPa annimmt, bleibt hier unter der Amplitude von 1kPa. Der Grund dafür ist die Überlagerung dieser Druckwelle mit ihrer eigenen Reflektion am Tunnelende. Da sich die Kompressionswelle bei der Reflektion in eine Expansionswelle wandelt, findet hier eine destruktive Überlagerung statt. Dies ist auch an der Position 1m ab der Zeit  $t=0,1s$  festzustellen. Die Einfahrwelle ist aber gut sichtbar, da diese erst am Tunnelportal entsteht und hier folglich keine Reflektion vorhanden ist.

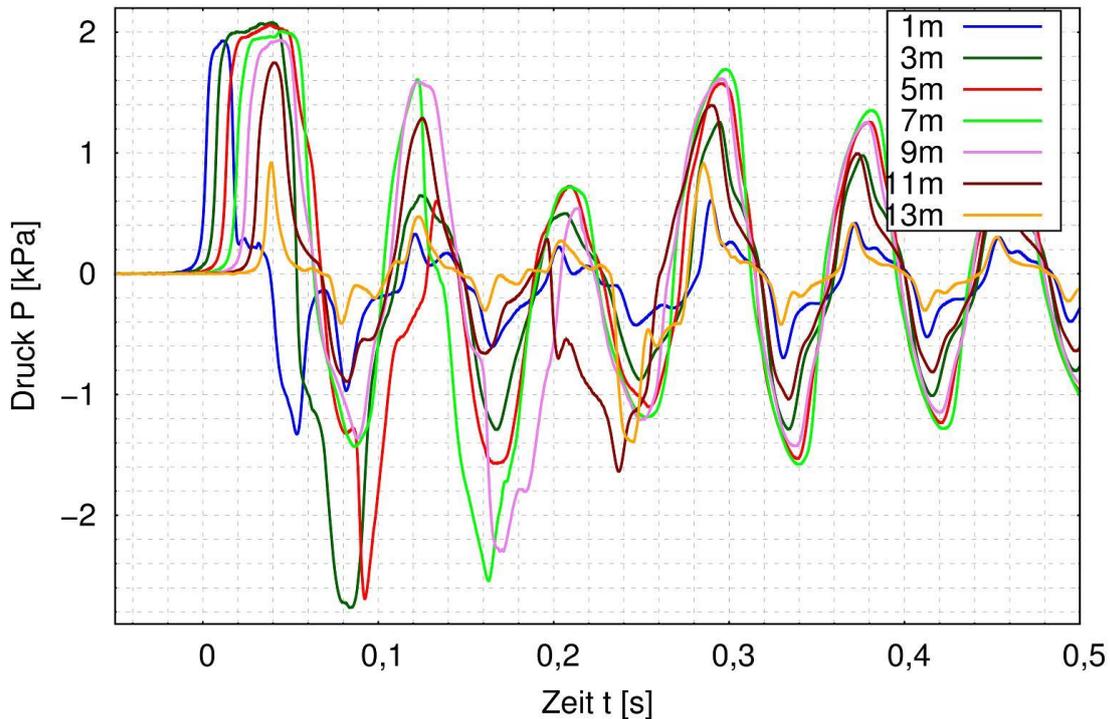


Abbildung 85: Druckwellen aufgrund der Durchfahrt des Railjet-Modells mit 200 km/h durch den 38m<sup>2</sup>-Tunnel, variable Messpositionen

Es ergibt sich also folglich, dass die Wahl der Messposition für das Ergebnis der Lastenanalyse von wesentlicher Bedeutung ist. In Abbildung 85 ist klar ersichtlich, dass sich an bestimmten Stellen im Tunnel mehrere Effekte konstruktiv überlagern, was auch in größerer Entfernung zu beiden Tunnelenden zu verschiedenen starken Druckextrema führt. An der Messposition  $x=3$  m beispielsweise erreichen die Einfahrwelle des Hecks und die Reflektion der Kopfeinfahrwelle beinahe zeitgleich die Messposition. Beide Druckwellen sind Expansionswellen und führen zu einem Druckabfall. Dieses Treffen findet bei der besagten Messposition neben dem Zug statt, wo ohnehin niedriger Druck herrscht. Dies führt zu dem sehr ausgeprägten Druckminimum bei  $t=0,08$  s. Für die Betrachtung der Lasten auf Tunnelleinbauten ist daher die gewählte Messposition insofern optimal, da in diesem Fall die größten Lasten auftreten. Für  $v=230$  km/h oder anderen Tunnellänge liegt diese Stelle woanders.

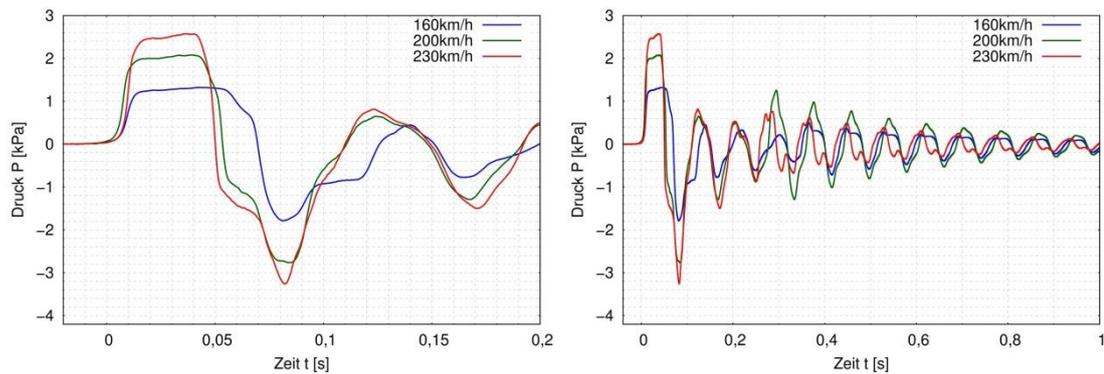


Abbildung 86: Druckwellen im 38m<sup>2</sup>-Tunnel bei der Durchfahrt des Railjet-Modells mit drei versch. Geschwindigkeiten bei x=3 m, rechts: Abklingverhalten der Druckwellen nach Ausfahrt des Zuges

Der Einfluss der Zuggeschwindigkeit ist in Abbildung 86 gezeigt. In der linken Teilabbildung sind die Einfahrwellen des Zugkopfes und -hecks, sowie die Drucksignatur der Zugpassage an der Messposition bei allen drei Geschwindigkeiten ersichtlich. Bei Erhöhung der Geschwindigkeit erhöhen sich auch die Druckamplitude der Einfahrwelle, sowie die Druckamplitude während der Zugpassage. Theoretisch ist bei einer Erhöhung von der Geschwindigkeit  $V_1=160$  km/h auf  $U_2=200$  km/h eine Erhöhung der Amplitude der Einfahrwelle um ca. 60% und auf  $V_3=230$  km/h um 96% erwartet. Diese Zunahmen können in den Messungen bestätigt werden. Die Erhöhung der Amplitude neben dem Zug ist von einigen Überlagerungen beeinflusst. Es ist aber festzustellen, dass auch hier eine Erhöhung der Zuggeschwindigkeit die Druckamplitude erhöht. Auffällig ist hierbei, dass durch die Überlagerung verschiedener Signale insbesondere bei 200 km/h eine hohe Amplitude erreicht wird, welche beinahe der bei 230 km/h entspricht. Dies ist zusätzlich im rechten Teilbild ersichtlich, in dem zusätzlich zu der Zeit, die der Zug im Tunnel verbringt, das Abklingen der Wellen innerhalb des Tunnels nach Ausfahrt des Zuges gezeigt ist. Hier treten insbesondere bei 200 km/h sehr hohe Drücke auf, da die Ausfahrwelle des Zugkopfes zeitgleich mit einer weiteren starken Kompressionswelle auftritt. Diese ist eine Reflektierte der Kopfeinfahrwelle. Zur Untersuchung der maximalen Lasten auch nach der Zugausfahrt ist demnach die Geschwindigkeit 200 km/h geeignet. Grundsätzlich wurde aber in den Messungen gezeigt, dass eine höhere Zuggeschwindigkeit die Druckamplituden und damit auch die Lasten während der Zugdurchfahrt durch den Tunnel signifikant erhöhen.

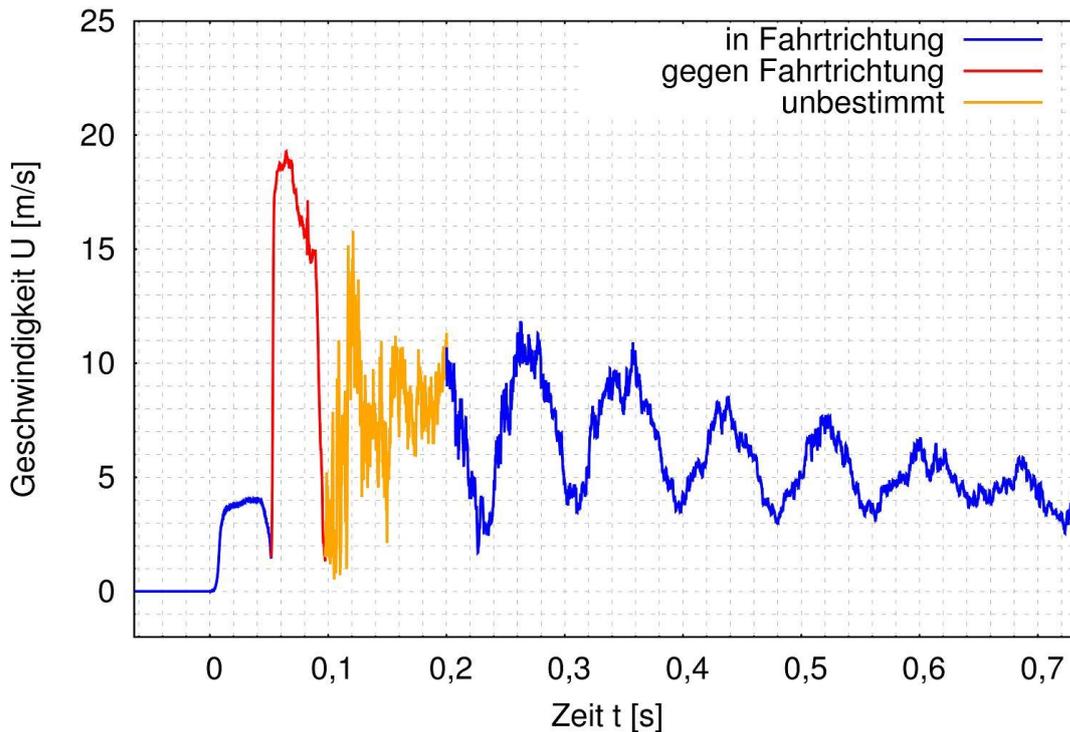


Abbildung 87: Luftgeschwindigkeit im Tunnel bei  $x=3$  m mit Variation 1 und 200 km/h

Die Interpretation der einzelnen Druckwellen kann mithilfe der Messungen der Luftgeschwindigkeit im Tunnel bestätigt werden. Diese ist in Abbildung 87 für die Durchfahrt des Railjets durch den 38m<sup>2</sup>-Tunnel bei 200 km/h, also dem identischen Szenario, gezeigt. Anzumerken ist, dass die Hitzdrahtmessung lediglich den Betrag der Geschwindigkeit in Zugrichtung anzeigt, ob die Luft letztendlich in Zugrichtung oder ihr entgegen strömt, ist den Messungen nicht direkt zu entnehmen. Richtungswechsel sind aber an spitzen Minima der Kurve zu erkennen, bei denen Luft einen Richtungswechsel vornimmt. In der Abbildung ist die Richtung der Luftbewegung farblich markiert. Es ist festzustellen, dass die Luft vor dem Zug bedingt durch die durch den Tunnel propagierende Druckwelle in Richtung der Tunnelausfahrt gedrückt wird. Bei der Passage des Zugkopfes findet ein Richtungswechsel statt, die Luft wird am Zug vorbei zurück in Richtung Tunneleinfahrt bewegt. Nach der Passage des Zughecks findet sich ein turbulentes Gebiet, welches den Nachlauf des Zugs anzeigt. Hier ist eine feste Bewegungsrichtung nicht eindeutig auszumachen, was mithilfe der farblichen Markierung dargestellt ist. Weit hinter dem Zug allerdings strömt die Luft dem Zug nach.

## 5.4 Untersuchung der verschiedenen Querschlagskonfigurationen und Tübbinge

Durch die Variation der Umgebung von Querschlägen sollen die Lasten auf die eingebauten Türen verringert werden. Die mithilfe der oben beschriebenen Querschläge und dem eingesetzten, vergrößerten Tunnelsegment gemessenen Druckverläufe sind in Abbildung 88 gezeigt. Die hier gezeigten Messungen wurden mit dem Railjet-Modell bei der Geschwindigkeit 200km/h durchgeführt, die Vergleiche der mit den unterschiedlichen Konfigurationen bei den beiden Geschwindigkeiten 160km/h und 230km/h erzielten Ergebnisse ist im Anhang zu finden.

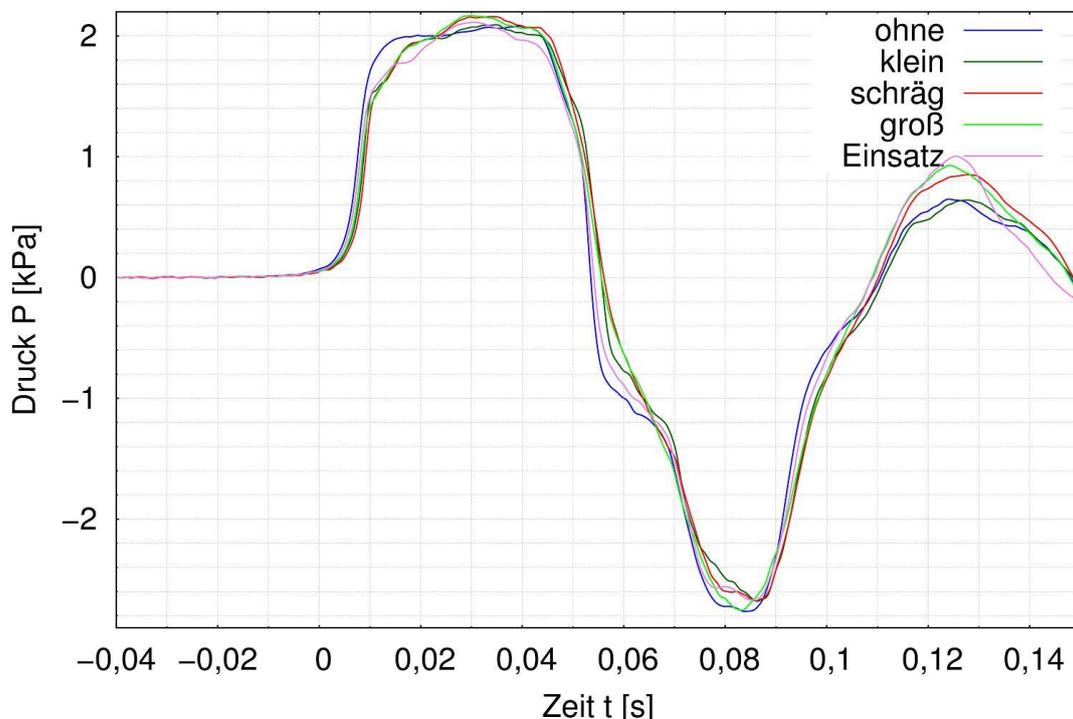


Abbildung 88: Druckwellen im 38m<sup>2</sup>-Tunnel bei der Durchfahrt des Railjet-Modells mit 200 km/h und drei versch. Querschlagskonfigurationen 2-4, sowie dem Referenzfall und dem vergrößerten Segment (Konf. 5), Einfahrwelle und Vorbeifahrt an der Sonde

Die Einfahrwelle des Zugs in den Tunnel wird durch die Querschläge messbar beeinflusst. Die blaue Kurve, welche mit dem unmodifizierten Tunnel aufgenommen wurde, steigt bedingt durch die Einfahrt des Zugkopfes in einem Sprung an, welcher in einem nur sanft ansteigenden Plateau mündet. Ist jedoch ein Querschlag oder das vergrößerte Tunnelsegment eingesetzt, so steigt der Druck zunächst ebenfalls an, wobei der Anstieg nicht die gleiche Höhe erreicht wie in dem Fall ohne Modifikation. Dann folgen weitere, kleine

Druckanstiege, wodurch die letztlich gemessene, maximale Druckamplitude über der des ursprünglichen Tunnels liegt. Diese zusätzlichen Druckwellen werden teilweise bei der Passage des Zugkopfes an Anfang und Ende der Ausbuchtung erzeugt. Zusätzlich entstehen bei jeder Passage einer Druckwelle an einem Querschnittsprung reflektierte Wellen, die zu Druckoszillationen im Bereich der Ausbuchtung führen. Die erhöhte maximale Druckamplitude ist also durch konstruktive Überlagerung dieser Wellen bedingt. Die Abweichung zwischen der Druckamplitude im ursprünglichen Tunnel und im modifizierten Tunnel liegt hier jedoch maximal bei unter 5% und ist damit verhältnismäßig klein. Auch bei der Vorbeifahrt des Zuges an der Messposition ist ein kleiner Unterschied zu verzeichnen. Die Druckamplitude im unmodifizierten Tunnel ist hier um max. 2,5% größer als diejenige im modifizierten Tunnel, was durch die bei Modifikation vergrößerte, für die Rückströmung um den Zug verfügbare Querschnittsfläche und damit die geringeren Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Rückströmung herrührt.

Auch die Druckschwankungen nach der Passage des Zugmodells an den Querschlägen sind durch die Ausbuchtungen beeinflusst, was anhand der Messkurven bei  $t=0,12$  s zu sehen ist. Hier liegen die beiden Messkurven des ursprünglichen Tunnels und des kleinen Querschlags aufeinander, ein Unterschied ist nicht auszumachen. Jedoch weisen diese beiden Kurven eine kleinere Druckamplitude auf als die anderen drei Kurven mit den größeren Ausbuchtungen und dem Tunnelement mit vergrößertem Querschnitt, welche wiederum einen sehr ähnlichen Verlauf zueinander aufweisen. Als Ursache für die erhöhten Druckwerte bei den langen Querschlägen und dem vergrößerten Tunnelsegment kann eine konstruktive Überlagerung der an den Querschlagskanten erzeugten Druckwellen mit den durch die Tunneleinfahrt bedingten Wellen ausgemacht werden. Der kleine Querschlag weist hierbei kaum Unterschiede zu dem Referenzfall auf, da einerseits die beiden Kanten des Querschlags derart dicht beieinander liegen, dass sich die an beiden Kanten entstehenden Druckwellen gegenseitig annähernd auslöschen. Zudem wird vermutet, dass die Strömung innerhalb des Tunnels bei der Zugpassage am Querschlag an der Vorderkante des Querschlags ablöst und sich aufgrund der kurzen zur Verfügung stehenden Länge keine nennenswerte, gerichtete Strömung innerhalb des Querschlags ausbilden kann. Somit ist die Auswirkung des Querschlags auf die Umströmung des Zugmodells und auch auf die durch die Strömung bedingten Druckwellen gering, was in der geringen Abweichung zwischen den Messkurven mit kleinem Querschlag und dem Referenzfall resultiert.

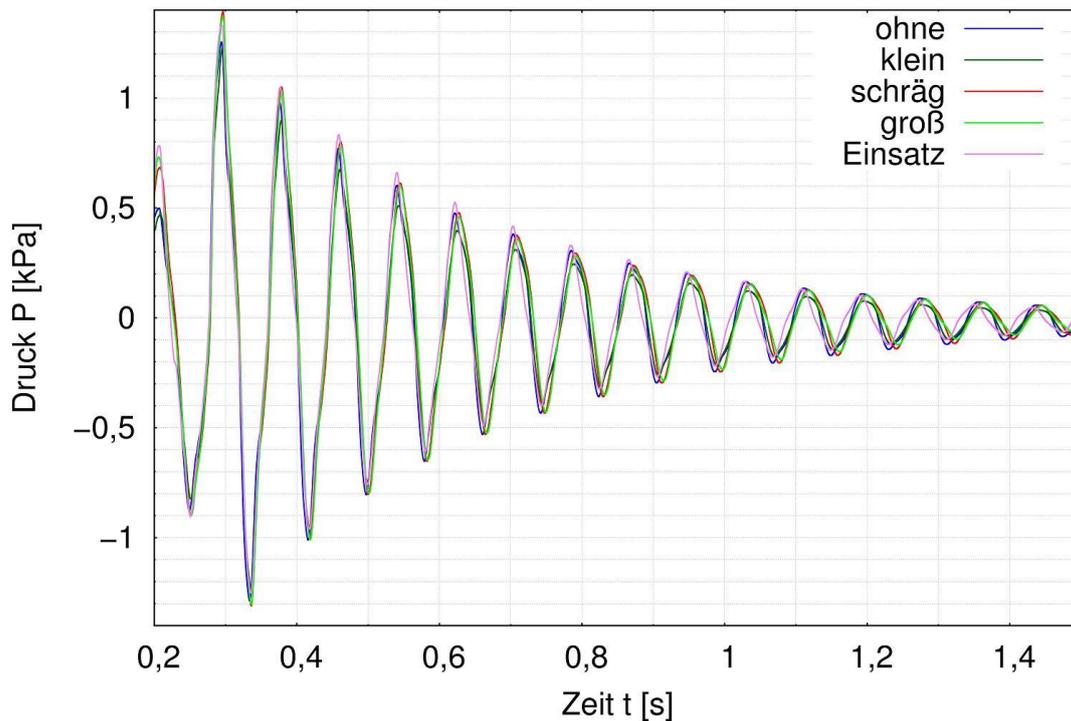


Abbildung 89: Abklingverhalten der Druckwellen nach der Ausfahrt des Railjet-Modells nach der Durchfahrt des 38m<sup>2</sup>-Tunnels mit 200km/h, Messposition 3m

Das in Abbildung 89 gezeigte Abklingverhalten der Druckwellen im Tunnel wird durch die Querschläge ebenfalls minimal beeinflusst. Das jeweils erste Druckmaximum nach kompletter Ausfahrt des Zuges aus dem Tunnel weist im Falle des schrägen Querschlags einen Wert von  $P=1,40$  kPa auf und für den Referenzfall lediglich  $P=1,25$  kPa. Der Unterschied ist durch die bereits bei der Durchfahrt des Zuges im Tunnel vorherrschende Drucksituation bedingt. Nach ungefähr fünf Oszillationen ist kein Unterschied zwischen den beiden Amplituden messbar, danach ist die Amplitude des Falls mit Querschlag geringer als die des Referenzfalls. Dazu ist zu verzeichnen, dass die einzelnen Druckspitzen im Fall des Querschlags breiter werden. Der Grund hierfür liegt in den zusätzlichen Reflektionen der im Tunnel oszillierenden Druckwellen, durch welche die propagierenden Druckwellen bei jeder Passage an den Kanten des Querschlags weitere Störungen erzeugen und dabei an Energie an diese abgeben.

Insgesamt kann also festgestellt werden, dass durch das Einfügen eines Querschlags oder einer lokalen Querschnittsvergrößerung des Tunnels die Druckwellen beeinflusst werden. Allerdings ist die relative Druckänderung bei den hier untersuchten Konfigurationen minimal und zudem nicht in allen Zeitpunkten der Zugdurchfahrt in der gewünschten Weise. Zur

Reduzierung der Lasten auf Tunneleinbauten müsste die Druckamplitude jeweils reduziert werden, was durch die betrachteten Querschläge teilweise nicht gegeben ist.

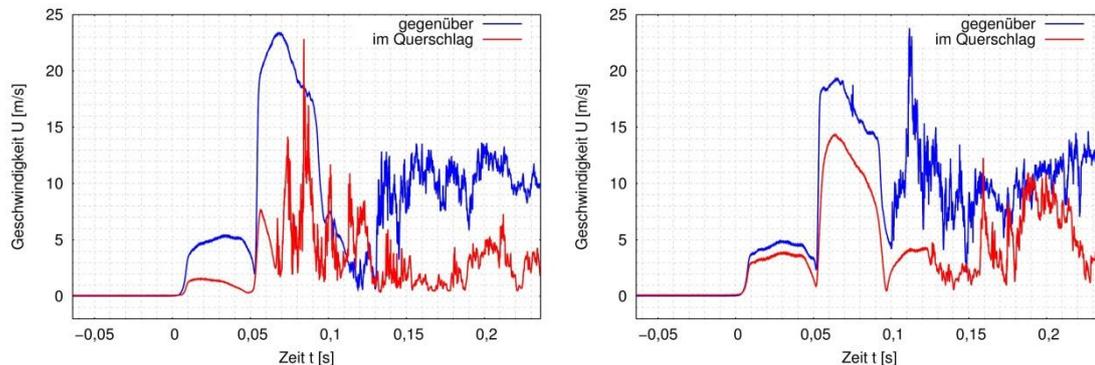


Abbildung 90: Hitzdrahtmessung im kleinen (links) und großen Querschlag

In Abbildung 90 sind die mittels Hitzdrähten gemessene Strömungsgeschwindigkeiten in Bewegungsrichtung des Zuges innerhalb des Querschlags und gegenüber unter Verwendung des kleinen und des großen Querschlags dargestellt. Mithilfe dieser Messungen sollen die Interpretationen der Druckmessungen verifiziert werden. Es ist ersichtlich, dass innerhalb der Querschläge grundsätzlich eine kleinere Strömungsgeschwindigkeit herrscht als außerhalb. Im Falle des kleinen Querschlags ist der Einfluss der Strömung, welche durch die Einfahrtwelle des Zugkopfes in den Tunnel hervorgerufen wird, verschwindend gering. Es kommt zu fast keiner gerichteten Strömung, da die Strömung an den Kanten des Querschlags ablöst und sich der Einfluss der Strömung im Tunnel damit nicht in den Querschlag fortsetzen kann. Er wird folglich überströmt. Bei der Passage des Zuges am Querschlag ist im Signal des Hitzdrahts innerhalb des kleinen Querschlags eine starke Turbulenz und ein chaotisches Verhalten sichtbar. Es findet keine gerichtete Strömung statt. Lediglich turbulente Strukturen bilden sich im Querschlag. Anders als beim kleinen Querschlag ist der Einfluss der Strömung durch die Kompressionswelle im Tunnel im großen Querschlag messbar, auch wenn die Geschwindigkeit etwas geringer ist als außerhalb des Querschlags. Trotz der wohl auch anfänglich auftretenden Ablösung gibt es eine in Richtung des Zuges bewegte Strömung im Querschlag, die sich aufgrund des günstigen Verhältnisses zwischen Querschlagslänge und -tiefe ausbilden kann. Wenn der Zug den Querschlag erreicht, so findet hier die Rückströmung neben dem Zug auch im Querschlag statt. Es ist somit ersichtlich, dass der kleine Querschlag nur wenig Einfluss auf die Strömung und damit auch auf die Drucksignatur haben kann. Der große Querschlag jedoch hat einen messbaren Einfluss.

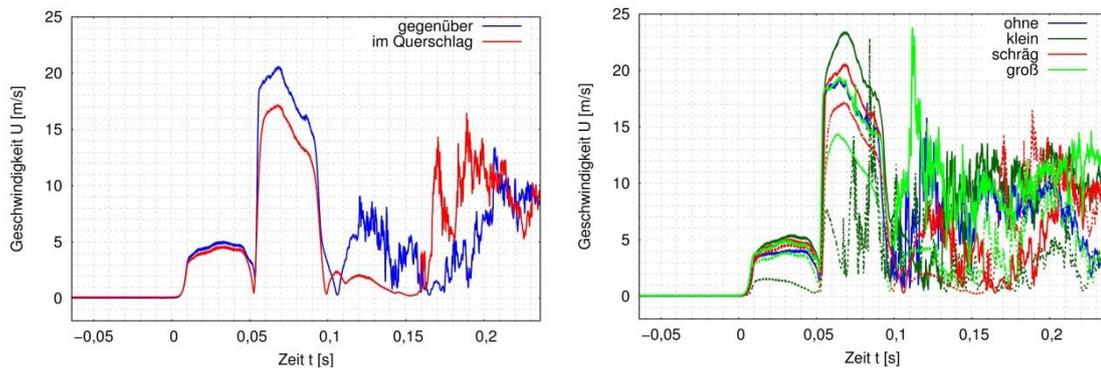


Abbildung 91: Hitzdrahtmessung im schrägen Querschlag und Vergleich aller Varianten

Im Gegensatz zu dem kleinen und dem großen Querschlag verfügt der schräge Querschlag nicht über sehr scharfe Kanten und einen plötzlichen Übergang von Tunnelwand zur Querschlagswand. Dadurch kann eine Ablösung der Strömung am Übergang zwischen Tunnel und Querschlag unterdrückt werden. In Abbildung 91 links sind die Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb und gegenüber dem schrägen Querschlag abgebildet. Nach Einfahrt des Zuges in den Tunnel und vor Erreichen des Zuges am Querschlag ist somit die Strömungsgeschwindigkeit im Querschlag nahezu identisch mit der außerhalb. Auch während der Zugpassage ist die Differenz zwischen den beiden gemessenen Geschwindigkeiten geringer als bei den bisher untersuchten Fällen. Betrachtet man nun alle Hitzdrahtmessungen im Vergleich (Abbildung 91 rechts), so fällt insbesondere der kleine Querschlag auf. Wie bereits angesprochen, weicht die innerhalb des kleinen Querschlags gemessene Kurve am weitesten von den anderen ab. Die gemessenen Werte sind bedeutend kleiner, der Einfluss des Querschlags auf die Druckverläufe demnach gering. Daher wird nun die Auswirkung des Tunnelquerschnitts auf die Druckwellen untersucht.

In Abbildung 92 sind die Ergebnisse, welche mit dem Railjet-Modell bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h mit den beiden unterschiedlich großen Tunneln ohne Querschlag ermittelt wurden, einander gegenübergestellt, der Vergleich der Tunnel bei allen drei gemessenen Geschwindigkeiten ist im Anhang zu finden. Sofort auffällig sind die Unterschiede in den Reflektionen, die durch die unterschiedlichen Tunnellängen bedingt sind. Auch bezüglich des ersten Druckanstiegs sind deutliche Unterschiede vorhanden. Die Druckamplitude beim 44m<sup>2</sup>-Tunnel ist im Vergleich zum 38m<sup>2</sup>-Tunnel um ca. 19% reduziert.

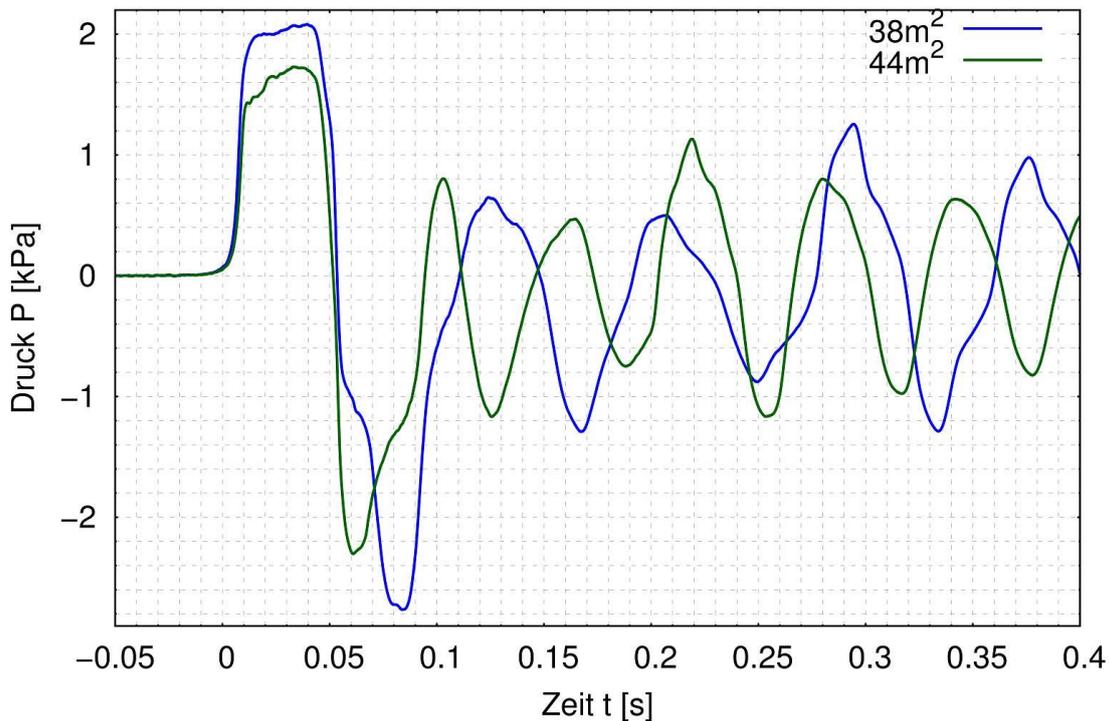


Abbildung 92: Vergleich der beiden Tunnel bei der Durchfahrt des Railjet-Modells bei 200 km/h, Messposition 3 m

Theoretisch ist bei der Vergrößerung von  $38 \text{ m}^2$  auf  $44 \text{ m}^2$  Querschnittsfläche eine Reduktion um ca. 17% zu erwarten, sofern man die Reibung vernachlässigt. Diese kann auch bereits nach kurzer Zeit zu einem weiteren Druckanstieg führen und damit die Abweichung bedingen. Die zusätzliche Reduktion kann zudem durch Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der maximalen Amplitude bedingt sein. Passiert der Zug die Messposition, so ist die Druckamplitude bei vergrößertem Tunnel um ca. 13% reduziert. Dies wird, wie bereits erwähnt, durch die langsamere Umströmung des Zugs im  $44 \text{ m}^2$ -Tunnel hervorgerufen. Auch die Ausfahrwellen, welche beim großen Tunnel etwa bei  $t=0,23 \text{ s}$  und beim  $38 \text{ m}^2$ -Tunnel bei  $t=0,3 \text{ s}$  zu sehen sind, sind stark von der Querschnittsfläche des Tunnels beeinflusst und weisen im Fall des  $44 \text{ m}^2$ -Tunnels kleinere Werte auf. Insgesamt ist demnach festzustellen, dass eine Erhöhung der Tunnelquerschnittsfläche eine teils bedeutende Reduktion der Druckamplituden und damit auch der Drucklasten zur Folge hat. Eine insgesamt Vergrößerung des Tunnelquerschnitts ist also deutlich wirksamer als alle anderen hier betrachteten Modifikationen.

Im Folgenden wird nun zusätzlich der Einfluss der Zuggeometrie betrachtet. Dazu werden die Ergebnisse des vereinfachten Railjet-Modells mit denen des ICE3-Modells verglichen.

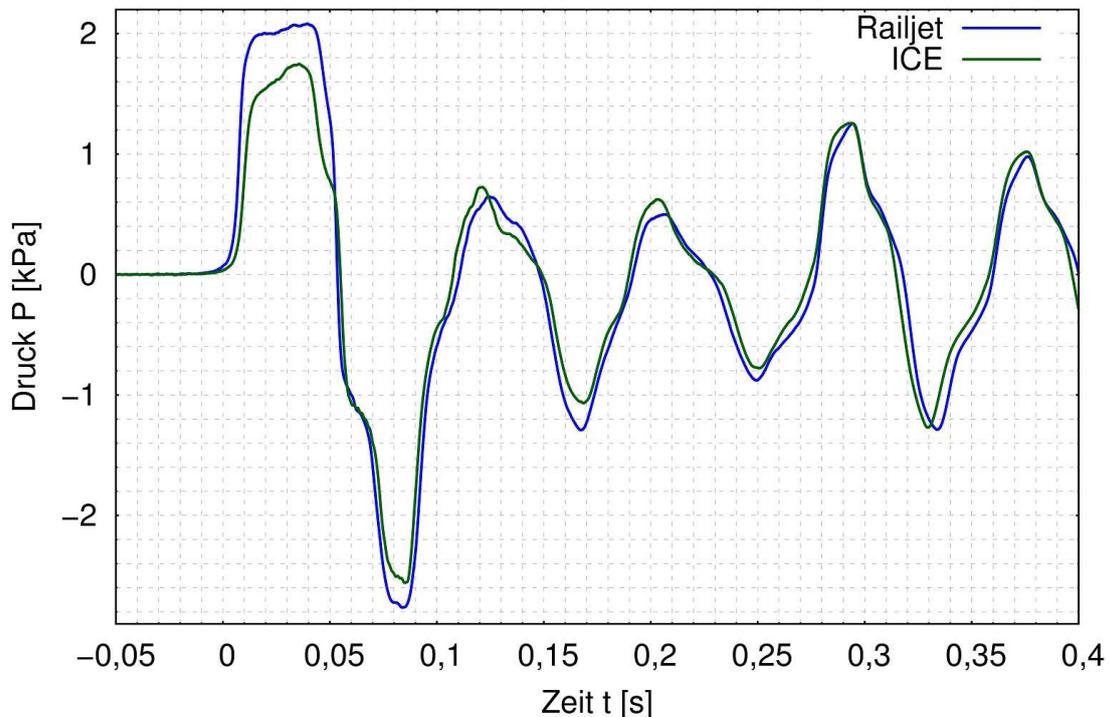


Abbildung 93: Vergleich der beiden Züge bei der Durchfahrt durch den 38m<sup>2</sup>-Tunnel und 200 km/h, Messposition 3 m

Die weiteren mit dem ICE3-Modell aufgenommenen Messkurven sind im Anhang abgebildet. Zwischen den beiden in Abbildung 93 dargestellten Messkurven sind klare Unterschiede erkennbar. Insbesondere die Amplitude des ersten Druckanstieges unterscheidet sich stark. Der weitere Verlauf der Kurven ähnelt sich dafür. Für die große Differenz der anfänglichen Druckamplitude gibt es einige Ursachen. Einerseits verfügt der ICE3 über um 10% geringere Querschnittsfläche als der Railjet, wodurch eine um 10,5% reduzierte Amplitude zu erwarten ist. Als Hauptursache für die große Differenz der beiden Druckkurven ist die Kopfform der Züge. Diese unterscheiden sich maßgeblich. Der ICE3 verfügt über einen sehr langen, schmalen Kopf, weshalb der Druck bei der Einfahrt des Zuges in den Tunnel relativ langsam ansteigt. Die resultierende Druckwelle ist demnach langgezogen und flacher. Durch die unterschiedliche Beschaffenheit der ersten Druckwelle sind auch sämtliche Reflektionen dieser Welle an den Tunnelenden betroffen. Die Einfahrtswellen der Zugenden jedoch, welche die Messposition bei  $t=0,05$  s erreichen, sind einander ähnlicher als die Einfahrtswellen der Köpfe. Die Strömung löst am Heck ab, welches daher nicht komplett umströmt ist. Die

Geometrie des Hecks hat deshalb nicht so einen großen Einfluss auf die Entstehung der Druckwellen bei seiner Einfahrt, wie der Zugkopf auf die Wellen bei dessen Einfahrt. Bezüglich der Lasten auf Einbauten innerhalb des Tunnels ist demnach ein Zug mit kleiner Querschnittsfläche, langgezogenem Zugkopf und auch einer glatten Oberfläche weniger schädlich als ein großer, stumpfköpfiger Zug.

## 5.5 Einfluss von Rauigkeitselementen auf den Druckverlauf

In älteren Tunnel sind erfahrungsgemäß weniger druckbedingte Probleme zu verzeichnen. Ein Grund dafür ist das Schotterbett, das teils hier noch verbaut ist. Dieses Bett sorgt für eine Dämpfung und damit Abflachung der Druckwellen, sodass große Lasten auf Tunneleinbauten oder -wände oder gar der Tunnelknall vermieden werden können. Dies soll in Messungen mithilfe von luftdurchlässigem Filterschaum, welcher in den Tunnelboden eingesetzt wird, simuliert werden.

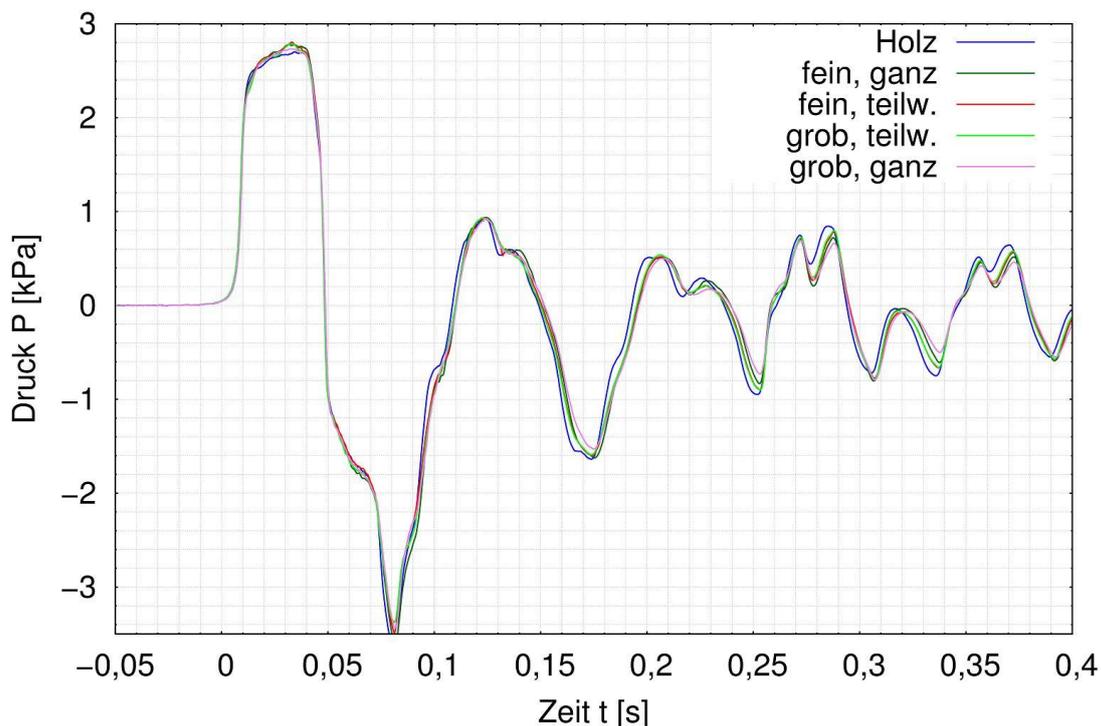


Abbildung 94: Druckverläufe bei versch. Rauigkeitsszenarien, Railjet, 230km/h, 38m<sup>2</sup>-Tunnel

In Abbildung 94 sind die sich bei den untersuchten Konfigurationen ergebende Druckverläufe dargestellt. Hierbei betitelt die Bezeichnung „ganz“ die beiden Konfigurationen, in denen der

Tunnelboden auf kompletter Länge mit dem porösen Material ausgestattet ist, und „teilw.“ jene mit porösem Material nur auf dem ersten und letzten Meter des Tunnels. Deutliche Unterschiede sind bei den untersuchten Konfigurationen zunächst nicht auszumachen.

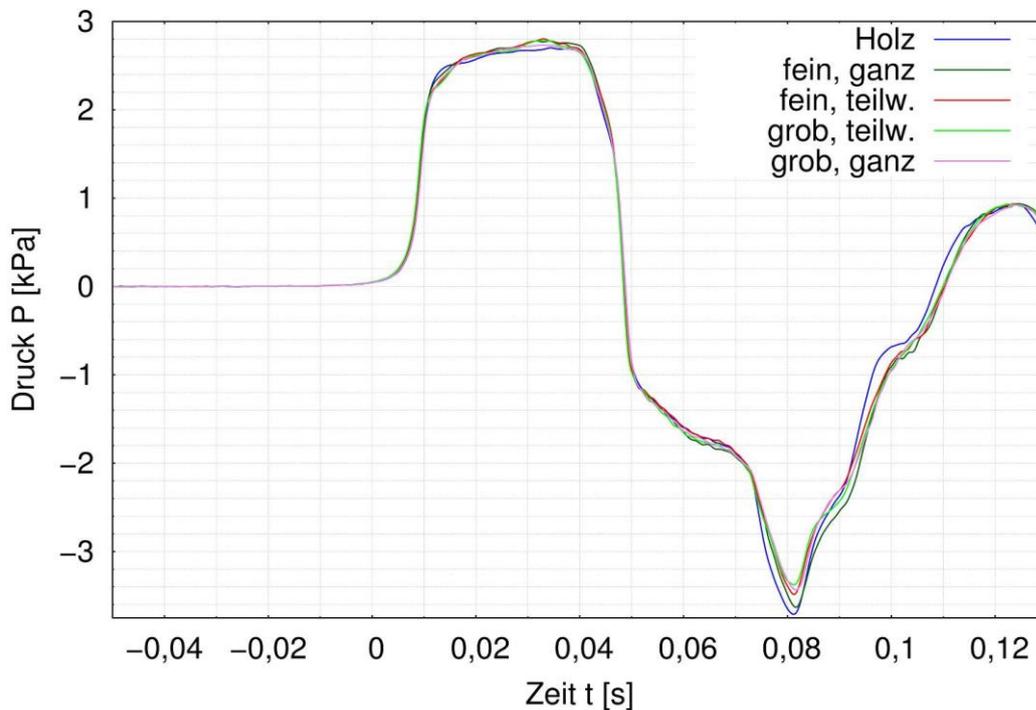


Abbildung 95: Druckverläufe bei versch. Rauigkeitsszenarien, Railjet, 230km/h, 38m<sup>2</sup>-Tunnel

Betrachtet man nun nur die Einfahrwelle und die Vorbeifahrt an der Beobachtungsstelle bei  $x=3\text{m}$  (siehe Abbildung 95), so kann man erkennen, dass der erste Druckanstieg in den Fällen mit porösen Einsätzen am Boden einen leicht anderen Verlauf aufweist als im Referenzfall.

Der Druck im Referenzfall steigt bis zu einer Amplitude von ca. 2,5kPa, dort weist die Kurve einen definierten Knick auf und steigt nur noch leicht, aber gleichmäßig weiter an, was durch die Reibungseffekte an Tunnel- und Zugwand und damit wachsende Grenzschichten zu erklären ist. In den Fällen mit Rauigkeitselementen jedoch steigt der Druck nur bis ca. 2,2-2,3kPa an. Ab dann weisen die Kurven mehrere kleinere zusätzliche Anstiege auf, wodurch die maximale Druckamplitude sogar etwas über der des Referenzfalls liegt. Die Druckwellen dringen scheinbar, wie gewünscht, in den Filter ein und wirken sich erst mit einer gewissen und vom Filter abhängigen Verzögerung wieder auf das Tunnelinnere aus. Somit wirken sie wie eine Vielzahl an kleinen Kammern. Der Einfluss ist allerdings, wie der Abbildung zu entnehmen ist, verhältnismäßig gering. Auch bei der Zugvorbeifahrt an der Messposition

wirken sich die Filter auf den Druckverlauf aus. Das starke Druckminimum wird etwas abgeschwächt, was sich in leicht geringeren Lasten auf die sich potentiell an der Messposition befindlichen Tür äußern kann.

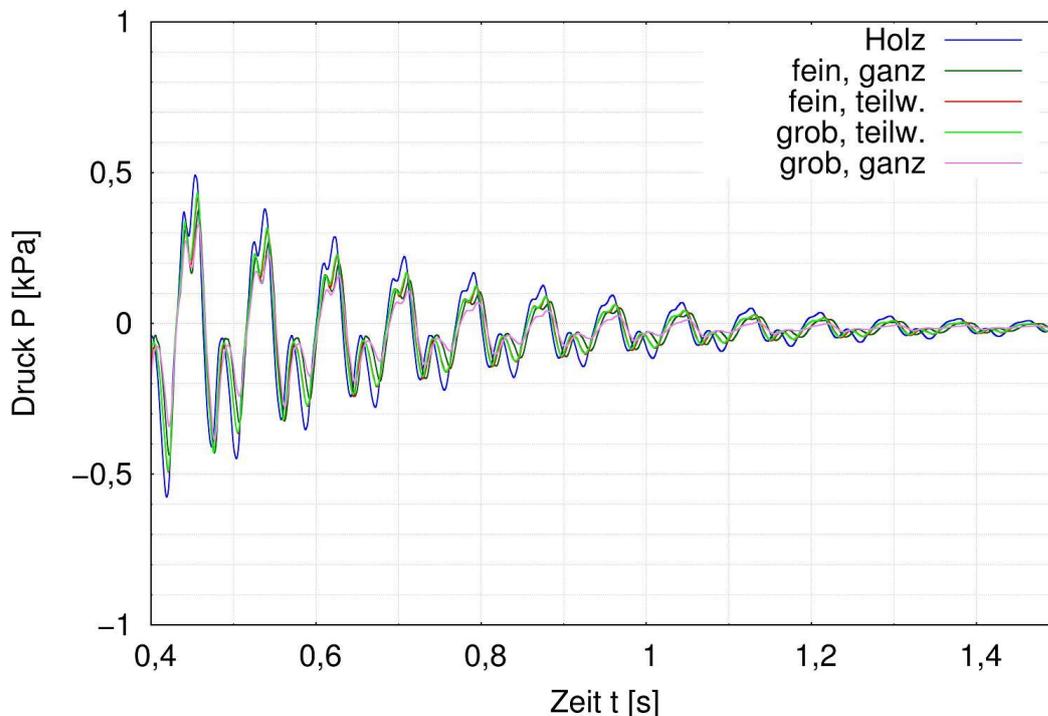


Abbildung 96: Druckverläufe bei versch. Rauigkeitsszenarien, Railjet, 230km/h, 38m<sup>2</sup>-Tunnel

Ein entscheidender Unterschied zwischen den verschiedenen Konfigurationen ist aber während des Abklingens der Druckwellen zu verzeichnen, was in Abbildung 96 gezeigt ist. Das dargestellte Zeitintervall ist so gewählt, dass der Zug den Tunnel bereits komplett verlassen hat und die Druckwellen nicht mehr direkt durch den Zug beeinflusst werden. Während die blaue Kurve, welche die Referenzmessung darstellt, anfangs beinahe dieselbe Amplitude aufweist wie die anderen, überwiegt diese Amplitude nach mehreren Oszillationen deutlich. Insbesondere die rosafarbene Kurve, die mit dem großzelligen Filter auf der kompletten Tunnellänge aufgenommen wurde, weist eine hohe Dämpfung auf. Die hellgrüne und rote Kurve für die beiden Konfigurationen mit porösen Einsätzen auf dem ersten und letzten Meter des Tunnels liegen aufeinander, ein Unterschied ist hier kaum auszumachen. Sie weisen aber ebenfalls nach einigen Oszillationen deutlich kleine Werte auf als der Referenzfall. Auch die Messung mit dem kleinzelligen Filter hat eine Verbesserung der Dämpfung gezeigt, diese Kurve liegt zwischen den der beiden teilweise porösen Tunnelböden und der des großzelligen Filterschaums. Insgesamt ist festzustellen, dass die

Rauhigkeitselemente sich auf die Druckwellen positiv hinsichtlich einer Verminderung der Druckamplituden auswirken können. Hierbei ist die Wahl der Porosität von Bedeutung, was insbesondere im Bereich der abklingenden, oszillierenden Druckwellen ersichtlich ist. Die Reduktion der Druckamplituden ist jedoch relativ zu den absoluten Druckamplituden in den untersuchten Konfigurationen recht klein.

# Optimierung der Tunnelaerodynamik für Hochgeschwindigkeitsstrecken OPTUNAMIK

## ERGEBNISBERICHT AP5 Bewertung: Aerodynamische Belastung und Lebenszyklus

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2014)

### AutorInnen:

Dr. Stefan LACHINGER

Dr. Alois VORWAGNER

Mag. Helmut KÜHNELT

Dr. Daniela HEINE

### Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

### Auftragnehmer:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

## 6 BEWERTUNG

Im Rahmen der Bewertung werden die Ergebnisse hinsichtlich aerodynamischer Verbesserung und Lebensdauer bewertet.

### 6.1 Aerodynamische Bewertung der Maßnahmen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der CFD-Berechnungen und der TSG-Messungen bezüglich der auftretenden maximalen Druckpegel im Tunnel analysiert.

#### 6.1.1 Druckverlauf im Modelltunnel

Die Drucksignatur der CFD-Simulationen ist exemplarisch in Abbildung 97 für die Änderung der Geschwindigkeit sowie in Abbildung 98 für die Änderung der Fläche dargestellt. Eine Übersichtsdarstellung aller Fälle findet sich im Anhang in den Kapiteln 8.7 und 8.8.

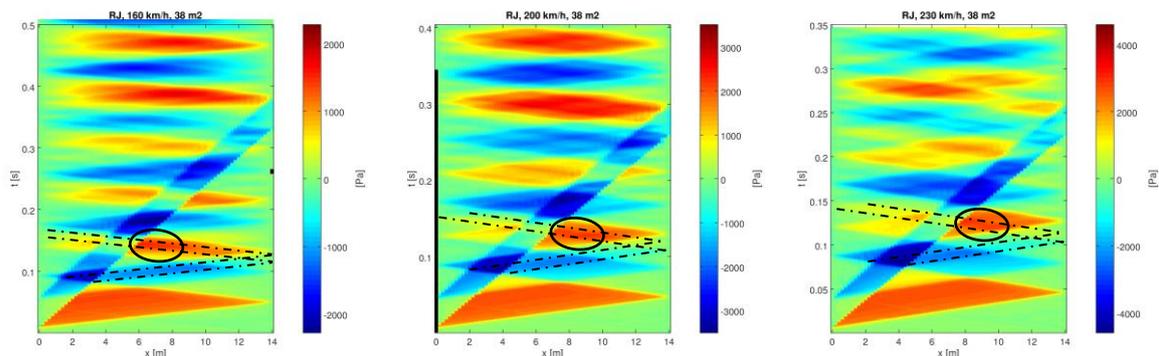


Abbildung 97: CFD-Simulation, Railjetmodell: Drucksignatur bei 160, 200 und 230 km/h für die äquivalente Tunnelquerschnittsfläche von 38 m<sup>2</sup>. Markiert ist die am Zug reflektierte Welle, die zur Druckerhöhung in der zweiten Tunnelhälfte führt.

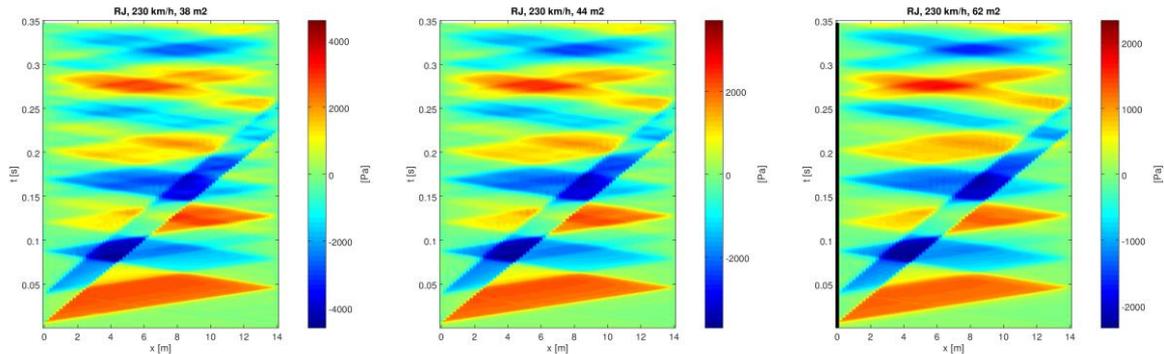


Abbildung 98: CFD-Simulation, Railjetmodell: Drucksignatur bei 230 km/h für die äquivalente Tunnelquerschnittsfläche von 38, 44 und 62 m<sup>2</sup>.

Der **Maximaldruck** im Tunnel wird vorrangig von der Kopfeinfahrwelle bestimmt, die in Fahrtrichtung laufend als Kompressionswelle auftritt. Ab der Tunnelmitte bzw. in der zweiten Tunnelhälfte kommt es beim zweiten Vorlauf der Kopfeinfahrwelle zu einer Druckerhöhung, siehe Markierung in Abbildung 97. Dies ist ein Sekundäreffekt der Kopfeinfahrwelle, die nach der ersten (gegenphasigen) Reflexion am Tunnelausgang als Kompressionswelle auf den Zug trifft. Ein Anteil (entsprechend des Verhältnisses von Frontalfläche des Zugs zur freien Querschnittsfläche) wird dort gleichphasig und am Tunnelausgang gegenphasig reflektiert und überlagert sich als rücklaufende Expansionswelle konstruktiv mit der vorlaufenden 2-fach reflektierten Kopfeinfahrwelle. Dadurch können in der zweiten Tunnelhälfte Drücke entstehen, die leicht höher sind als die der direkten Kopfeinfahrwelle, im Modell-Tunnel vor allem bei 200 km/h.

Der **Minimaldruck** wird vorrangig von zwei laufenden Expansionswellen bestimmt, der rücklaufenden Kopfeinfahrwelle und der vorlaufenden Heckeinfahrwelle. Der Minimaldruck fällt im Bereich des Zugs noch weiter ab, da sich hier die Expansionswellen mit dem Druckabfall des Zugs überlagern. Wie oft dies geschieht, hängt von der Geschwindigkeit des Zugs ab. Im Modelltunnel mit 14 m Länge geschieht dies 4-mal bei 160 km/h und jeweils 3-mal bei 200 und 230 km/h, wobei die letzte Überlagerung in der Nähe des Tunnelendes stattfindet und der sich ergebende Minimaldruck bereits relativ gering ist.

Die Druckniveaus beim **Abklingvorgang** der Druckwellen im Tunnel (nachdem der Zug den Tunnel verlassen hat) werden bestimmt durch die Heckeinfahrwelle, deren Pegel und Timing geschwindigkeitsabhängig sind, und die sich mit den im Tunnel laufenden

Druckwellen je nach Phasenlage mehr oder weniger konstruktiv oder destruktiv überlagert. In der CFD-Berechnung tritt bei 200 km/h eine stark konstruktive Überlagerung auf, die zu Druckpegel führen, die vergleichbar mit denen bei 230 km/h sind, während dies im TSG-Versuch weniger deutlich ausgeprägt ist. Dagegen tritt im CFD-Versuch bei 250 km/h (nur für den 62 m<sup>2</sup> Tunnel berechnet) zu Beginn des Ausklingvorgangs eine destruktive Überlagerung auf, die die laufenden Wellen weitgehend auslöscht, siehe Kapitel 8.7 des Anhangs.

### 6.1.2 Vergleich der Tunnelquerschnittsfläche

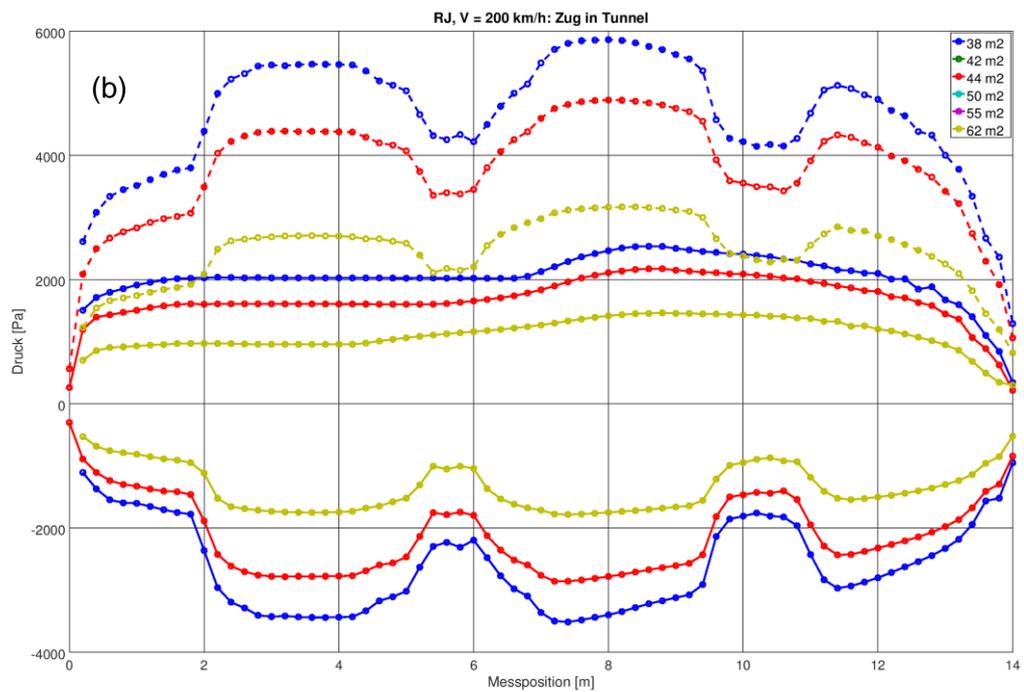
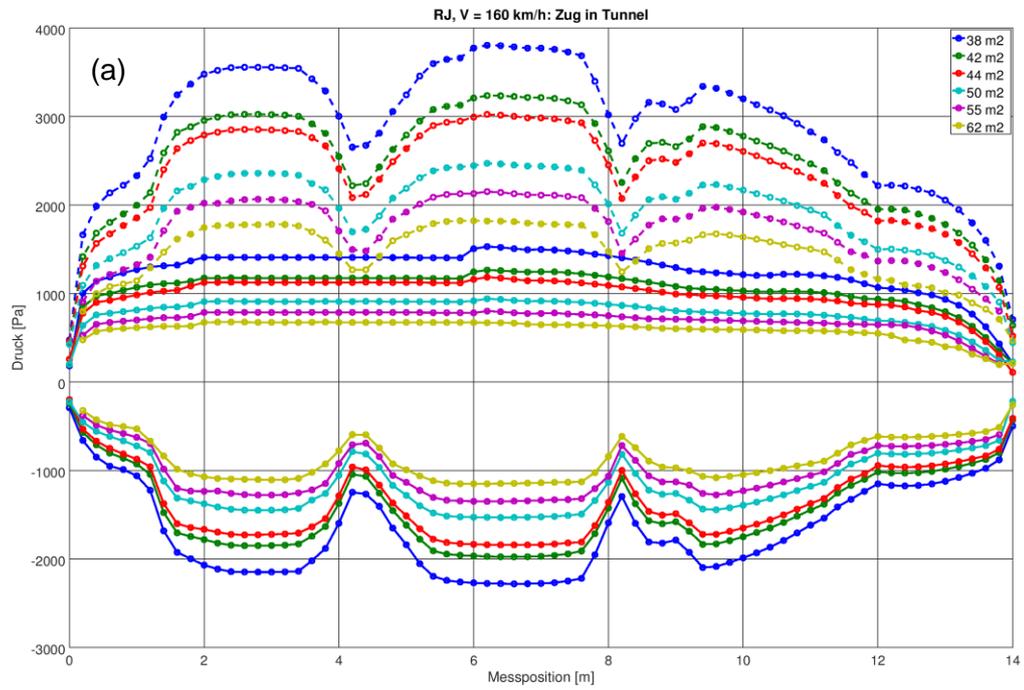
Aus den Druckverläufen (Abbildung 97) werden Maximaldruck, Minimaldruck und Druckdifferenz über die Länge des Modelltunnels ausgewertet für die Tunneldurchmesser 38 m<sup>2</sup> bis 62 m<sup>2</sup> bei 160, 200 und 230 km/h (siehe Simulationsmatrix in Kapitel 2.4.1), jeweils für die Zeitspanne der Zugsdurchfahrt, siehe Abbildung 99.

Hier wird die Erhöhung des Maximaldrucks ab der Tunnelmitte (ab 6 – 8 m, je nach Geschwindigkeit des Zugs) sichtbar, sowie die geschwindigkeitsabhängige Anzahl der konstruktiven Überlagerungen im Minimaldruck.

Der Maximaldruck im Tunnel als Funktion der Tunnelquerschnittsfläche ist in Abbildung 100 dargestellt. Der Maximaldruck im ersten Drittel des Tunnels, Abbildung 100 (a) ist bestimmt von der Kopfeinfahrwelle und steigt annähernd quadratisch mit abnehmender Querschnittsfläche an, wobei die Datenwerte als Polynom zweiten Grades mittels Methode der kleinsten Quadrate beschrieben wurden. Abbildung 100 (b) zeigt den Maximaldruck über die gesamte Tunnellänge. Hier ist bei 200 km/h zu bemerken, dass es aufgrund von konstruktiver Überlagerung bei etwa 8 m ein Maximaldruck auftritt, der größer ist als bei 230 km/h. Abbildung 100 (c) zeigt den Minimaldruck als gefittete Funktionenschar.

In Abbildung 101 sind Maximaldruck, Minimaldruck sowie maximale und durchschnittliche Druckdifferenz dargestellt.

In den Abbildungen 102 und 103 sind die Druckniveaus für den Abklingvorgang dargestellt. In der CFD-Simulation sind bei 200 km/h aufgrund von konstruktiver Überlagerung der Heckausfahrwelle mit den laufenden Wellen im Tunnel nur geringfügig kleiner Druckpegel zu finden als bei 230 km/h.



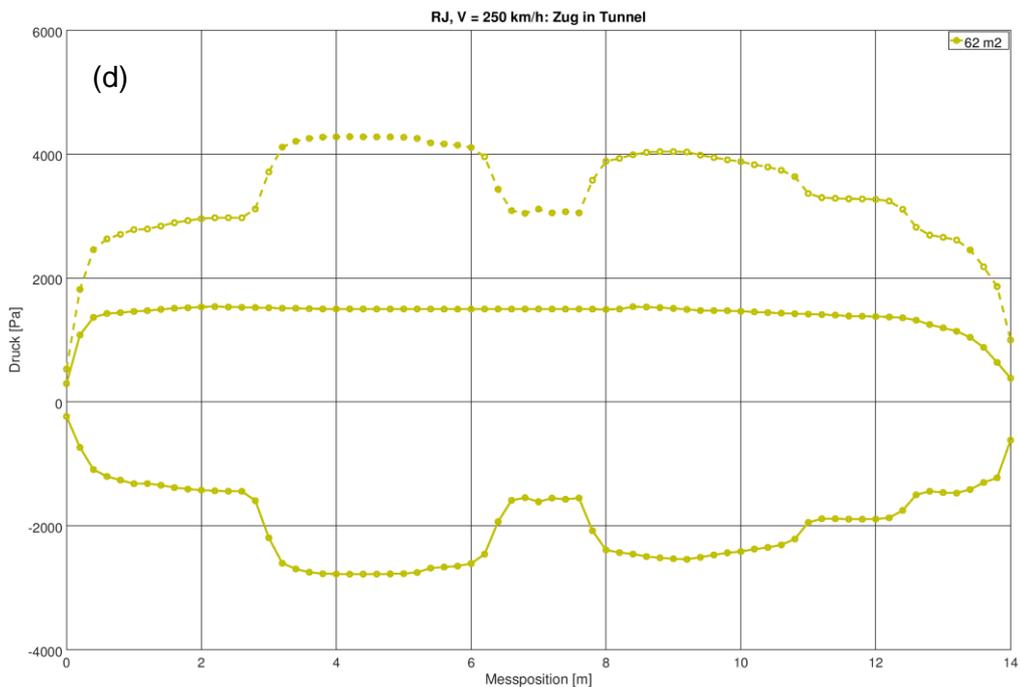
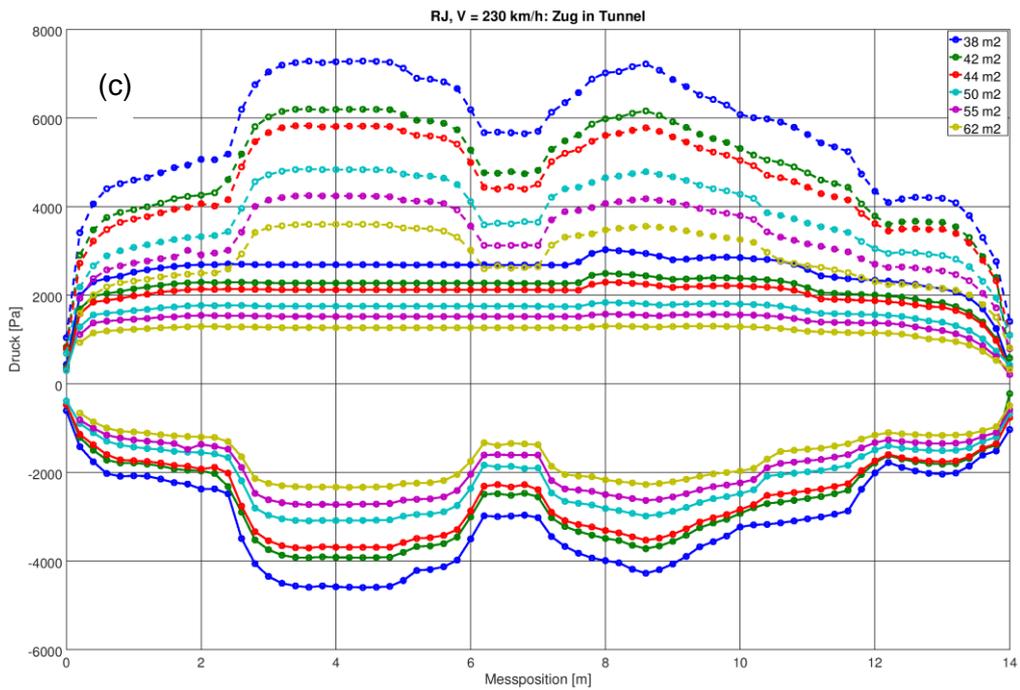
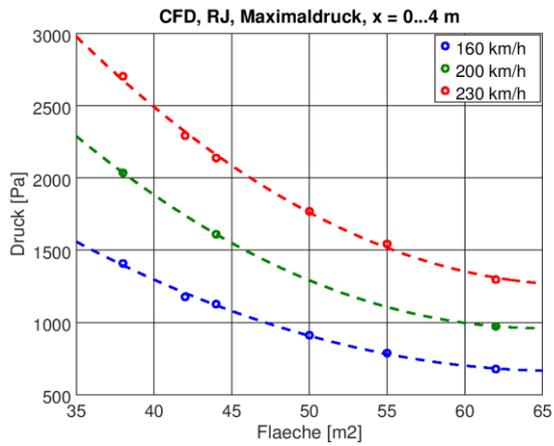
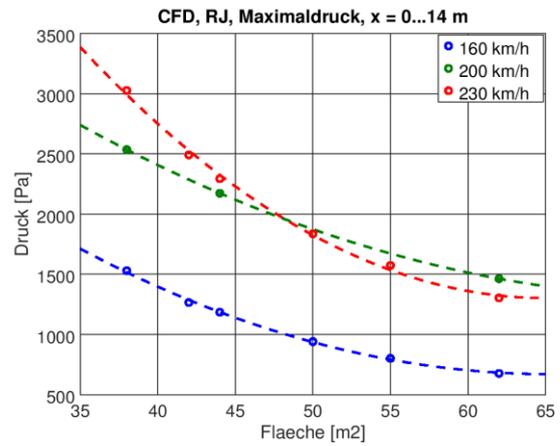


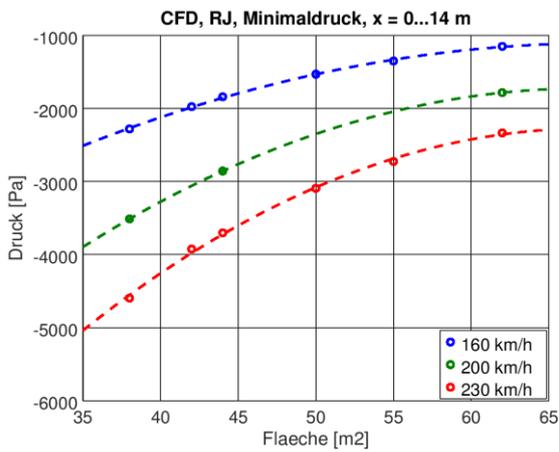
Abbildung 99: CFD-Simulation, äquivalente Tunnelquerschnittsfläche 38 – 62 m<sup>2</sup>, Railjet-Modell: Verlauf von Maximal-, Minimaldruck und Differenz der Extremwerte (- - -) über die Tunnellänge für das RJ-Modell bei (a) 160 km/h, (b) 200 km/h, (c) 230 km/h und (d) 250 km/h, während der Zugsdurchfahrt.



(a)

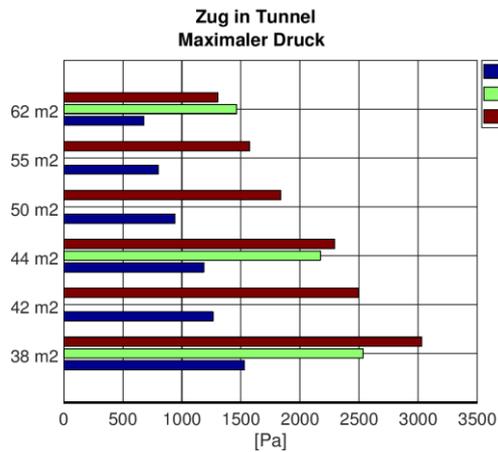


(b)

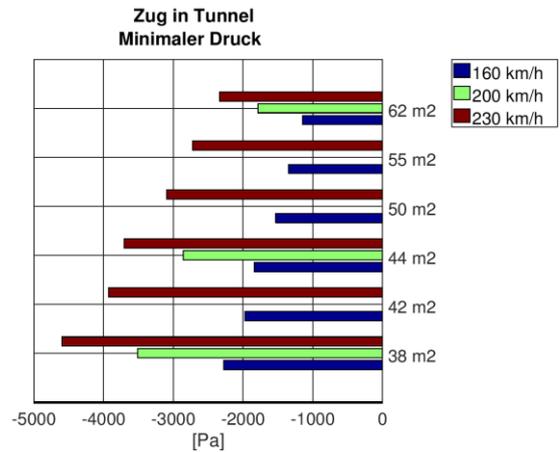


(c)

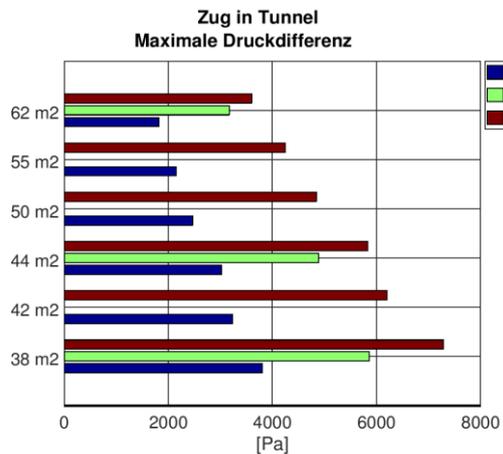
Abbildung 100: CFD-Simulation, äquivalente Tunnelquerschnittsfläche 38 – 62 m<sup>2</sup>, Railjet-Modell: Maximaldruck in Abhängigkeit der Geschwindigkeit auf den ersten 4 m (a) und über die gesamte Tunnellänge (b); Minimaldruck in Abhängigkeit der Geschwindigkeit über die gesamte Tunnellänge (c).



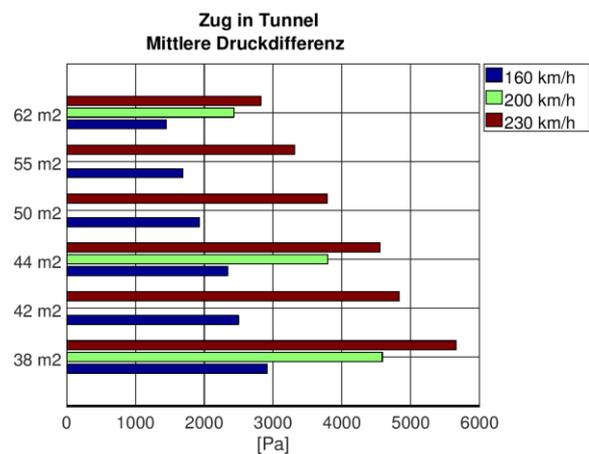
(a)



(b)

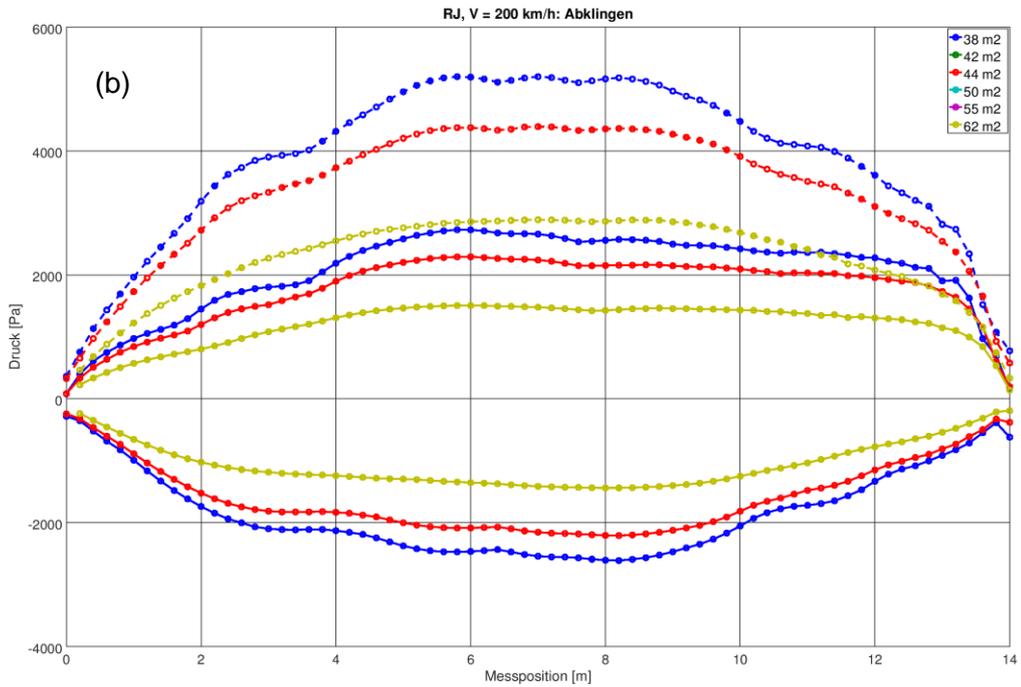
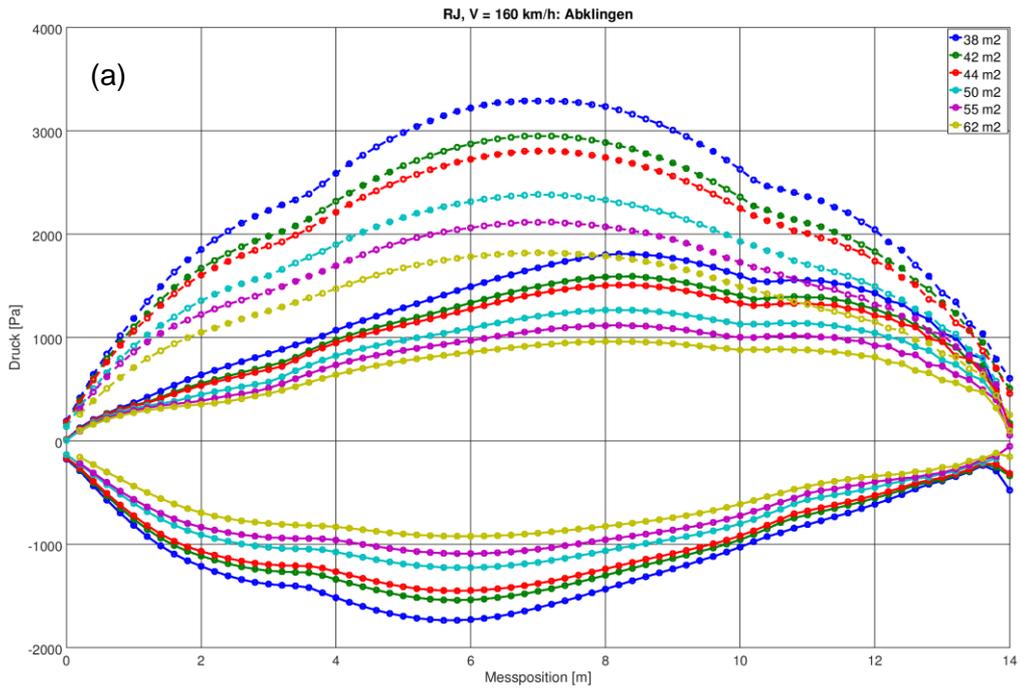


(c)



(d)

Abbildung 101: CFD-Simulation, äquivalente Tunnelquerschnittsfläche 38 – 62 m<sup>2</sup>, Railjet-Modell: Vergleich des Extremwerts von (a) Maximaldruck, (b) Minimaldruck, (c) maximalen Druckdifferenz und (d) mittleren Druckdifferenz im Tunnel, während der Zugsdurchfahrt



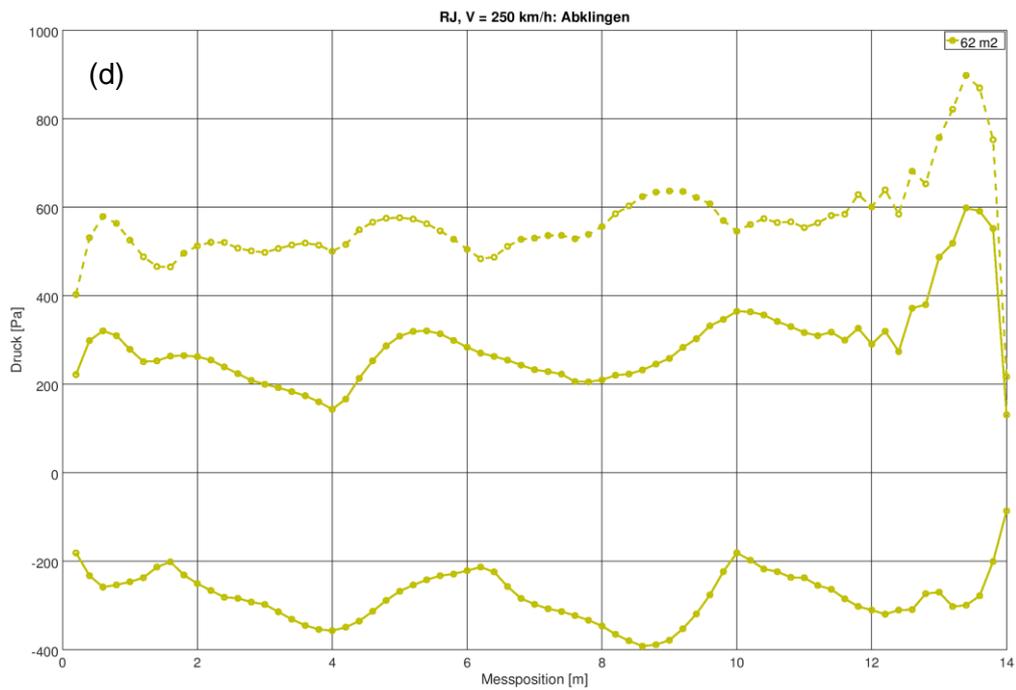
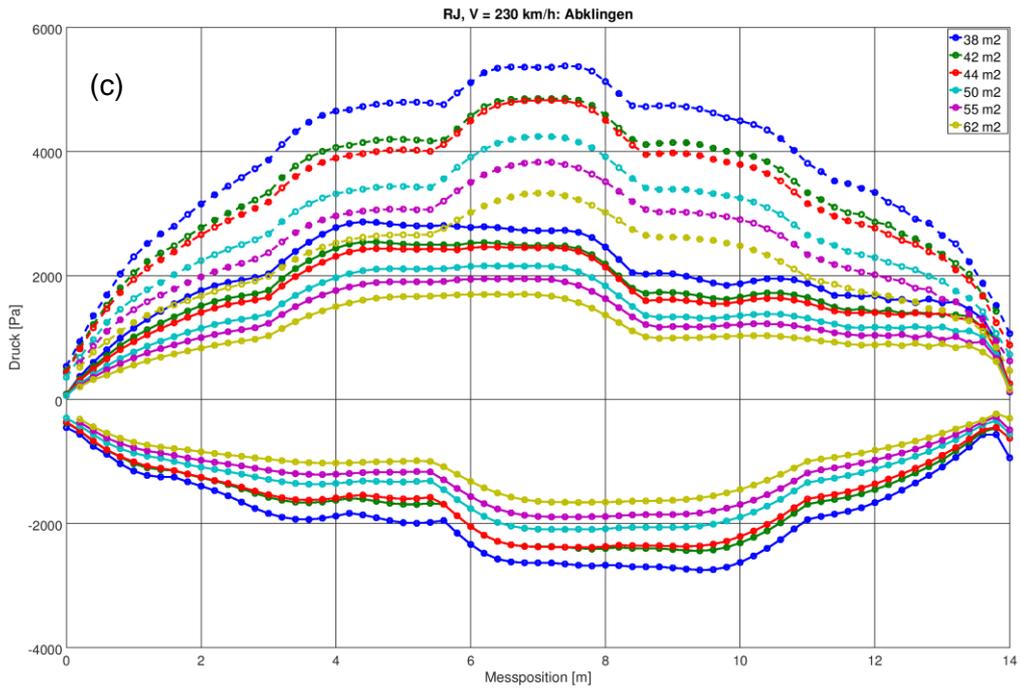


Abbildung 102: CFD-Simulation, äquivalente Tunnelquerschnittsfläche 38 – 62 m<sup>2</sup>, Railjet-Modell: Verlauf von Maximal-, Minimaldruck und Differenz der Extremwerte (- - -) über die Tunnellänge für das RJ-Modell bei (a) 160 km/h, (b) 200 km/h, (c) 230 km/h und (d) 250 km/h, während des Abklingvorgangs.

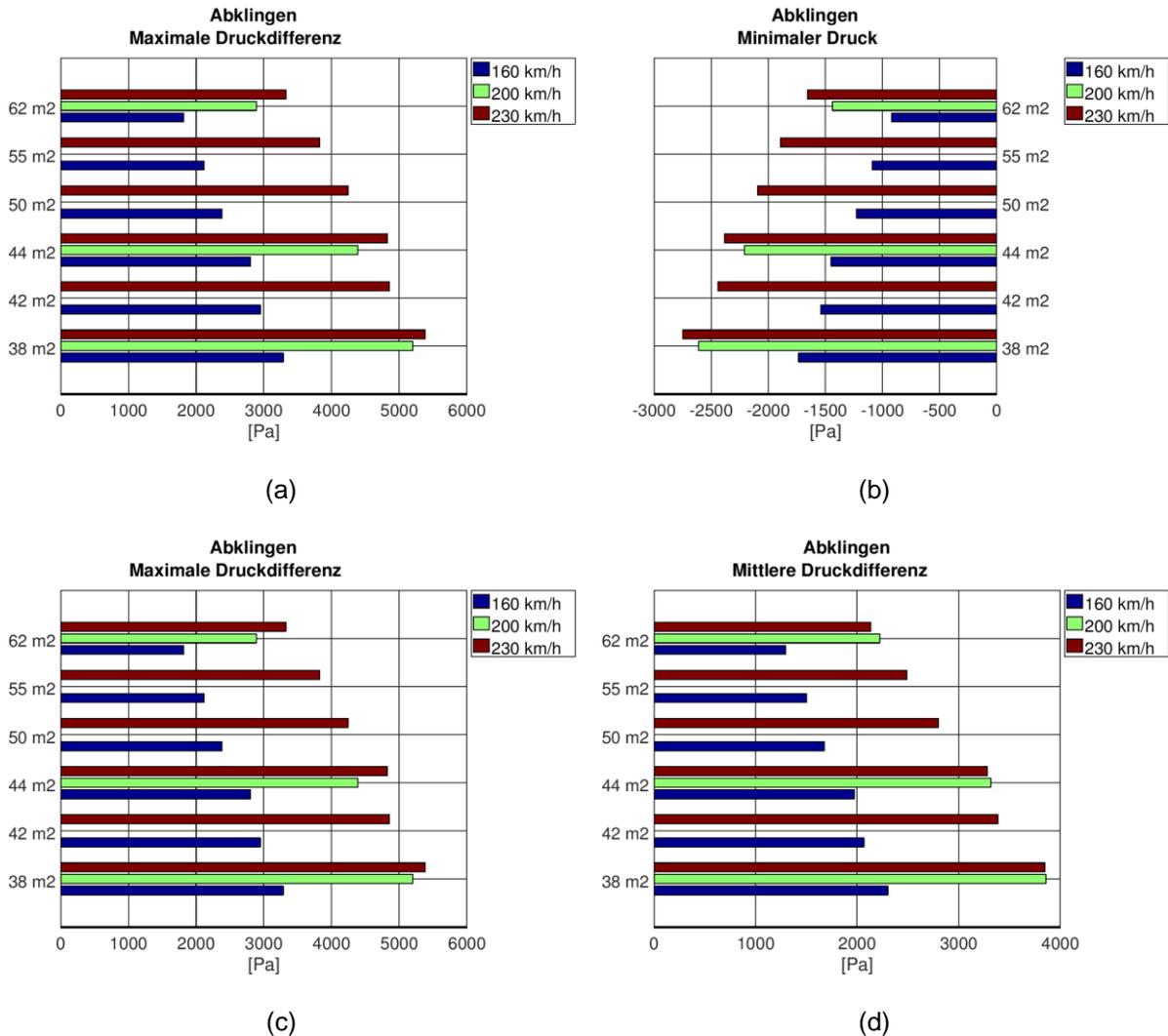


Abbildung 103: CFD-Simulation, äquivalente Tunnelquerschnittsfläche 38 – 62 m<sup>2</sup>, Railjet-Modell: Vergleich des Extremwerts von (a) Maximaldruck, (b) Minimaldruck, (c) maximalen Druckdifferenz und (d) mittleren Druckdifferenz im Tunnel während des Abklingvorgangs.

### 6.1.3 Vergleich der Querschlagskonfigurationen

Für die Querschlagsvarianten (ohne, klein, groß, schräg) und Aufweitung (äquivalent 38 m<sup>2</sup> → 44 m<sup>2</sup> → 38 m<sup>2</sup>) werden Maximaldruck, Minimaldruck und Druckdifferenz über die Länge des Modelltunnels verglichen, jeweils während der Zugsdurchfahrt und des Abklingvorgangs. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 104-106 für den TSG-Versuch und in den Abbildungen 107-109 für die CFD-Berechnungen dargestellt.

Im TSG-Versuch, siehe Abbildungen 104-106, ist der Maximaldruck aller Querschlagsvarianten etwas höher als im querschlagslosen Fall, allerdings über eine Länge zwischen 2 und 9-10 m des Tunnels, ziemlich unabhängig von der jeweiligen Form des Querschlagsanschlusses. Für den Minimaldruck zeigen bei 160 km/h die größten Unterschiede. Bei allen Geschwindigkeiten hat die querschlagslose Variante die geringste Druckdifferenz bei 4 und 8 m, gefolgt vom kleinen Querschlag. Die anderen Varianten weisen deutlich höhere Druckdifferenzen auf. Bei 230 km/h weisen großer und schräger Querschlag im Bereich des Querschlags bei 3 m etwas geringere Minimaldruckpegel auf als die engen Varianten, jedoch höhere bei 2 m (Beginn des großen / schrägen Querschlags).

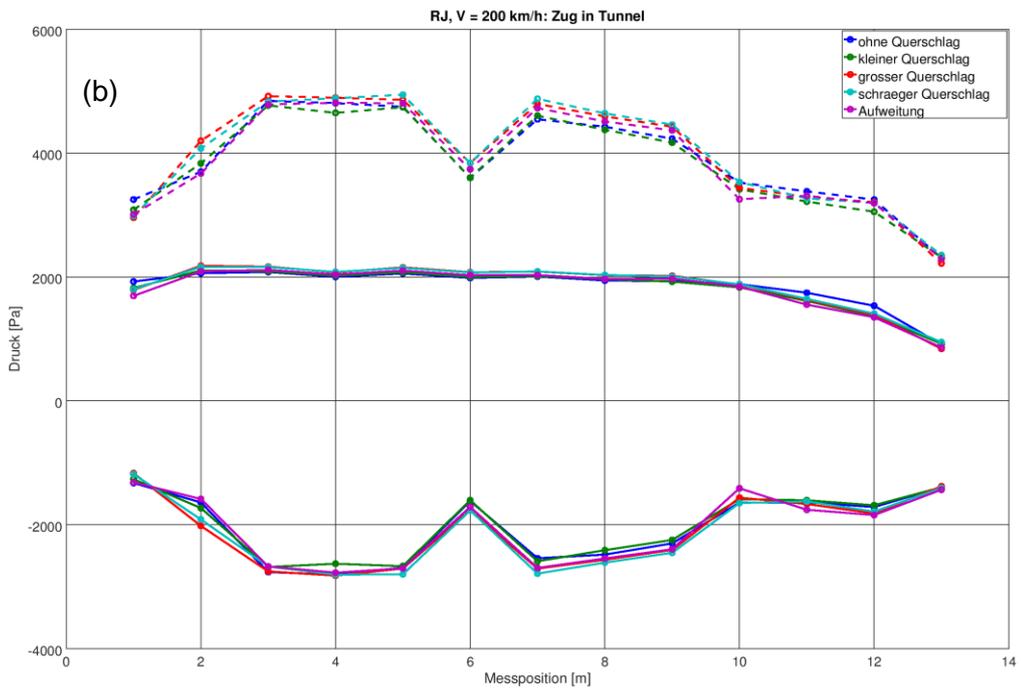
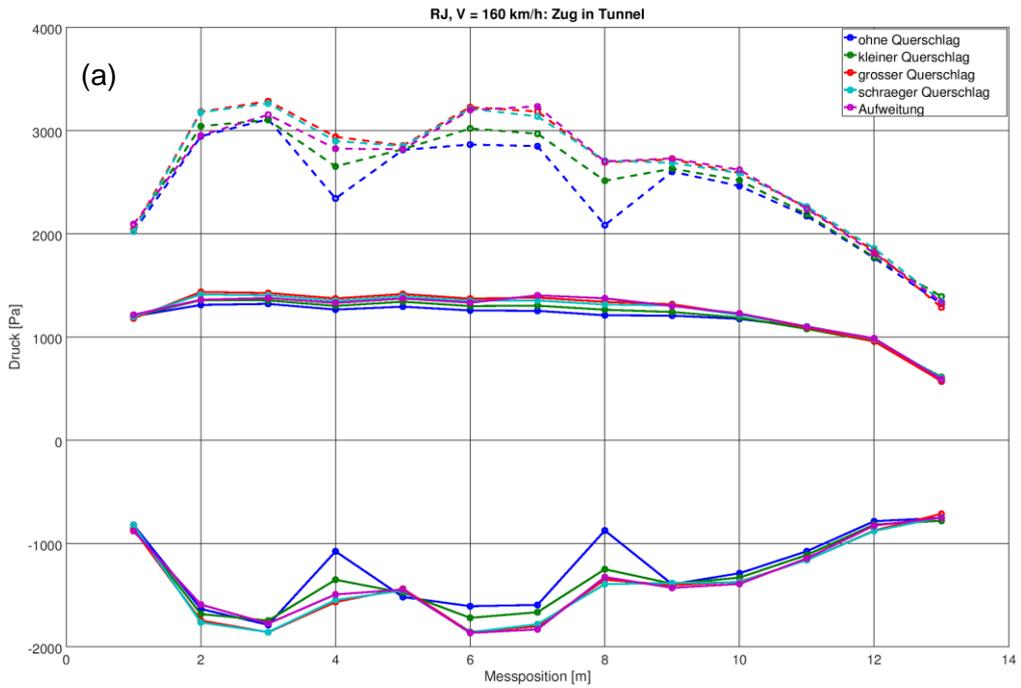
Die CFD-Simulation, siehe Abbildungen 107-109, zeigt, dass bei allen Geschwindigkeiten die Druckdifferenz der querschlagslosen Variante und des kleinen Querschlags deutlich unter der der anderen (weiten) Konfigurationen liegt. Bei 200 km/h liegt der Maximaldruck des kleinen Querschlags ab der Tunnelmitte unter dem der querschlagslosen Variante. In der CFD-Simulation ist die Druckerhöhung in der zweiten Tunnelhälfte aufgrund von konstruktiver Überlagerung stärker ausgeprägt als im TSG-Versuch.

Die räumlich höher auflösende CFD-Simulation zeigt im Bereich des Querschlagsanschlusses (mit Mitte bei 3 m) für den kleine Querschlag bei 3 m einen deutlich erhöhten Minimaldruckpegel auf (bei 200 und 230 km/h), während die weiten Varianten (groß und schräg) bei Beginn bzw. Ende der Querschnittsveränderung deutlich erhöhten Minimaldruckpegel zeigen (v.a. bei 160 und 200 km/h).

Sowohl TSG-Versuch (Abbildung 106) und CFD-Simulation (Abbildung 109) zeigen für den maximalen und mittleren relative Druckdifferenz im Tunnel, bezogen auf die querschlagslose Variante, dass keine Querschlagsvariante zu einer substantiellen Verringerung der Druckdifferenz führt.

Die Unterschiede der maximalen und mittleren Druckdifferenz im Tunnel bezogen auf den Tunnel ohne Querschlag sind relativ gering, siehe Abbildung 106, jedoch bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten am stärksten. **Insgesamt weist der kleine Querschlag den geringsten negativen Effekt aller lokalen Erweiterungen auf.**

Beim Abklingen, siehe Abbildung 110, zeigen die Querschlagsaufweitungen im Vergleich zum querschlagslosen Tunnel einer zum Teil deutlichen Druckverringerung, im TSG-Versuch mehr als in der CFD-Simulation: Auf hier ist der kleine Querschlag tendenziell im Vorteil.



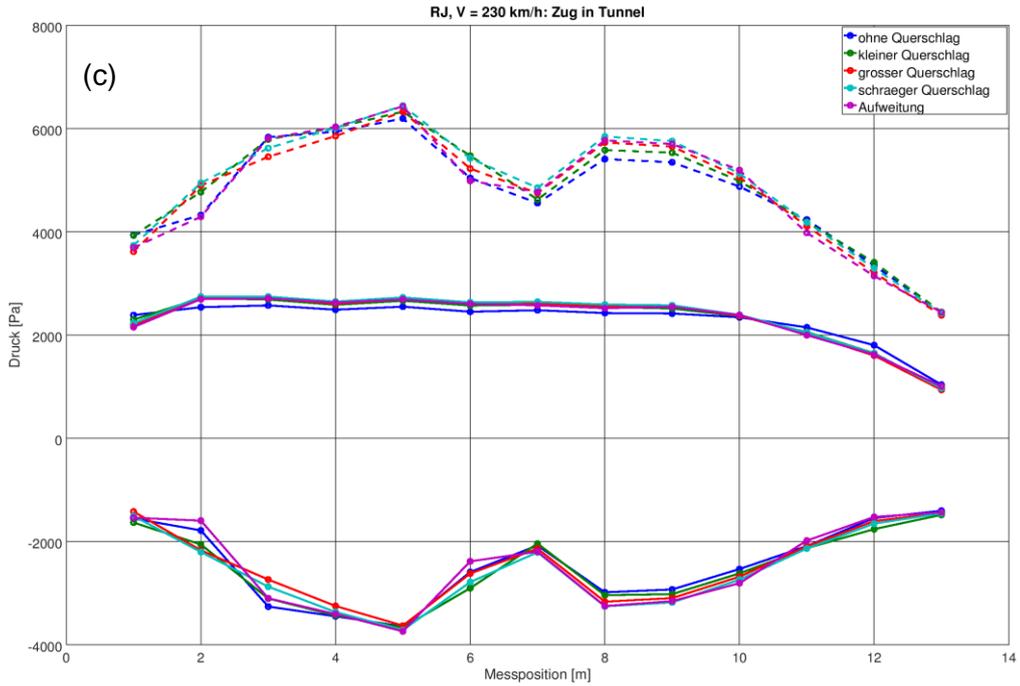
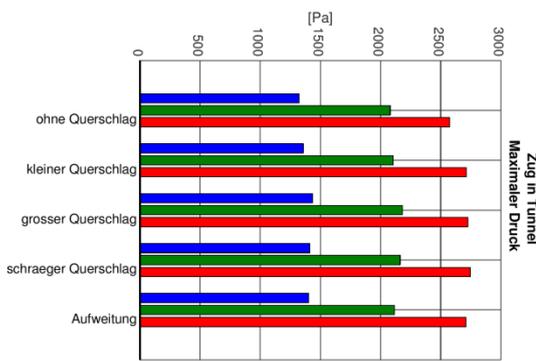
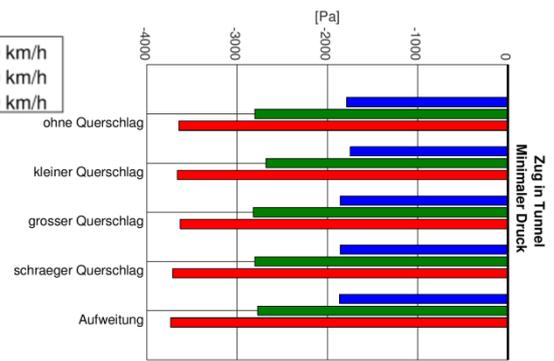


Abbildung 104: TSG-Versuch: Verlauf von Maximal-, Minimaldruck und Differenz der Extremwerte (- -) über die Tunnellänge für das RJ-Modell bei (a) 160 km/h, (b) 200 km/h und (c) 230 km/h während der Zugsdurchfahrt.



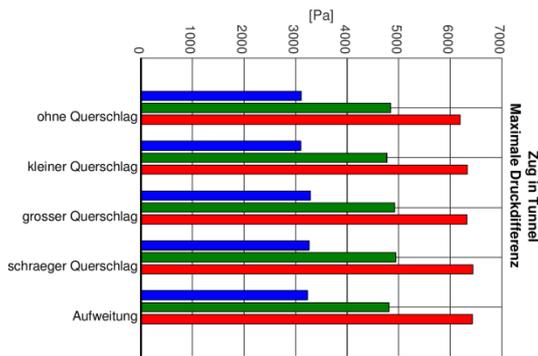
(a)



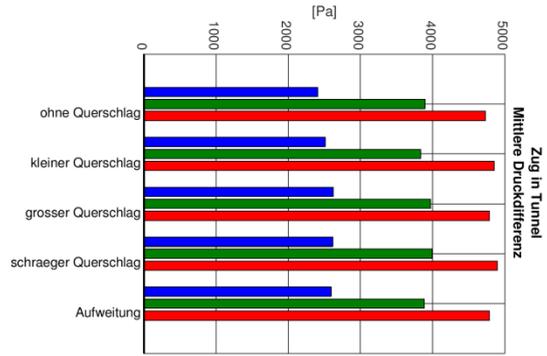
(b)

(c)

(d)

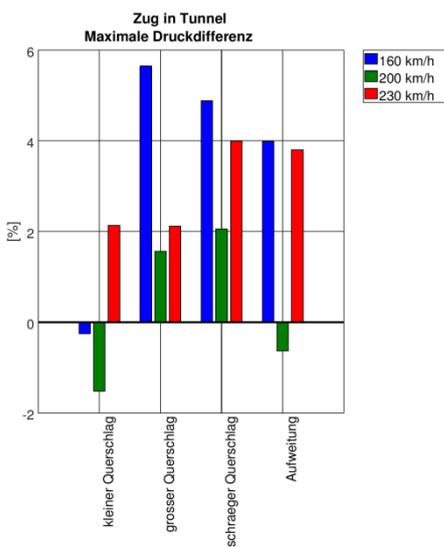


(c)

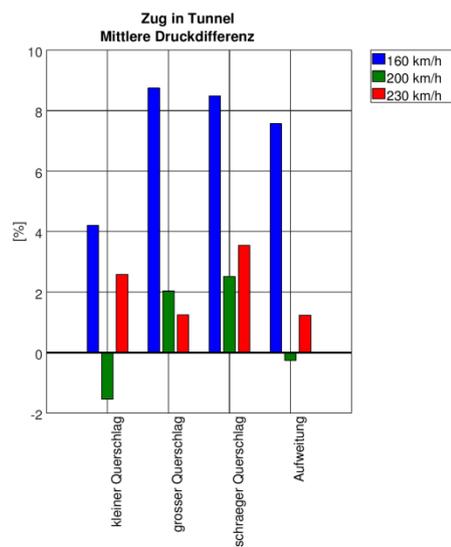


(d)

Abbildung 105: TSG-Versuch, 38 m<sup>2</sup> Tunnel, Railjet-Modell: Vergleich des Extremwerts von (a) Maximaldruck, (b) Minimaldruck, (c) maximalen Druckdifferenz und (d) mittleren Druckdifferenz im Tunnel während der Zugsdurchfahrt.

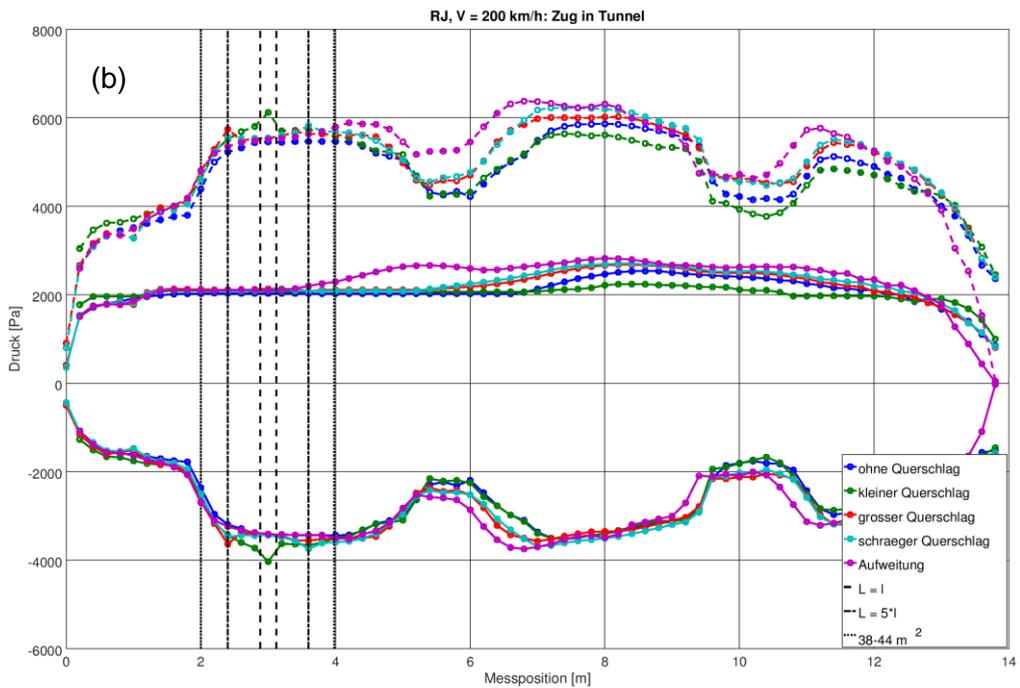
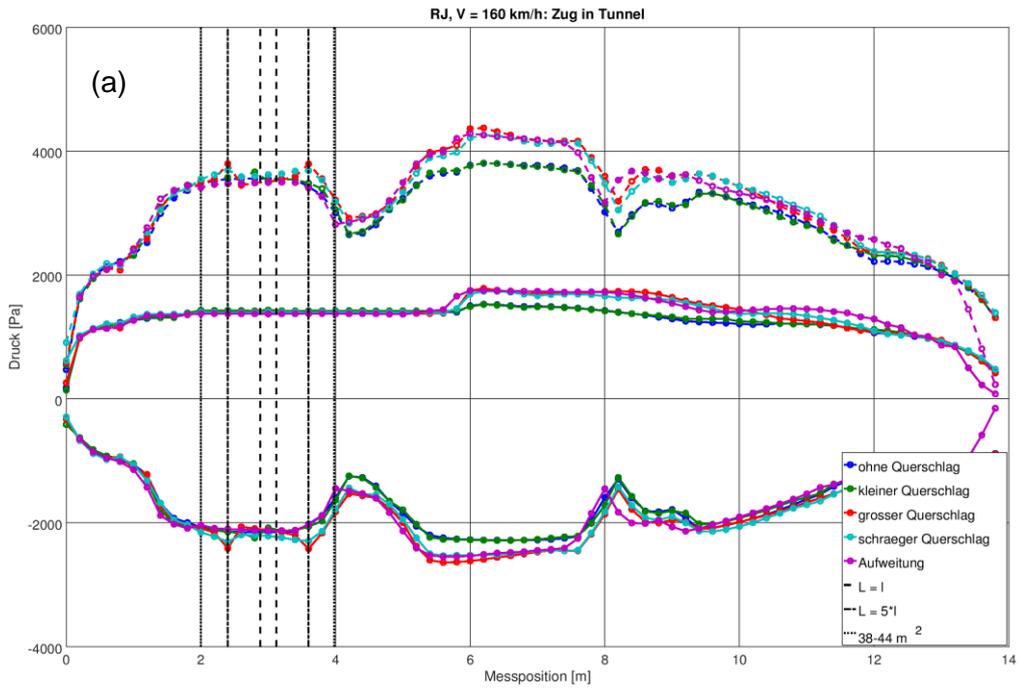


(a)



(b)

Abbildung 106: TSG-Versuch, 38 m<sup>2</sup> Tunnel, Railjet-Modell: Unterschied der maximalen (a) und mittleren (b) Druckdifferenz bezogen auf den Tunnel ohne Querschlag während der Zugsdurchfahrt.



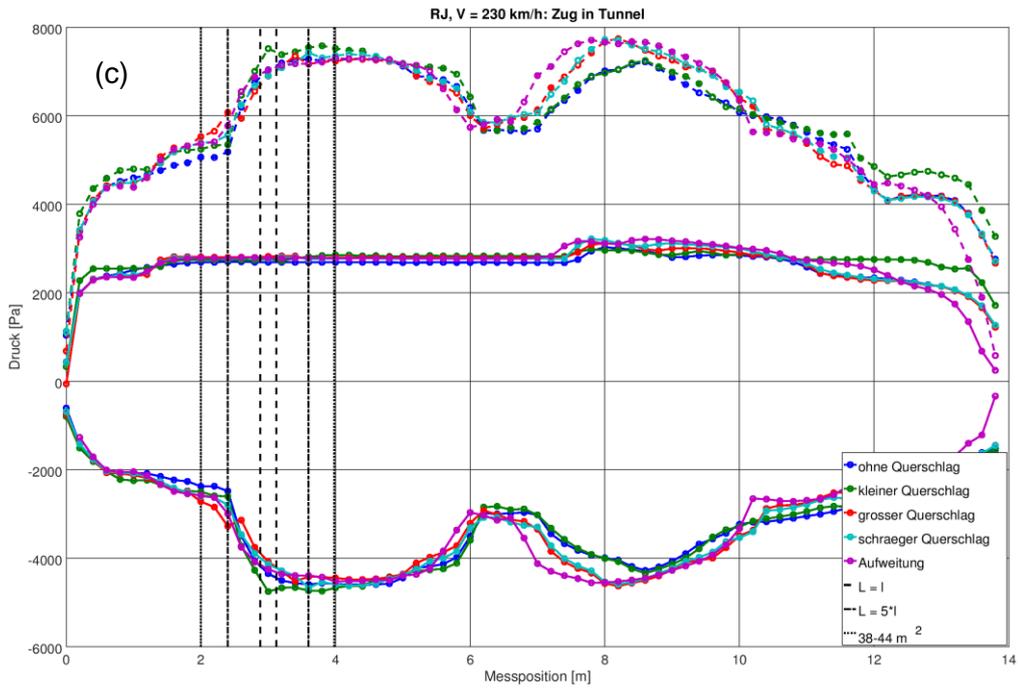
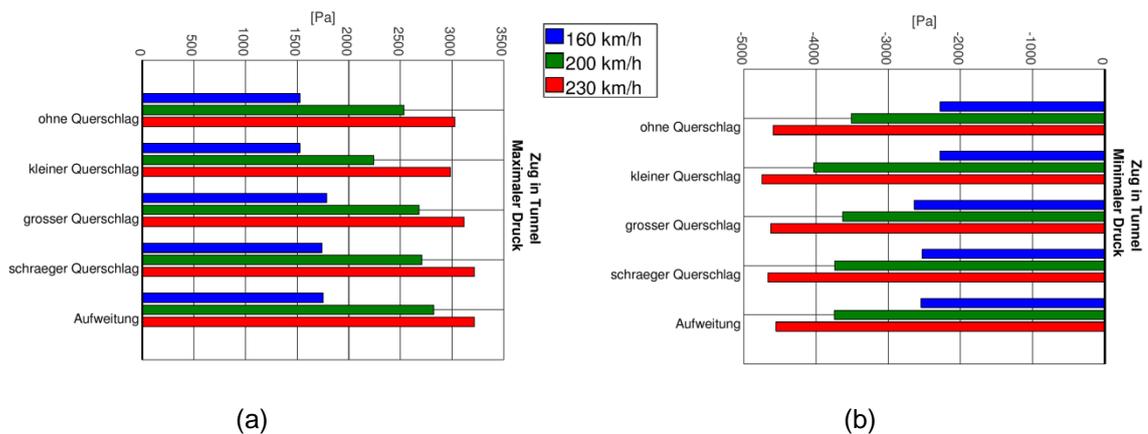
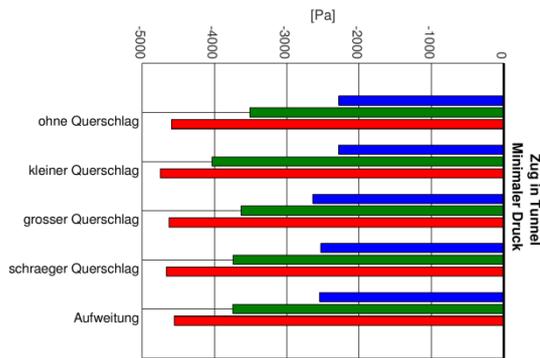
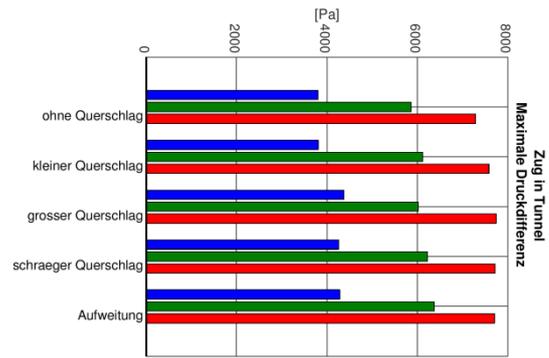


Abbildung 107: CFD-Simulation, 38 m<sup>2</sup> Tunnel, Railjet-Modell:: Verlauf von Maximal-, Minimaldruck und Differenz der Extremwerte (- - -) über die Tunnellänge für das RJ-Modell bei (a) 160 km/h, (b) 200 km/h und (c) 230 km/h, während der Zug sich im Tunnel befindet. Weiters eingezeichnet sind Beginn und Ende von kurzen und weiten Querschlagsanschlüssen und der Auweitung, jeweils zentriert bei 3 m.



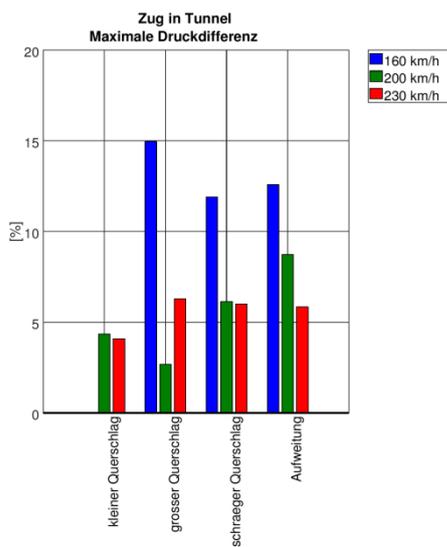


(c)

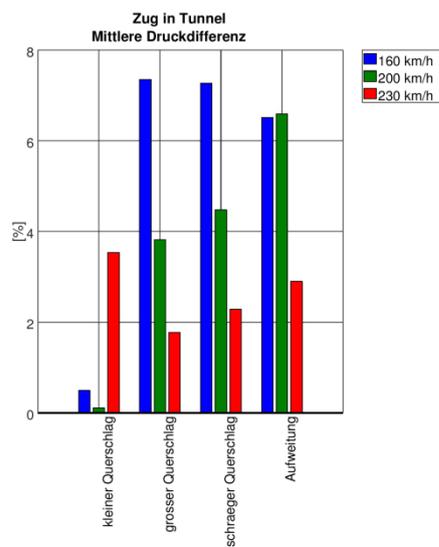


(d)

Abbildung 108: CFD-Simulation, 38 m<sup>2</sup> Tunnel, Railjet-Modell: Vergleich des Extremwerts von (a) Maximaldruck, (b) Minimaldruck, (c) maximalen Druckdifferenz und (d) mittleren Druckdifferenz im Tunnel während der Zugsdurchfahrt.



(a)



(b)

Abbildung 109: CFD-Simulation, 38 m<sup>2</sup> Tunnel, Railjet-Modell: Unterschied der maximalen (a) und mittleren (b) Druckdifferenz bezogen auf den Tunnel ohne Querschlag während der Zugsdurchfahrt.

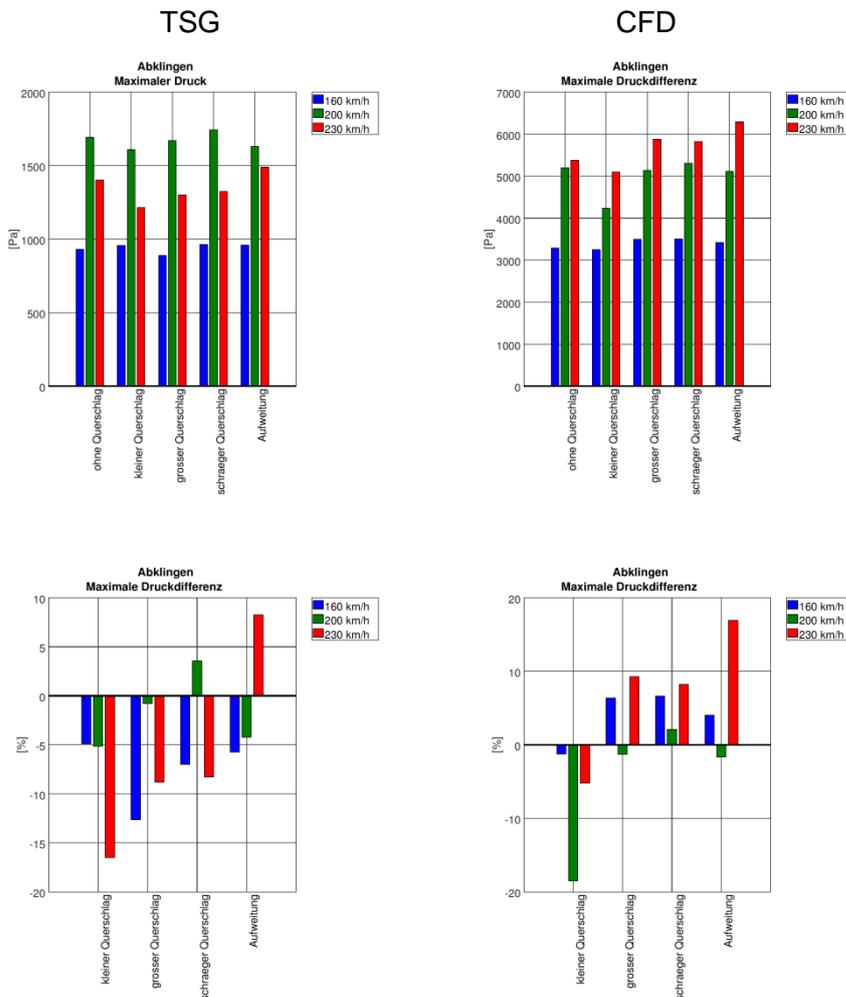


Abbildung 110: Maximale Druckunterschiede in Messung (links) und CFD-Simulation (rechts) nach der Ausfahrt des Railjets aus dem 38m<sup>2</sup>-Tunnel

### 6.1.4 Zusammenfassung und Bewertung

Die Ergebnisse der Messungen an der TSG und der CFD-Simulationen stimmen in wichtigen Punkten gut überein. Insbesondere die Einfahrwelle des Zuges, sowie die Druckänderung bei Vorbeifahrt des Zuges an der Betrachtungsposition weisen die gleichen Werte und damit eine sehr gute Übereinstimmung auf. Lediglich während der Passage des Zuges an der Betrachtungsposition ist ein Unterschied zu verzeichnen, da hier bereits die Einfahrwelle, welche am Tunnelende reflektiert und dabei in eine Expansionswelle umgeformt wurde, wieder die Betrachtungsposition erreicht und dort zu einer konstruktiven Überlagerung mit dem Unterdruckgebiet neben dem Zug führt. Die Abweichung in den absoluten Werten ist damit wieder auf das Abklingverhalten der im Tunnel oszillierenden Wellen zurückzuführen,

das von vielen, bereits ausführlich beschriebenen Faktoren abhängt und in Simulation und Messung verschieden ist. Dies beeinflusst aber nicht die qualitative Aussage der Ergebnisse. Die höchsten Drücke und damit auch die höchsten Lasten treten aber zu der Zeit auf, die der Zug im Tunnel verbringt. Dies ist somit die Hauptbetrachtungszeit dieser Studie.

Wie zu erwarten war, ist der Druck im Tunnel primär von der Fahrgeschwindigkeit des Zugs und der Tunnelquerschnittsfläche abhängig. Bei der höchsten Geschwindigkeit 230 km/h wurden bei allen Konfigurationen auch die höchsten Druckwerte ermittelt. Aufgrund von konstruktiver Überlagerung, insbesondere der Heckausfahrwelle, mit im Tunnel laufenden Wellen können aber auch bei niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten unproportional hohe Drücke auftreten. Generell führt eine Vergrößerung der Querschnittsfläche des Tunnels zu einer signifikanten Reduktion des Drucks im Tunnel bei Durchfahrt des Zuges als auch beim Abklingen der Druckwellen.

Die Untersuchung der verschiedenen Querschlagskonfigurationen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der grundsätzlichen Charakteristik der Druckverläufe zwischen Messung und Simulation. Es ist festzustellen, dass die lokale Querschnittsveränderung zu keiner signifikanten Druckreduktion bei Zugs vorbeifahrt führt. Der kleine Querschlag, der dem geplanten Anschluss des Querschlag entspricht, hat den geringsten negativen Effekt aller lokalen Erweiterungen.

Eine lokale Erhöhung der Wandrauigkeit in der Nähe der Tunnelportale verbessert primär das Abklingverhalten, führt aber während der Zugsdurchfahrt zu keiner Reduktion des Druckniveaus.

## 6.2 Detailbetrachtung „Tunnel Notausgangstür“

### 6.2.1 Lebensdauer Berechnung

Die Lebensdauerberechnung wird beispielhaft am Detail der Verriegelung der Tunnelnotausgangstür durchgeführt. Alle folgenden Aussagen und Ableitungen beziehen sich auf das folgend gewählte Beispiel, und können nicht 1:1 auf andere Konfigurationen umgelegt werden.

Für die Lebensdauerbetrachtung wird die Auswirkung der Veränderung des Tunnelquerschnittes bei 38 m<sup>2</sup>, 44 m<sup>2</sup>, 55 m<sup>2</sup> und 66m<sup>2</sup> basierend auf das gemeinsam festgelegte Lastkollektiv durchgeführt:

- o Fall 1: 100 Züge pro Tag und Richtung (90 Railjet/ 10 ICE3) max. V= 230 km/h,
- o Fall 2: 50 Züge pro Tag (45 Railjet/ 5 ICE3) max. V= 230 km/h

Fall 2 stellt eine Halbierung der Lastzyklen von Fall 1 dar. Hiermit ergibt sich dafür eine verdoppelte Lebensdauer. Da die restlichen Auswertungen (Aussagen über relative Lebensdauern) zwischen den beiden Fällen somit ident sind, wird in weiterer Folge nur Fall 1 erläutert.

Wie die 1D CFD Analysen zeigten, hat die Reibung einen wesentlichen Einfluss auf die Abklingkurven. Solange keine singuläre Effekte wie Aufsteilen von Wellenfronten nicht auftreten, soll der kurze Tunnel ungünstigere Ergebnisse liefern weil hier Reibungseffekte geringer sind und somit mehr Reflexionen stattfinden welche sich somit negativ auf Lastwechselzahlen und Ermüdung auswirken.

Für die Lebensdauerrechnung wurden wie mit den ÖBB Vertretern abgestimmt die Versuchsergebnisse aus den TSG Versuchen herangezogen. Mithilfe der numerischen CFD-Berechnungen wurden die Kurven auf die jeweiligen Werte der unterschiedlichen Konfigurationen skaliert um auch andere Fälle abzudecken. Unterschiede im Abklingverhalten zwischen Versuch und CFD-Rechnung sind im Kapitel AP2 dargestellt worden, es wird hier nochmals darauf hingewiesen das die für die Lebensdauerbewertung herangezogenen Versuchskurven in diesem Fall geringere Drücke (aufgrund von Dämpfungseffekte im Abklingverhalten) aufweisen, als die CFD-Rechnung unter ideal starren Bedingungen. Auch ist das jeweilige Reflexionsverhalten immer von der Tunnellänge, Zuglänge, Reibung sowie Geschwindigkeit abhängig womit die Ergebnisse nicht direkt auf

andere Konfigurationen umgelegt werden können. Der Fokus soll hier in erster Linie auch auf den Vergleich der unterschiedlichen Maßnahmen gelegt werden.

Da die Tunneltüre generisch angenommen wurde, sind auch keine genauen Details der Befestigung bekannt. Es können keine absoluten Aussagen getroffen sondern nur Vergleiche durchgeführt werden. Dazu wurde ein Referenzspannung wie folgt festgelegt: bei einer Railjetdurchfahrt mit 230 km/h durch den 44 m<sup>2</sup> Tunnel wird der Peak-To-Peak Wert an der Position von 3 m im Tunnel dem maßgebenden Kerbfall inkl. berücksichtigtem Teilsicherheitsbeiwert zugeordnet und entspricht  $\sigma_{ref} = 100\%$ . Gemäß EN 1993-1-9 wurde der Kerbfall 100 für die Schubspannung als maßgeblich identifiziert. Unter Annahme einer hohen Schadensfolge und Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung ergibt sich mit dem Materialsicherheitsfaktor  $\gamma_{MF} = 1,35$  somit eine Referenzspannung von  $\sigma_{REF} = 100/1,35 = 74$  N/mm<sup>2</sup>. Mit einem Peak-To-Peak Wert von  $PTP_{44} = 50,777 \times 10^{-3}$  bar ergibt sich somit ein Umrechnungsfaktor von  $\sigma_{ref}/PTP_{44} = 1458,8$ . Dieser Umrechnungsfaktor wird auf alle Versuchsergebnisse angewandt, wodurch die Relation zwischen den Ergebnissen erhalten bleibt. Das angenommene Referenzereignis repräsentiert hier die Referenzspannung mit 100%. Die Referenzspannung wurde von 50 bis 200 % variiert, was unterschiedliche Auslastungsszenarien darstellt und die jeweiligen Lebensdauern berechnet. Damit können zwar keine absoluten Werte abgeleitet werden jedoch der Einfluss über verschiedene Spannungsauslastungen unter unterschiedlichen Tunnelkonfigurationen dargestellt werden. Um jeweils ein vergleichbares Ereignis heranzuziehen, wurde eine RJ Durchfahrt bei 230 km/h und eine ICE3 Durchfahrt bei 200 km/h von den TSG- Versuchen genommen und basierend auf den CFD-Berechnungen ein Skalierungsfaktor welcher über die Peak-To-Peak Werte für unterschiedliche Tunneldurchmesser abgeleitet wurde beaufschlagt. Damit konnten die Abklingkurven der TSG Versuche entsprechend skaliert werden. Gleiche Skalierungen wurden für Tunnelkonfigurationen durchgeführt, welche nicht in der TSG untersucht wurden, jedoch mittels CFD- berechnet wurden. Die Skalierungsfaktoren wurden aus der CFD-Rechnung ermittelt.

Der im AP 3 für die Frequenzen ermittelte dynamische Vergrößerungsfaktor von  $\phi_{dyn}=1,1$  wurde ebenfalls berücksichtigt.

Die Auswertung fand einerseits bei einer Position von 3m im skalierten Tunnel statt welches der Position der Notausgangstüre entspricht und andererseits bei einer Position von 5m im skalierten Tunnel welches einer Position entspricht in welcher die Reflexionen bei

$V=230$  km/h im TSG Tunnel einen maßgebenden erhöhenden Einfluss auf das Druckereignis haben (vergleiche dazu Abbildung 104,c).

Für die Betrachtung der Lebensdauer wird das Belastungskollektiv der einzelnen skalierten Druckereignisse mittels Rainflow-Analyse ermittelt und anschließend die Schädigungssumme mittels linearer Schadensakkumulation nach der Hypothese von Palmgren-Miner unter Berücksichtigung des identifizierten Kerbfalls ermittelt.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

Anschließend wird für jede Tunnelkonfiguration die tägliche Schädigungssumme  $D_{Daily}$  basierend auf dem angenommenen Lastkollektiv (100 Züge/Tag ermittelt).

$$D_{Daily} = D_{RJ} * 90 + D_{ICE} * 10$$

Unter der Annahme, dass Versagen eintritt sobald die Schädigungssumme einen kritischen Wert von  $D_{cr}=1$  wird, lässt sich somit für jede betrachtete Tunnelkonfiguration und für unterschiedliche Skalierungen bezogen auf die Referenzspannung eine Abschätzung der Lebensdauer LD des Details vornehmen.

$$LD = \frac{1}{D_{Daily} * 365,25} [Jahre]$$

Wie vorhergehend bereits beschrieben zeigte sich bei den unterschiedlichen Querschlagskonfigurationen kein wesentlicher Unterschied in den Druckereignissen. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 111 die aufgezeichneten und skalierten Ereignisse an der Position von 3m bei Railjetdurchfahrt mit 230 km/h für die unterschiedlichen Querschlagskonfigurationen.

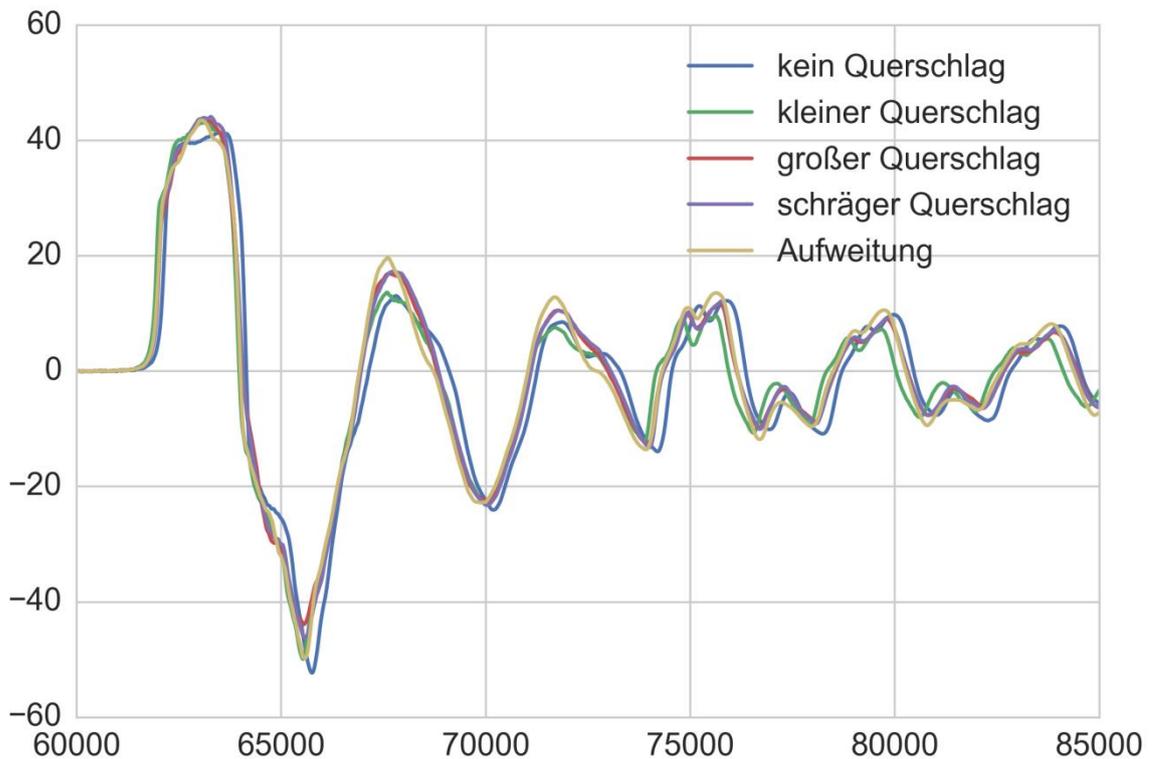


Abbildung 111: Vergleich der Druckereignisse im 38m<sup>2</sup> Tunnel bei einer RJ Vorbeifahrt mit 230 km/h mit unterschiedlichen Querschlagskonfigurationen. Ereignisse skaliert auf die Referenzspannung.

Berechnet man die Anzahl der erreichbaren Railjetpassagen basierend auf den Spannungsverläufen in Abbildung 111 so ergeben sich daraus nur geringfügige Abweichungen, wie in Abbildung 112 dargestellt. Deshalb wurde hier im weiteren Verlauf der Untersuchung auf eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Querschlagskonfigurationen verzichtet.

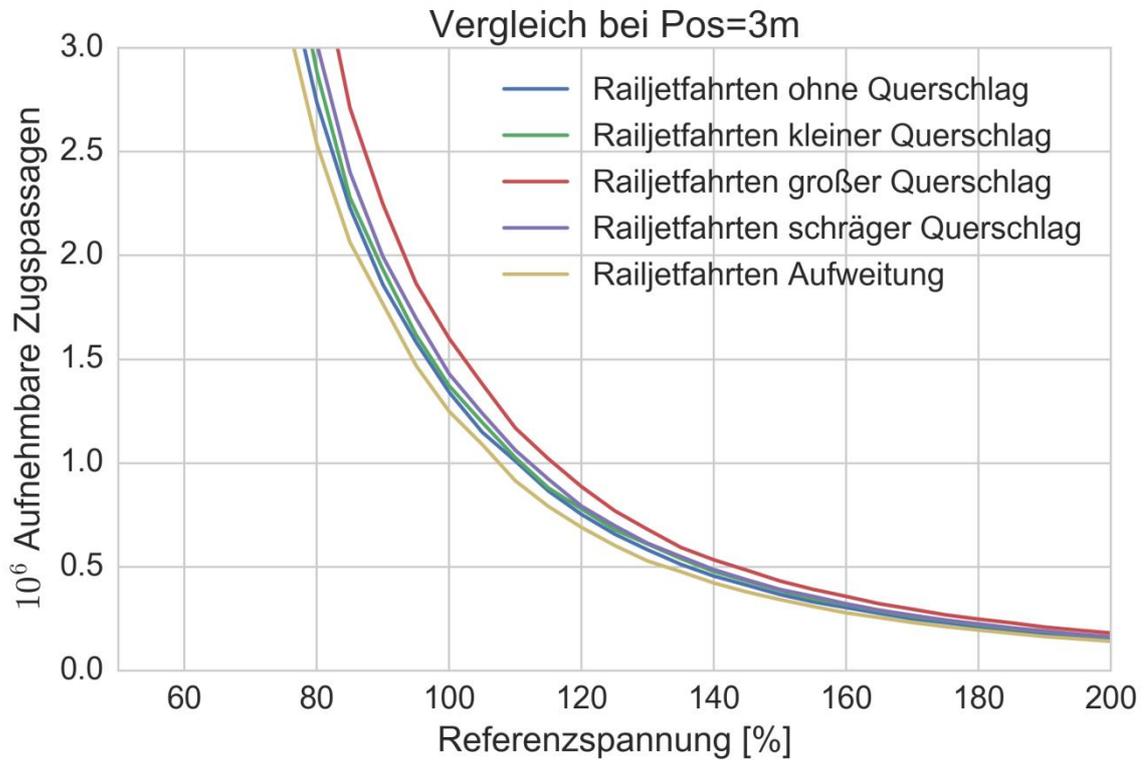


Abbildung 112: Vergleich der aufnehmbaren RJ Ereignisse im 38m<sup>2</sup> Tunnel bei Vorbeifahrt mit 230 km/h. Vergleich unterschiedlicher Querschlagskonfigurationen

Vergleicht man die prognostizierte Lebensdauer an den Positionen 3m (Notausgangstür) und 5m (ungünstige Reflexionen) so zeigen sich maßgebliche Unterschiede, wie in Abbildung 113 dargestellt. Dies zeigt anschaulich, dass bei einer ungünstigen Position im Tunnel sich die Lebensdauer durch ungünstig wirkende Reflexionen maßgeblich verringern kann. Im gegenständlichen Fall beträgt diese Verringerung für die betrachteten Konfigurationen ca. 30%, wie es auch in Abbildung 114 dargestellt wird, wobei hier die Maximaldrücke erheblich weniger abweichen.

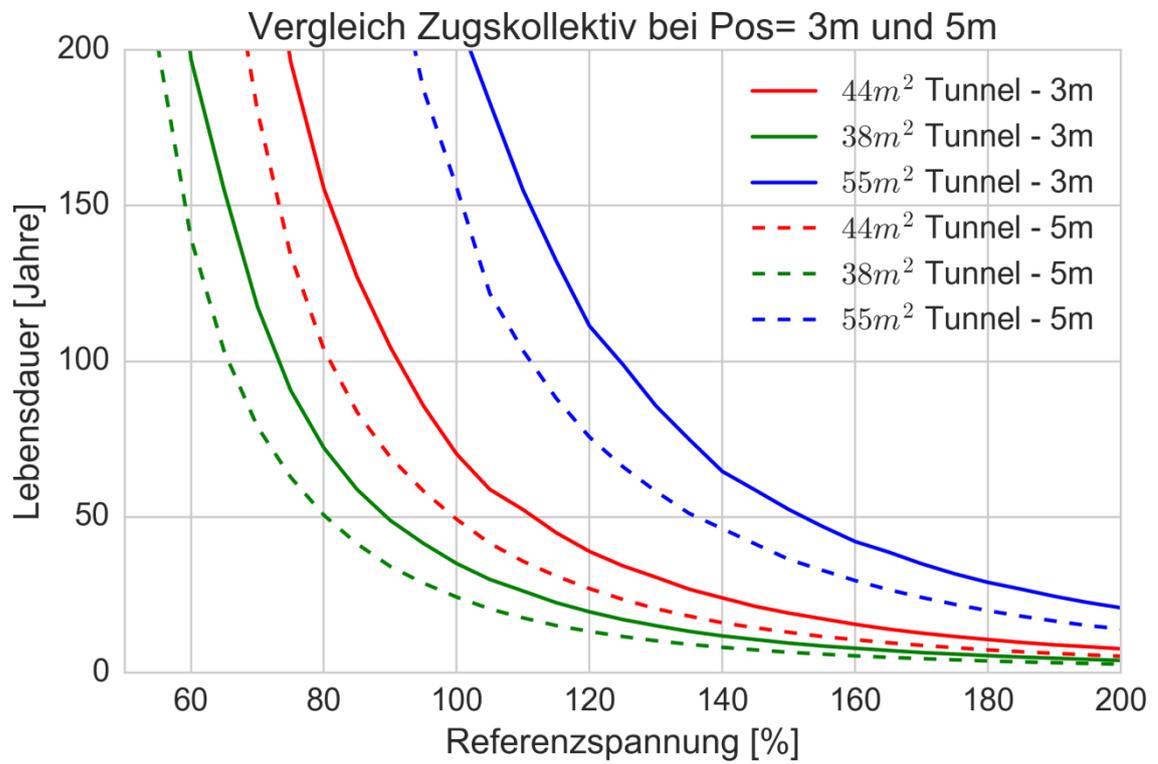


Abbildung 113: Vergleich der prognostizierten Lebensdauer für das Zugskollektiv für die Positionen 3m (Notausgangstür) und 5m (ungünstige Reflexionen)

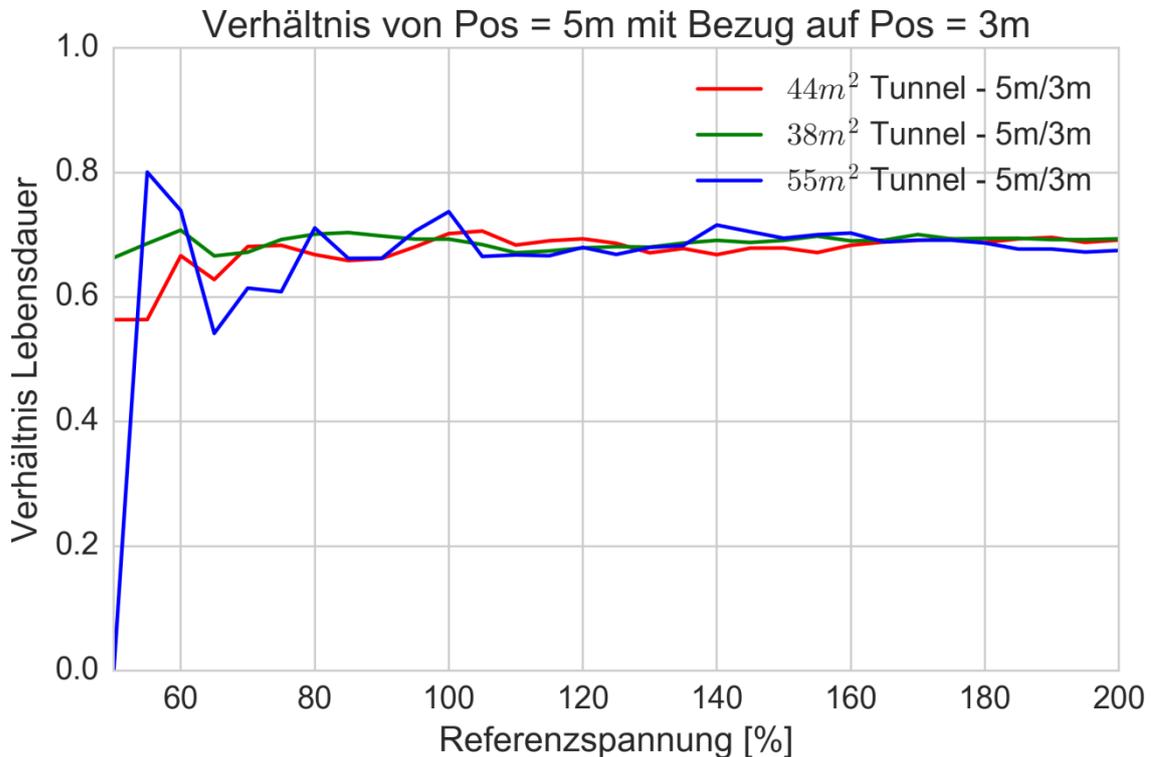


Abbildung 114: Vergleich der prognostizierten Lebensdauer für das Zugkollektiv für die Positionen 3m (Notausgangstür) und 5m (ungünstige Reflexionen). Verhältnis der Lebensdauern bezogen auf die Position von 3m.

Betrachtet man die Ergebnisse der TSG in welchem Reflexionen und Abklingkurven berücksichtigt werden mit Ergebnissen aus der CFD Berechnung, in welcher die Reflexionen für den hypothetischen Fall des unendlich langen Tunnels vollkommen unterdrückt werden (vergleiche Abbildung 61) so zeigt sich auch hier, dass die Reflexionen einen maßgeblichen Einfluss auf die prognostizierte Lebensdauer des Tunnels haben können. Dies zeigt ein erhebliches Optimierungspotential für Maßnahmen, welche die Tunnelreflexionen unterdrücken. Setzt man die Werte in Abbildung 115 ins Verhältnis, so zeigt sich, dass sich unter den Annahmen der durchgeführten Untersuchungen hier ein Verbesserungspotential um den Faktor 2 ergibt, wie in Abbildung 116 dargestellt. In weiterführenden Untersuchungen sollte jedenfalls das Abklingverhalten von realen Tunnel weiter untersucht werden, da es einen Einfluss auf die Lebensdauerbewertung hat.

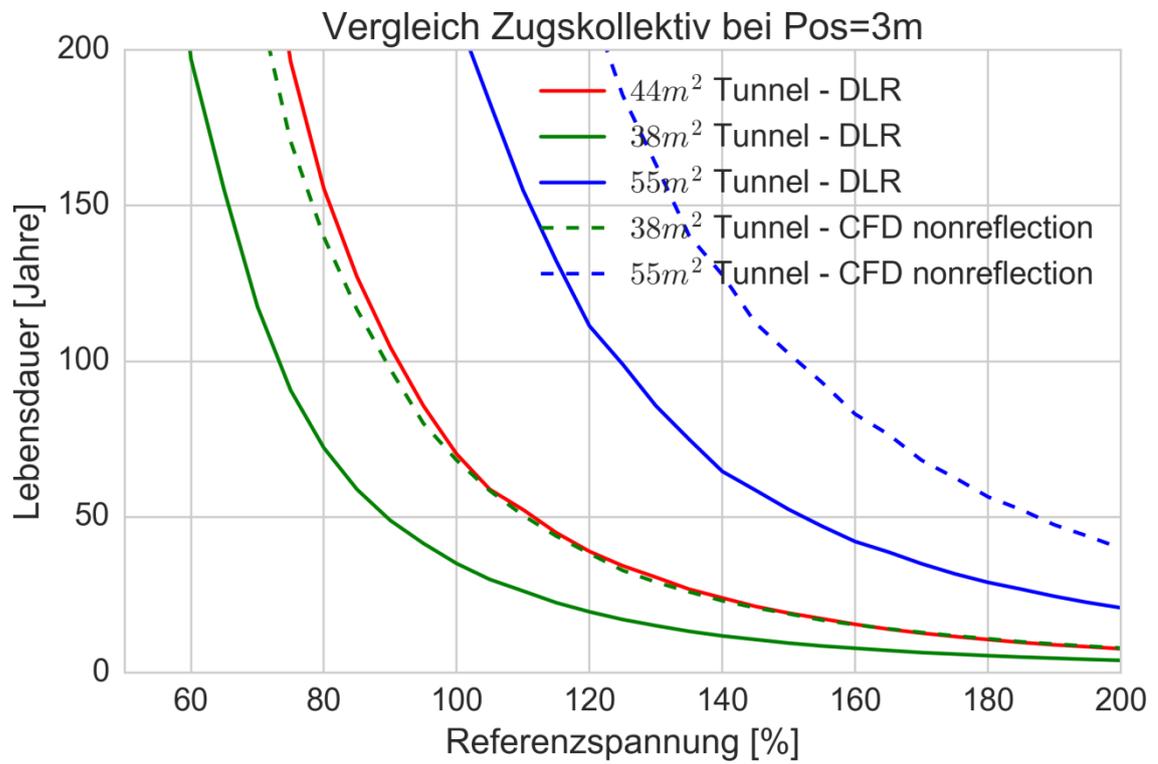


Abbildung 115: Vergleich Versuchsergebnisse mit Reflexionen mit CFD Ergebnissen ohne Reflexion für den Tunnel bei Pos=3m

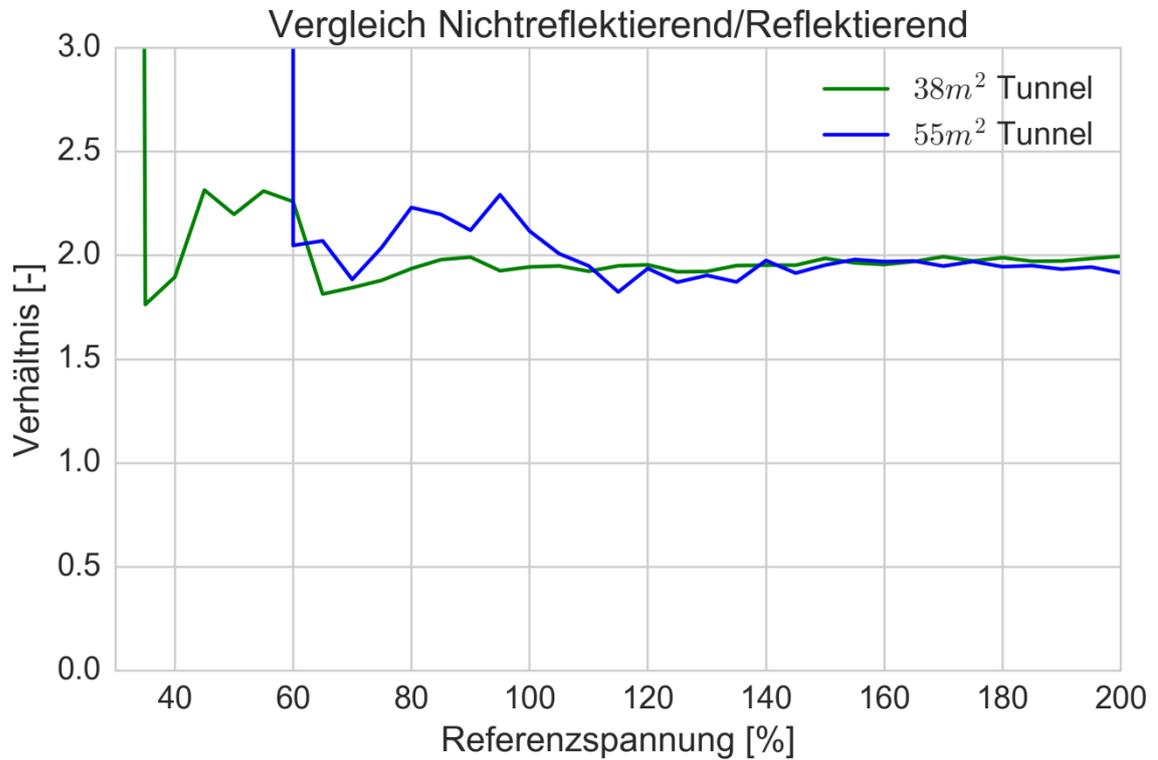


Abbildung 116: Verhältnis der Versuchsergebnisse mit und hypothetisch ohne Reflexionen für den Tunnel bei Pos=3m

Das größte Verbesserungspotential zeigt sich bei der Lebensdaueranalyse jedoch erwartungsgemäß bei Betrachtung des Tunneldurchmessers. In Abbildung 117 werden die prognostizierten Lebensdauern für Tunneldurchmesser von 38, 44, 55 und 62 m<sup>2</sup> gegenübergestellt. Für eine Referenzspannung von 100% wird die Abhängigkeit des Tunneldurchmessers in Abbildung 118 dargestellt. Hier zeigt sich ein stark nichtlinearer Anstieg mit steigendem Durchmesser.

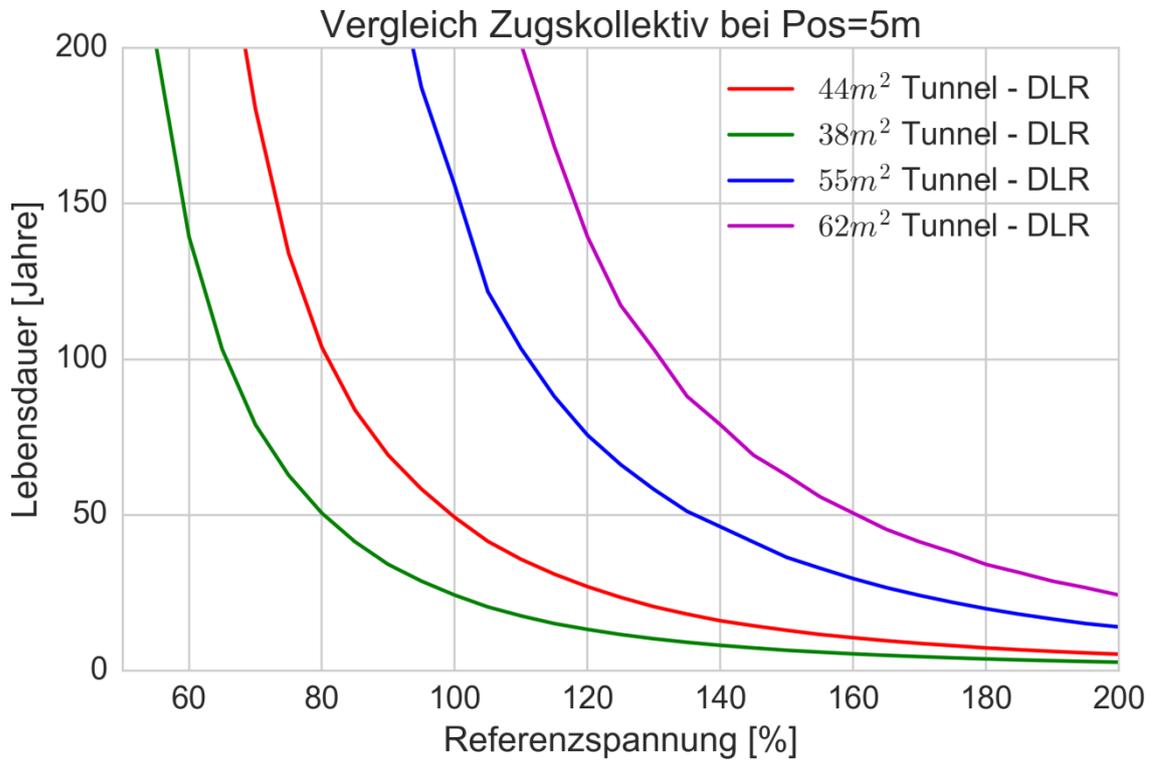


Abbildung 117: Vergleich der prognostizierten Lebensdauer bei unterschiedlichen Tunneldurchmessern bei Pos=5m

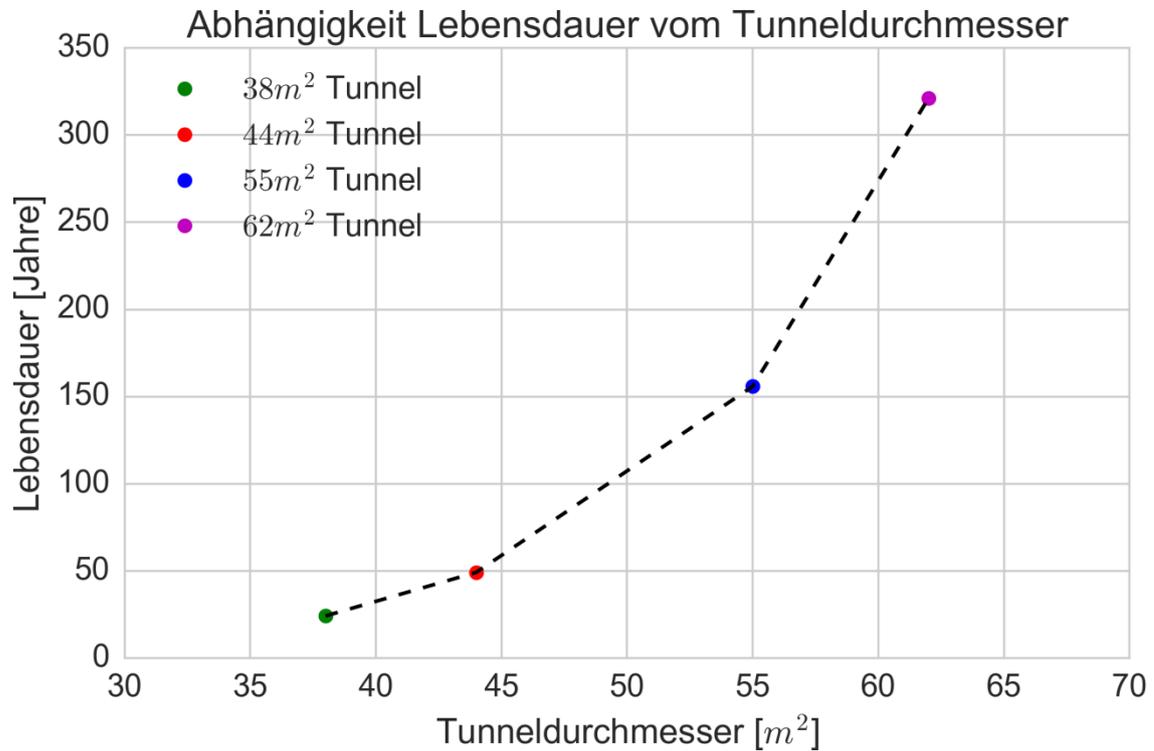


Abbildung 118: Abhängigkeit der prognostizierten Lebensdauer vom Tunneldurchmesser bei Pos=5m und 100% Referenzspannung

Setzt man die Werte von Abbildung 117 ins Verhältnis mit den Werten vom 38m<sup>2</sup> Tunnel so zeigt sich, dass die Verhältnisse sich mit höherer Auslastung festigen. Dies liegt in der Natur der zugrunde liegenden Wöhlerlinie begründet sobald alle berücksichtigten Lastzyklen im selben Steigungsbereich der stückweis linearen Wöhlerlinie im doppelt-logarithmischen Diagramm liegen.

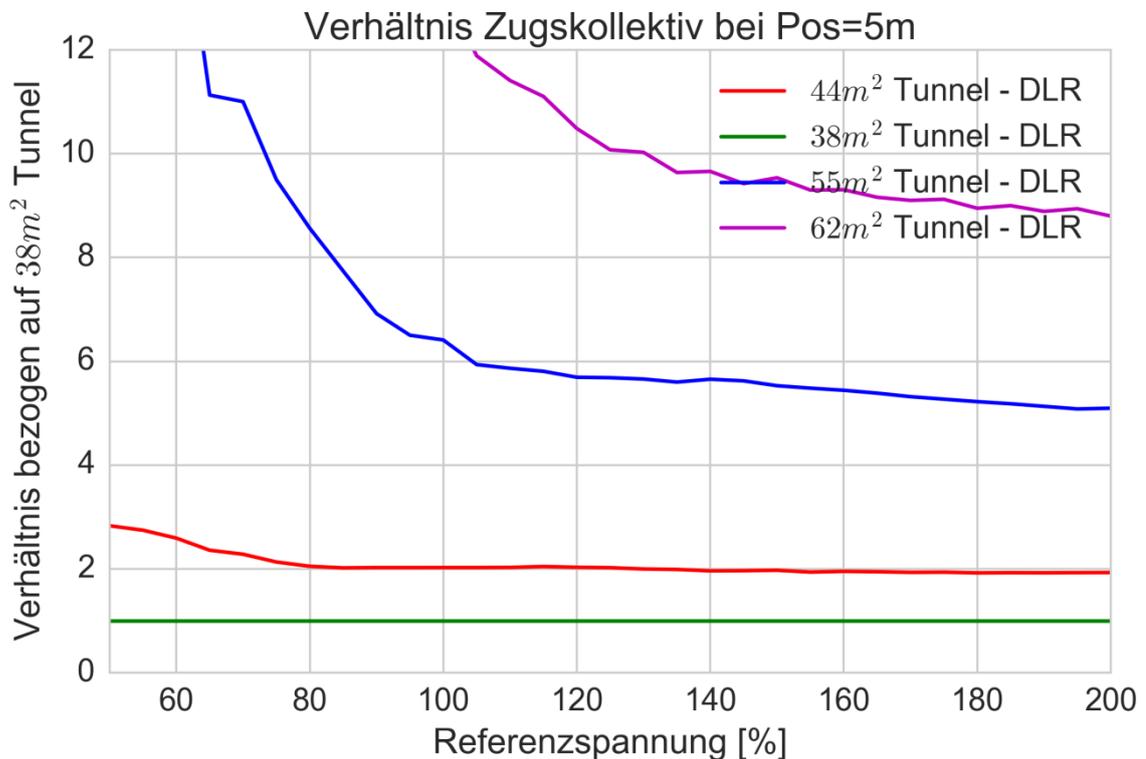


Abbildung 119: Verhältnis der prognostizierten Lebensdauern für unterschiedliche Tunneldurchmesser an Pos=5m, bezogen auf einen Tunneldurchmesser von 38m<sup>2</sup>

Am gewählten Beispiel ist ersichtlich, dass es hier bei einer Vergrößerung von 38m<sup>2</sup> auf 44m<sup>2</sup> Tunnel mindestens zu einer Verdopplung der Lebensdauer nahezu über den gesamten betrachteten Referenzspannungsbereich kommt. Beim 55m<sup>2</sup> Tunnel zeigt sich eine Verbesserung der Lebensdauer im Referenzspannungsbereich von 100-200% um einen Faktor 5-6 unter 100% sogar noch mehr, beim 62 m<sup>2</sup> Tunnel liegen alle Verhältniswerte über einem Verhältniswert von 9 bzw. bei einem Spannungsbereich zwischen 100-125% bei über 10.

## 6.2.2 Exemplarische Kostenabschätzung der baulichen Maßnahmen

Im Rahmen des Projekts wurden anhand 2'er Beispieeltunnel exemplarisch die baulichen Kosten geschätzt, und den Abschreibungskosten einer angenommenen Tunneltür unter Einbezug der theoretisch ermittelten Lebensdauer  $t_{L\text{tür}}$  der Notausgangstüre gegenübergestellt werden.

Folgende 2 Tunnel werden betrachtet:

- **Tunnel 1 zyklischer Vortrieb** mittels neuer österreichischer Tunnelbaumethode NÖT: „mittlere“ in Österreich vorkommende Gebirgsqualität (Abschlagslänge des Vortriebs ca. 1,7m)
- **Tunnel 2 kontinuierlicher Vortrieb** mit einer Tunnelbohrmaschine TBM (Gebirge Basis des Semmeringbasistunnels)

Die Kostenschätzung der Tunnelbaukosten wurde auf Basis durchgeführter Tunnelobjekte durch das Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GesmbH ermittelt und umgelegte Laufmeterkosten errechnet. Die Kosten unterschiedlicher Querschnittsgrößen (38m<sup>2</sup>/ 44m<sup>2</sup>/ 55m<sup>2</sup> und 62m<sup>2</sup>) wurden mit dem in der Praxis gebräuchlichen Tunnelkostenrechner ermittelt. Die geschätzten Kosten sind nicht als eine Ober- und Untergrenze zu betrachten sondern eher als beispielhafte Kosten zu sehen. Die zu vergleichenden Kostenannahmen von Tunnel und Tür setzen sich wie folgt zusammensetzen:

### a) Tunnelbaukosten inkl. Auswirkung Querschnittsänderung:

Die Kosten wurden geschätzt, wobei hier der Schwerpunkt auf die baulichen Maßnahmen gelegt wurde. Dies sind jene Kosten die sich für die unterschiedliche Tunnelquerschnitte maßgebend ändern würden. Ausbaukosten sind davon grundsätzlich nicht betroffen und sind deshalb nicht inkludiert. Aus Vergleichszwecken beinhalten diese folgenden Annahmen:

- Der maschinelle/kontinuierliche Vortrieb basiert auf realen Kosten des Semmeringbasistunnels (Baulos Semmering Basistunnel SBT BL 2.1), und die unterschiedlichen Tunnelquerschnitte wurden mittels Tunnelkostenrechners ermittelt.
- Es sind nur reine Baukosten + baulicher Innenausbau (Innenschale), keine Berücksichtigung der Kosten des betrieblichen Ausbaus (Gleis, Installationen...)
- Die Kosten beziehen sich nur auf die Herstellung der Tunnelhauptrohren ohne Querschläge od. Zugangsschächte etc.

- Lebensdauer Tunnel lt. Abstimmung mit ÖBB – Vertreter: 120 Jahre
- Preisbasis 2016

In der nachfolgenden Tabelle 14 und Tabelle 15 sind die Zusammensetzung und Ermittlung der geschätzten Kosten und Grundlagen der Schätzung der beiden Referenztunnel angeführt und die Laufmeter Kosten der Baukosten ermittelt:

Tabelle 14: Umgelegte Laufmeterkosten Referenztunnel 1 zyklischer Vortrieb

<b>Referenztunnel Zyklischer Vortrieb - Basis Tunnelkostenrechner intern</b> (70% Offene Sohle, 30% Sohlgewölbe)					
Querschnitt Fahrraum	[m <sup>2</sup> ]	<b>38,00</b>	<b>44,00</b>	<b>55,00</b>	<b>62,00</b>
Tunnellänge	[m]	10.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00
Kosten Ausbruch	[€]	€ 47.700.000,00	€ 54.100.000,00	€ 63.800.000,00	€ 68.300.000,00
Kosten Innenausbau	[€]	€ 51.016.000,00	€ 54.600.000,00	€ 60.100.000,00	€ 63.100.000,00
Kosten Gesamt	[€]	€ 98.716.000,00	€ 108.700.000,00	€ 123.900.000,00	€ 131.400.000,00
Laufmeterkosten	[€/m]	€ 9.871,60	€ 10.870,00	€ 12.390,00	€ 13.140,00
Preisbasis (lt. Tunnelkostenechner)	[Jahr]	2010	2010	2010	2010
Valorisierung Preisbasis 2010	[-]	1,1	1,1	1,1	1,1
<b>Laufmeterkosten, Preisbasis 2016</b>	[€/m]	<b>€ 10.900,00</b>	<b>€ 12.000,00</b>	<b>€ 13.700,00</b>	<b>€ 14.500,00</b>
<b>Faktor Kostenänderung</b>	[-]	<b>1,00</b>	<b>1,10</b>	<b>1,26</b>	<b>1,33</b>

Der Referenztunnel 2 beinhaltet die Kosten des kontinuierlichen oder maschinellen Vortriebs und ist in nachfolgender Tabelle für unterschiedliche Querschnitte dargestellt.

Tabelle 15: Ermittlung Laufmeterkosten Referenztunnel 2 maschineller Vortrieb.

<b>Referenztunnel Kontinuierlicher Vortrieb - Basis Semmeringsbasistunnel BL2.1 + Tunnelkostenrechner intern</b>						
Querschnitt Fahrraum	[m <sup>2</sup> ]	<b>38,00</b>	<b>44,00</b>	<b>45,36</b>	<b>55,00</b>	<b>62,00</b>
Tunnellänge	[m]	16.429,00	16.429,00	16.429,00	16.429,00	46.429,00
Kosten Gesamt	[€]	€ 204.000.000,00	€ 227.000.000,00	€ 230.000.000,00	€ 258.000.000,00	€ 274.000.000,00
Laufmeterkosten	[€/m]	€ 12.417,07	€ 13.817,03	€ 13.999,63	€ 15.703,94	€ 16.677,83
Preisbasis	[Jahr]	lt. Angebot BL 2.1 = 2013				
Valorisierung Preisbasis BL2.1	[-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
<b>Laufmeterkosten, Preisbasis 2016</b>	[€/m]	<b>€ 13.200,00</b>	<b>€ 14.700,00</b>	<b>€ 14.900,00</b>	<b>€ 16.700,00</b>	<b>€ 17.700,00</b>
<b>Faktor Kostenänderung</b>	[-]	<b>1,00</b>	<b>1,11</b>	<b>1,13</b>	<b>1,27</b>	<b>1,34</b>

Bezogen auf die Lebensdauer des Tunnels von  $t_{\text{Tunnel}} = 120$  a ergeben sich unter Ansatz einer statisch linearen Abschreibung folgende in Tabelle 16 jährliche Abschreibungskosten der Tunnelkosten:

Tabelle 16: Jährliche Abschreibungskosten der beiden Referenztunnel.

<b>Beispiel 1: zyklischer Tunnel 10km</b>			
	Baukosten	Abschreibung Tunnel	Abweichung
Querschnitt	[€/lfm]	[€/lfm/a]	[%]
38m <sup>2</sup>	10900	90,8	0%
44m <sup>2</sup>	12000	100,0	<b>10%</b>
55m <sup>2</sup>	13700	114,2	<b>26%</b>
62m <sup>2</sup>	14500	120,8	<b>33%</b>
<b>Beispiel 2: maschineller Tunnel 8 km Preisbasis Semmeringtunnel</b>			
	Baukosten	Abschreibung Tunnel	Abweichung
Querschnitt	[€/lfm]	[€/lfm/a]	[%]
38m <sup>2</sup>	13200	110,0	0%
44m <sup>2</sup>	14700	122,5	<b>11%</b>
55m <sup>2</sup>	16700	139,2	<b>27%</b>
62m <sup>2</sup>	17700	147,5	<b>34%</b>

Absolut gesehen sind die maschinellen Kosten höher als die zyklischen Vortriebskosten, doch relativ gesehen sind die Zuwächse der Querschnittsvergrößerung für beide Referenztunnel als nahezu gleich zu betrachten, sind aber nicht auf andere Tunnel umzulegen.

b) Kosten „generische Tunneltür“

Die Kosten der generischen Tunneltür wurden nach gemeinsamen Abstimmungen mit ÖBB Vertretern auf € 70.000 pro Tür festgelegt. Kosten für den Ein- und Ausbau der Tür wurden in dem Beispiel mit 20% des Türpreises angenommen womit sich ein Gesamtpreis von € 84.000 pro Notausgangstür ergibt. Betrachtet wird die theoretische Lebensdauer  $t_{\text{Tür}}$  bzw. die Alterung des Verriegelungsdetails, basierend auf der oben angenommenen Schädigungsrechnung. Sonstige Alterungen und Abnützungen werden nicht berücksichtigt. Im Berechnungsbeispiel wird mit einem Türabstand von 333,3 m gerechnet, womit sich

beispielhaft die auf einen Laufmeter umgelegte jährliche Abschreibungskosten der Tunneltür in Abhängigkeit der theoretischen Lebensdauer bei einem Türabstand  $l_{a\text{ Tür}}$  von 333,3 m wie folgt in Abbildung 120 errechnen lassen:

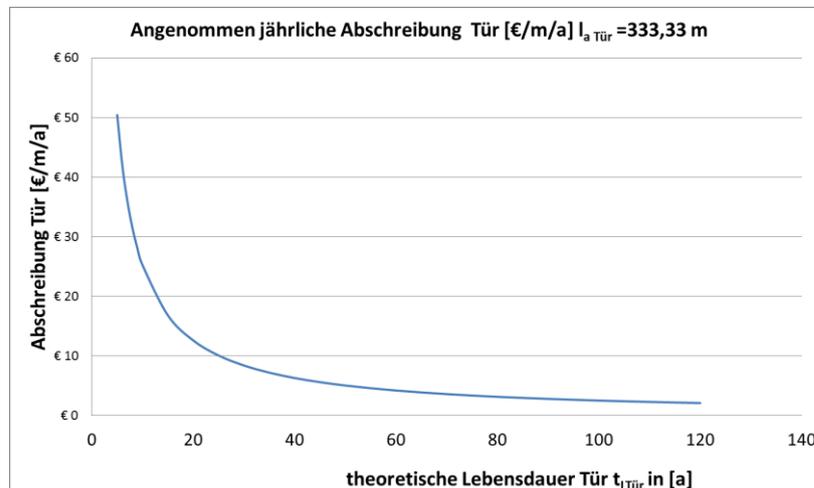


Abbildung 120: Beispielhafte jährliche Abschreibungskosten bei einem angenommenen Türabstand von 333 m in Abhängigkeit der theoretischen Lebensdauer  $t_{L\text{Tür}}$

Betriebliche Kosten betreffend der Unterbrechung sowie Abhängigkeiten der Türkosten in Bezug auf die Beanspruchung sowie Ausfallkosten durch den Ein- und Ausbau wurden hier nicht berücksichtigt.

### 6.2.3 Beispielhafte Vergleichsbewertung unterschiedlicher Lebensdauerszenarien:

Wie bereits erwähnt wird durch die Querschnittsvergrößerung die einwirkende Drucksignatur erheblich verkleinert was zu einer Verbesserung der Ausnutzungsdauer führt. In diesen Vergleichsbeispielen wird die Verbesserung in Bezug auf die Lebensdauer für unterschiedliche Referenzspannungen der Abbildung 119 bzw. Abbildung 118 angesetzt.

In Abhängigkeit von der Auslastung können verschiedene Szenarien berechnet werden. Beispielsweise für 100 % -150% Referenzspannung sind die Lebensdauer und die jährlichen Abschreibungskosten für angenommene Tür und Tunnel in Abbildung 120 dargestellt.

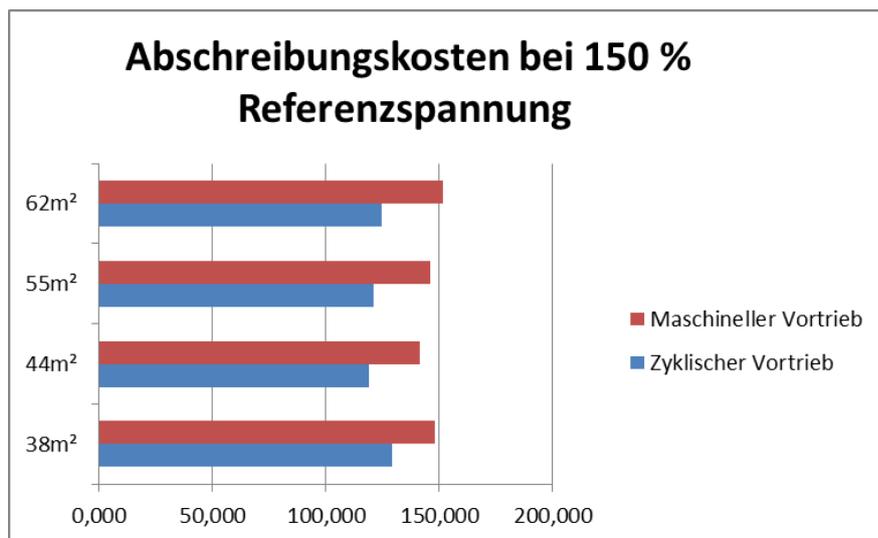
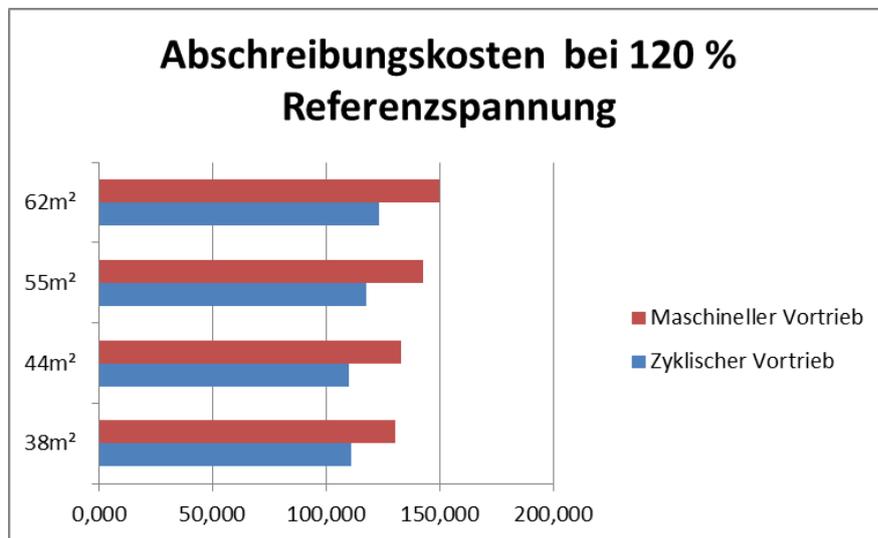
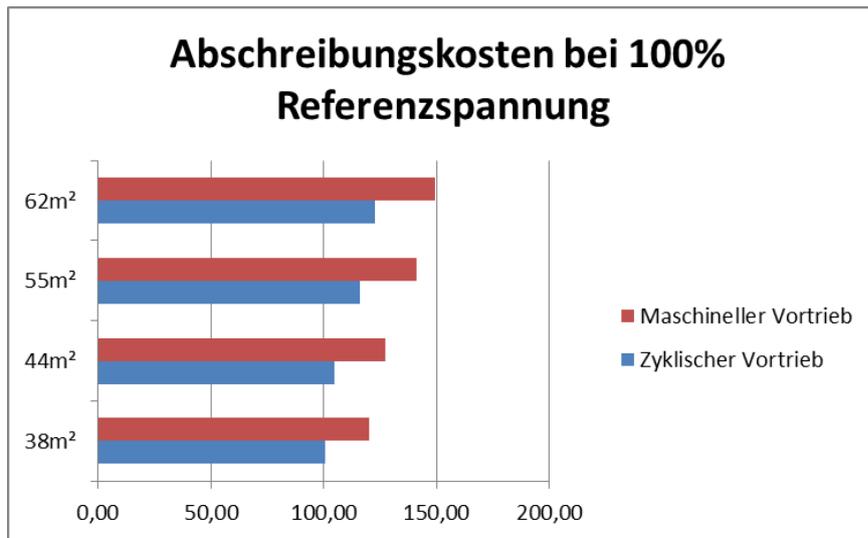


Abbildung 121: Beispielhafte jährliche Abschreibungskosten Tür+ Tunnel in €/m für unterschiedliche Referenzspannungen in Abhängigkeit des Tunneldurchmessers.

In diesem Beispiel sind aufgrund der höheren Baustelleneinrichtungskosten der Tunnelbohrmaschine die maschinellen Vortriebskosten höher. Der Vergleich der Abschreibungskosten hängt nun vor allem von der betrachteten Referenzspannung oder Grundaustlastung des Ausbauteils ab. Beispielsweise führen höhere Referenzspannungen zu niedrigeren theoretischen Lebensdauern der Notausgangstür, weshalb sich bei höheren Referenzspannungen die Querschnittsvergrößerungen günstiger auswirken als bei niedrigeren. Diese theoretischen Vergleiche beinhalten jedoch nicht Kostenbetrachtungen für Betrieb, Unterbrechungskosten, Traktion, Finanzierung... etc. und müssen im Detail bzw. Anwendungsfall jedenfalls genauer individuell betrachtet werden. Eine direkte Umlegung auf andere Fälle/ Ausbauteile ist nicht möglich.

Die Berechnungsbeispiele zeigen dass eine Vergrößerung der Querschnitte auch in Bezug auf die monetäre Bewertung von nur Tür und Tunnelvortriebsart durchaus Vorteile bringen können. Auch wenn hier nicht die gesamten Kosten (Energieeinsparung, Belastung am Fahrzeug, Auswirkungen auf Fahrgäste, funktionelle Abschreibung, Änderung Sicherheitsbestimmungen etc.) berücksichtigt werden konnten können daraus Tendenzen abgeleitet werden. Die Beispiele zeigen, dass die Grundaustlegung der Ausbauteile einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtabschreibungskosten hat. Konkrete Daten können hier nicht erhoben werden da nur eine generische Tür untersucht wurde. Bei robusten Auslegungen (niedrige Referenzspannungen) der Innenausbauteile bringt eine Querschnittsvergrößerung in Hinblick auf Abschreibungskosten von Tür und Tunnel deutlich weniger als bei weniger robusten Konstruktionen, was durch die Gegenüberstellung der verschiedenen Referenzspannungen deutlich wird.

Die in AP2 und AP4 untersuchten Querschlags Variationen zeigten keine Verbesserungen, die meisten Verbesserungen, vor allem in Bezug auf die Lebensdauer, sind auf die Variation der Querschnittsfläche zurückzuführen. Ebenso ein großes Verbesserungspotential, auch in Bezug auf bestehende Tunnel ist die Verminderung oder Abschwächung der Tunnelreflexionen an den Tunnelportalen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass beim 44m<sup>2</sup> und 55m<sup>2</sup> Tunnel ausgehend von der TSG Abklingkurve Tunnel im theoretischen Idealfall sogar eine Verdopplung der theoretischen Lebensdauer erfolgen könnte.

### 6.3 Empfohlene weiterführende Untersuchungen/ Forschungsarbeiten

Im Zuge von OPTUNAMIK wurden verschiedene Querschnitte und Querschlüge sowie Einlagen unterschiedlicher Rauigkeit untersucht. Basierend darauf können als weiterführende Forschungsarbeiten und Untersuchungen folgende Punkte angeführt werden:

- Untersuchungen und Versuche zur Minderung des Reflexionsverhaltens der Tunnelwelle an Bestandstunnel.
- Einfluss anderer Zugstypen oder Modelle wie z.B. Güterzug und Beladungen (Kamelhöcker) auf die aerodynamische Verbesserung/ Auswirkung.
- Vertiefende Untersuchung durch Messungen und Vergleich von Dämpfungsverhalten und Ausbreitungsgeschwindigkeit an realen Tunnel.
- Schallanalysen im Tunnelquerschnitt.
- Vertiefende Untersuchungen des Einfluss von Tunnellänge/ Fahrzeuglänge/ Geschwindigkeit auf Reflexionsverhalten, Abklingverhalten.
- Weitere Optimierungen am 1-D CFD-Solver.
- Untersuchungen am zweigleisigen Tunnel und Zugsbegegnungen.

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] A. E. Vardy, „Dundee Tunnel Research,“ [Online]. Available: <http://www.thermotun.com/>. [Zugriff am 19 10 2016].
- [2] A. Baron, M. Mossi und S. Sibilla, „The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels,“ *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Bd. 89, p. 365–401, 2001.
- [3] C. Biotto, A. Proverbio, O. Ajewole, N. P. Waterson and J. Peiró, “On the treatment of transient area variation in 1D discontinuous Galerkin simulations of train-induced pressure waves in tunnels,“ *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 71, no. 2, p. 151–174, 2013.
- [4] A. Rudolf, Simulation of compressible flow in tunnel systems induced by trains traveling at high speed, Lausanne: EPFL, 1996.
- [5] A. E. Vardy, „ThermoTun Online,“ [Online]. Available: <http://www.thermotun-online.com>. [Zugriff am 19 10 2016].
- [6] Wikipedia, „Moody chart,“ [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Moody\\_chart](https://en.wikipedia.org/wiki/Moody_chart). [Zugriff am 19 10 2016].
- [7] C. D. Cantwell, D. Moxey, A. Comerford, A. Bolis, G. Rocco, G. Mengaldo, D. De Grazia, S. Yakovlev, J.-E. Lombard, D. Ekelschot, B. Jordi, H. Xu, Y. Mohamied, C. Eskilsson, B. Nelson, P. Vos, C. Biotto, R. M. Kirby und S. J. Sherwin, „Nektar++: An open-source spectral/hp element framework,“ *Computer physics communications*, Bd. 192, pp. 205-219, 2015.

# Optimierung der Tunnelaerodynamik für Hochgeschwindigkeitsstrecken OPTUNAMIK

## ANHANG

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2014)

### AutorInnen:

**Dr. Stefan LACHINGER**

**Dr. Alois VORWAGNER**

**Mag. Helmut KÜHNELT**

**DR. Daniela HEINE**

### Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

### Auftragnehmer:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

## 8 ANHANG

### 8.1 CFD-Berechnung: Validierung der CFD mit TSG

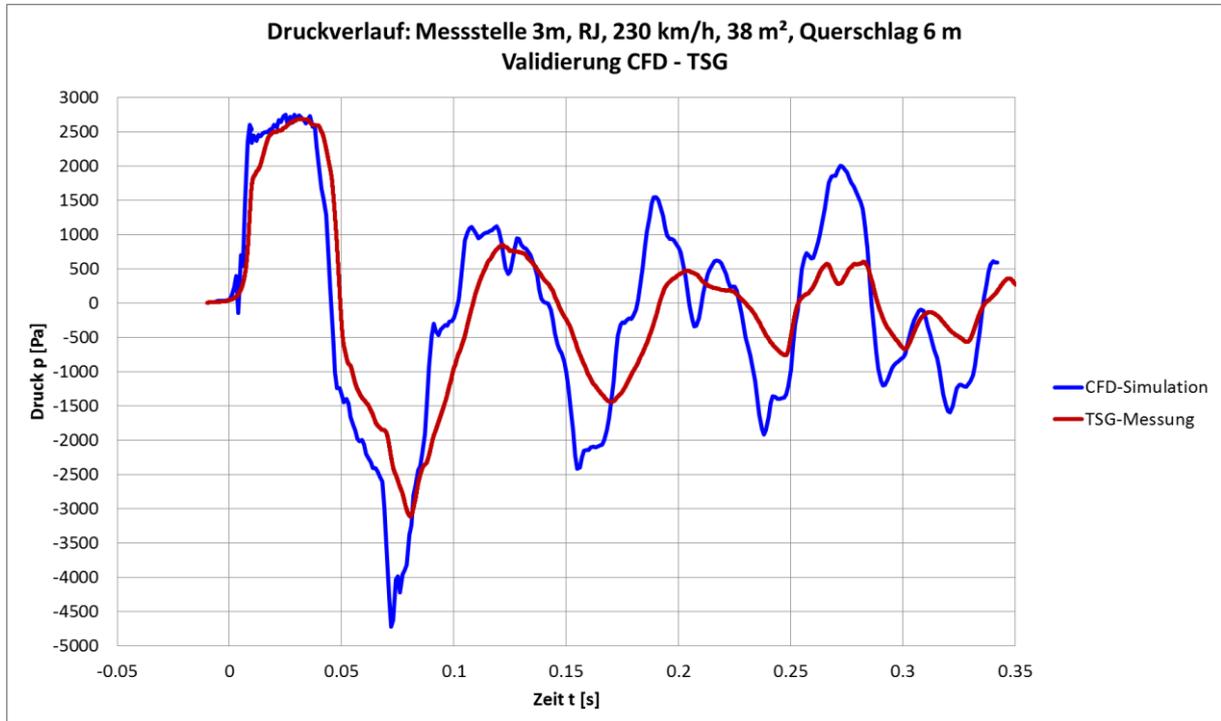


Abbildung 122: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Vergleich CFD-Simulation mit TSG-Messungen bei Queranschlagslänge 6 m & 230 km/h

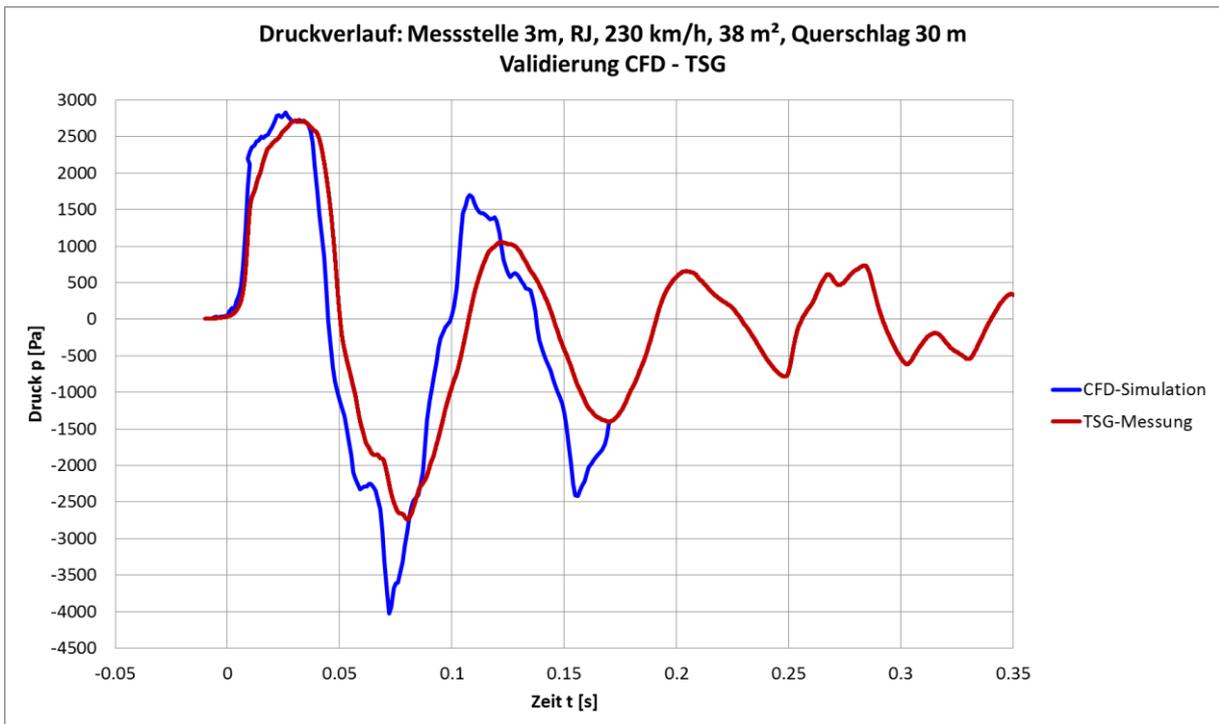


Abbildung 123: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Vergleich CFD-Simulation mit TSG-Messungen bei Querschlagslänge 30 m & 230 km/h

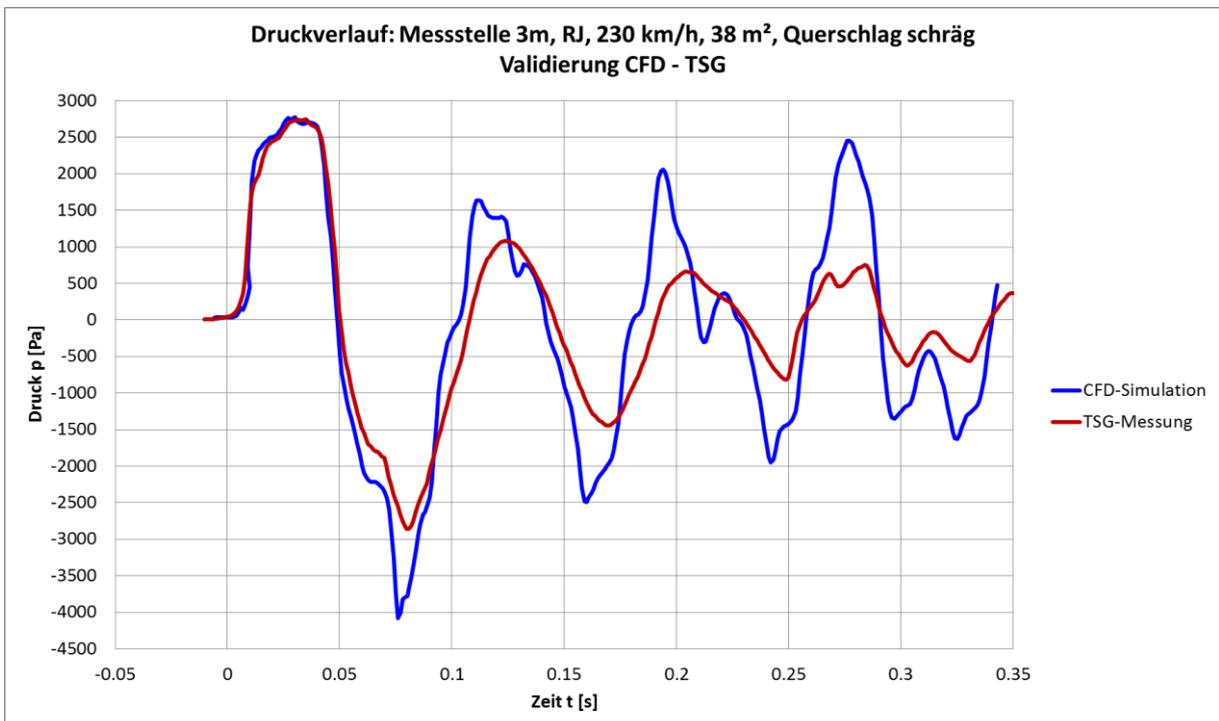


Abbildung 124: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Vergleich CFD-Simulation mit TSG-Messungen bei schrägem Querschlag & 230 km/h

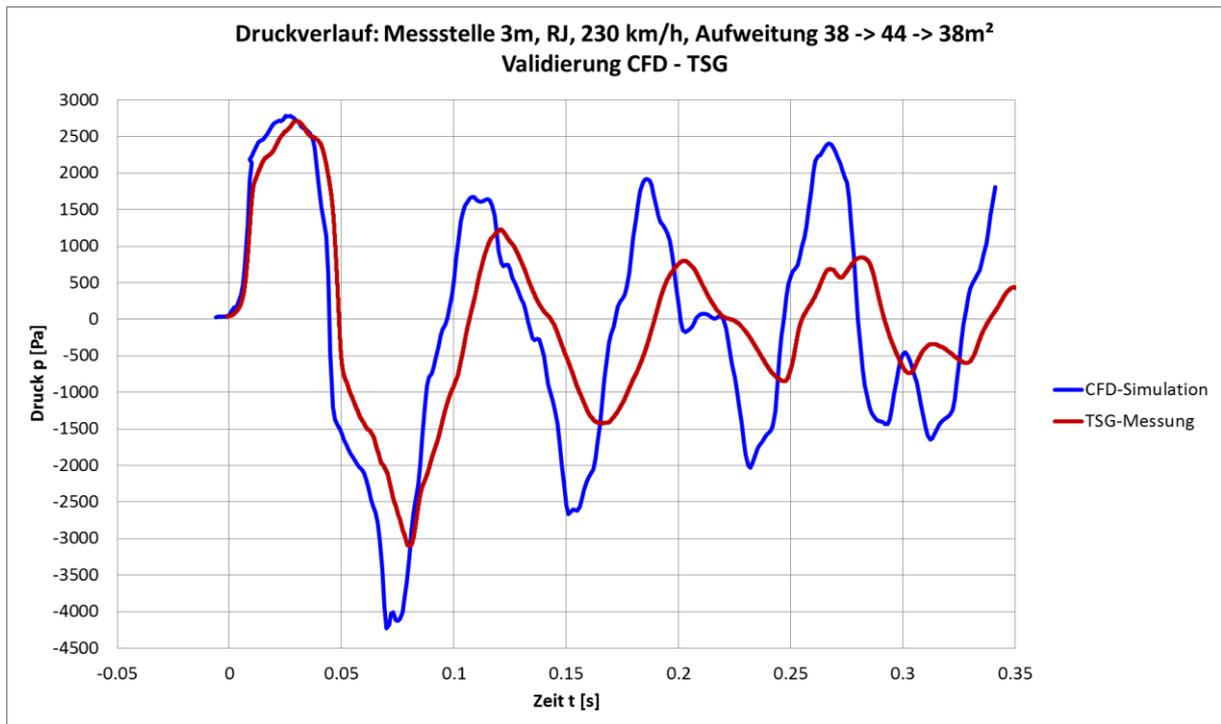


Abbildung 125: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Vergleich CFD-Simulation mit TSG-Messungen bei radialer Querschnittserweiterung von 38 m<sup>2</sup> auf 44m<sup>2</sup> & 230 km/h

## 8.2 CFD-Berechnung: Variation exzentrische Gleislage

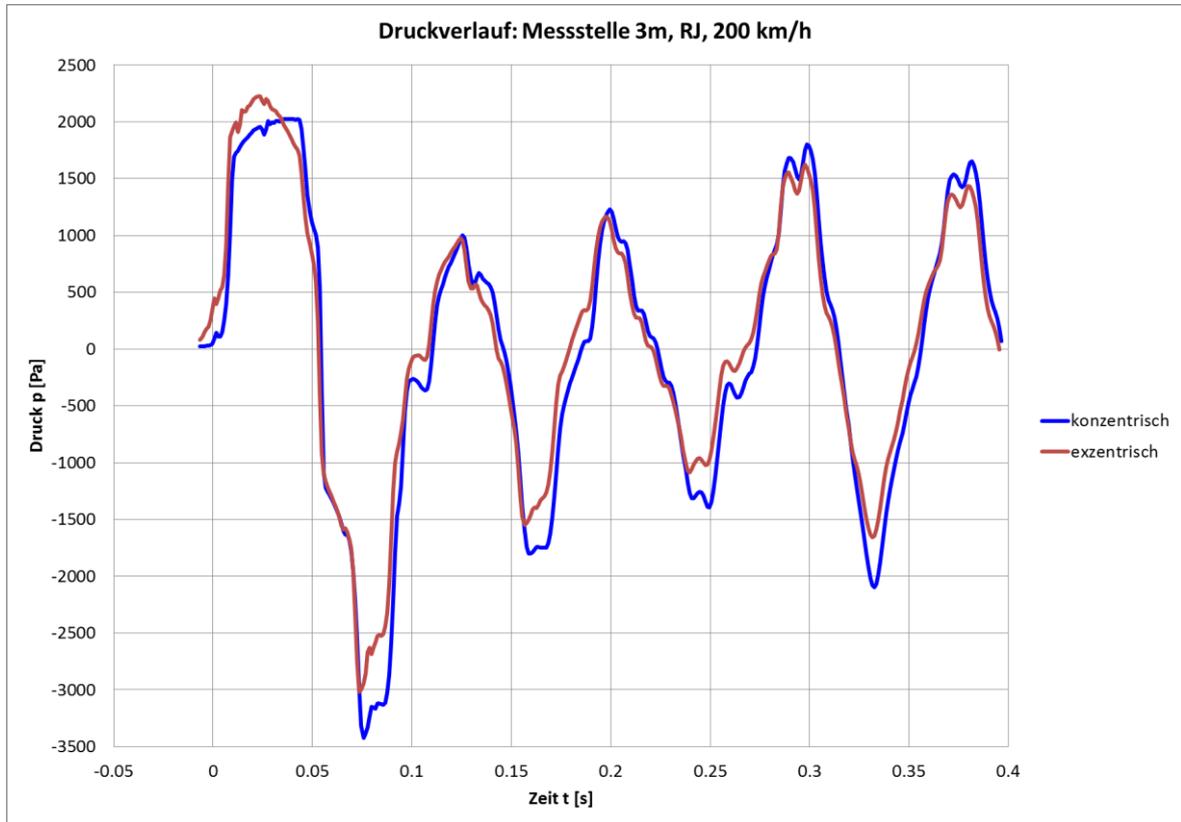


Abbildung 126: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Achsenlage bei 200 km/h

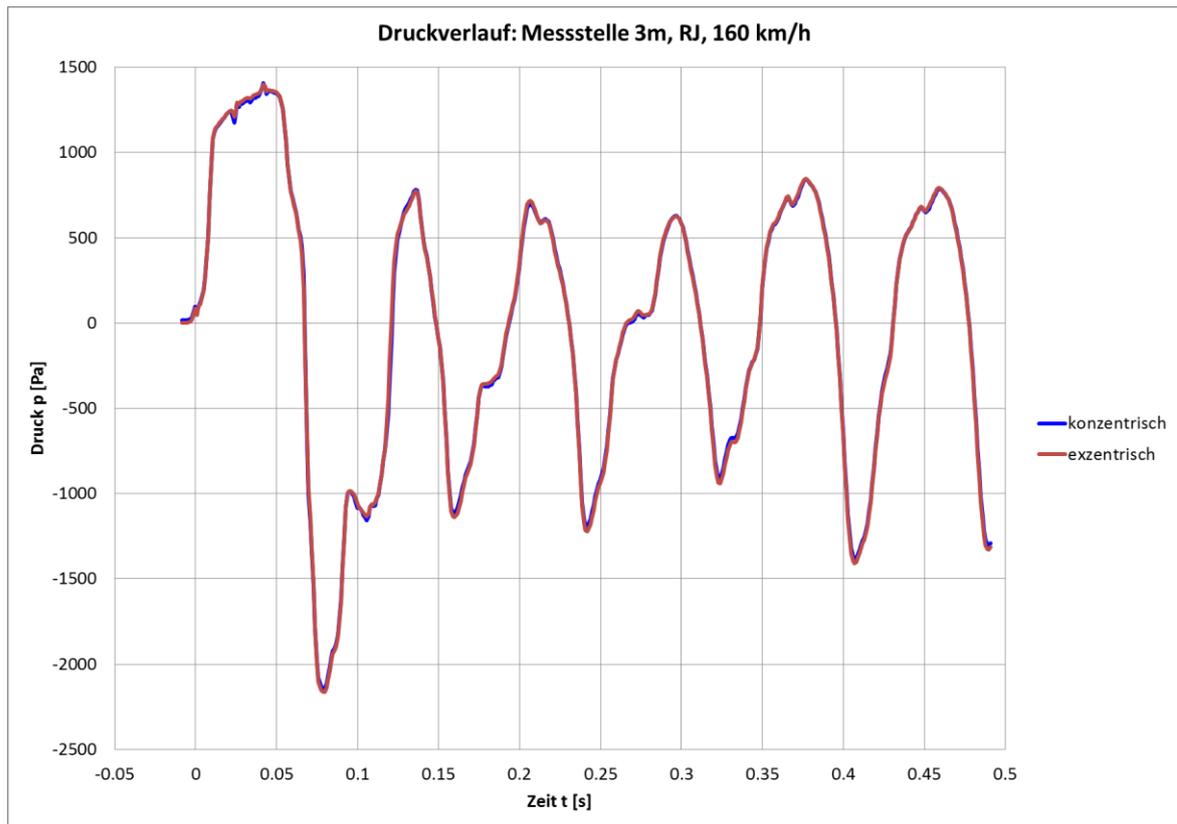


Abbildung 127: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Achsenlage bei 160 km/h

### 8.3 CFD-Berechnung: Variation von Tunnelquerschnittsfläche (global) und Zuggeschwindigkeit

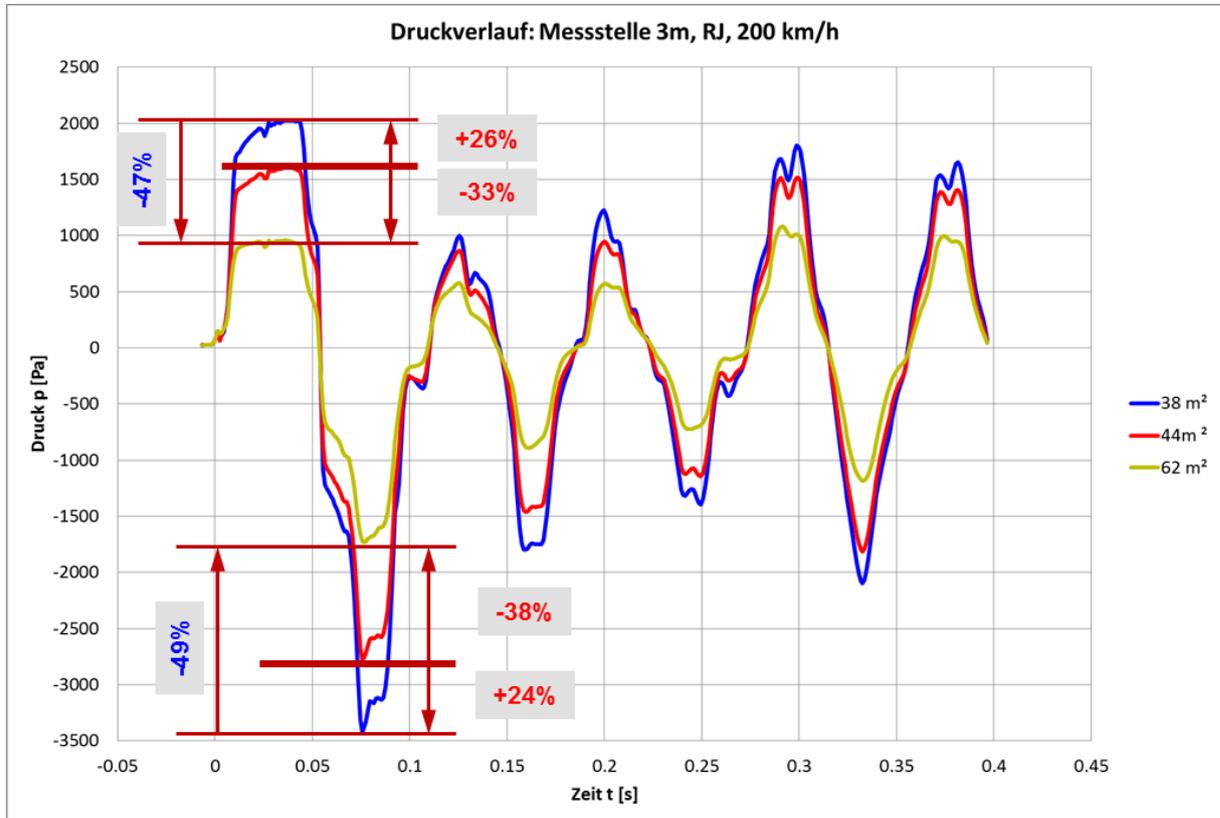


Abbildung 128: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunnelleinfahrt; Einfluss globale Tunnelquerschnittsfläche bei glatter Tunnelröhre, 200 km/h

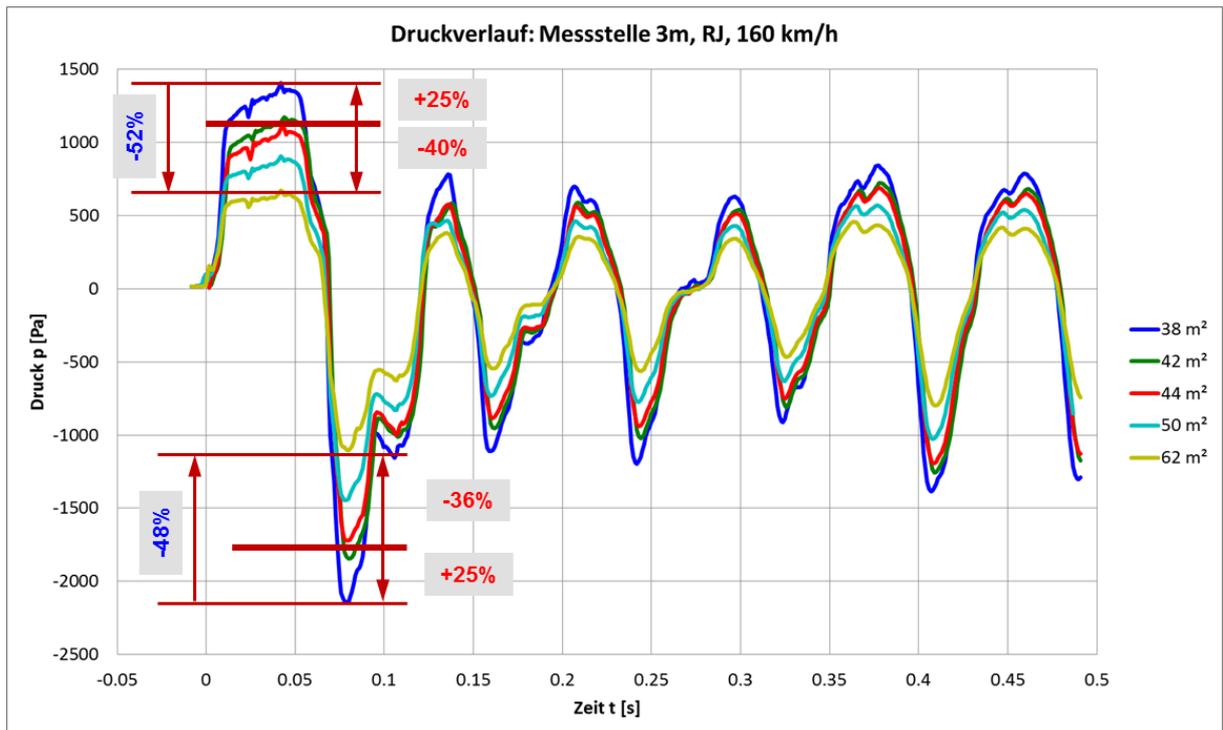


Abbildung 129: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss globale Tunnelquerschnittsfläche bei glatter Tunnelröhre, 160 km/h

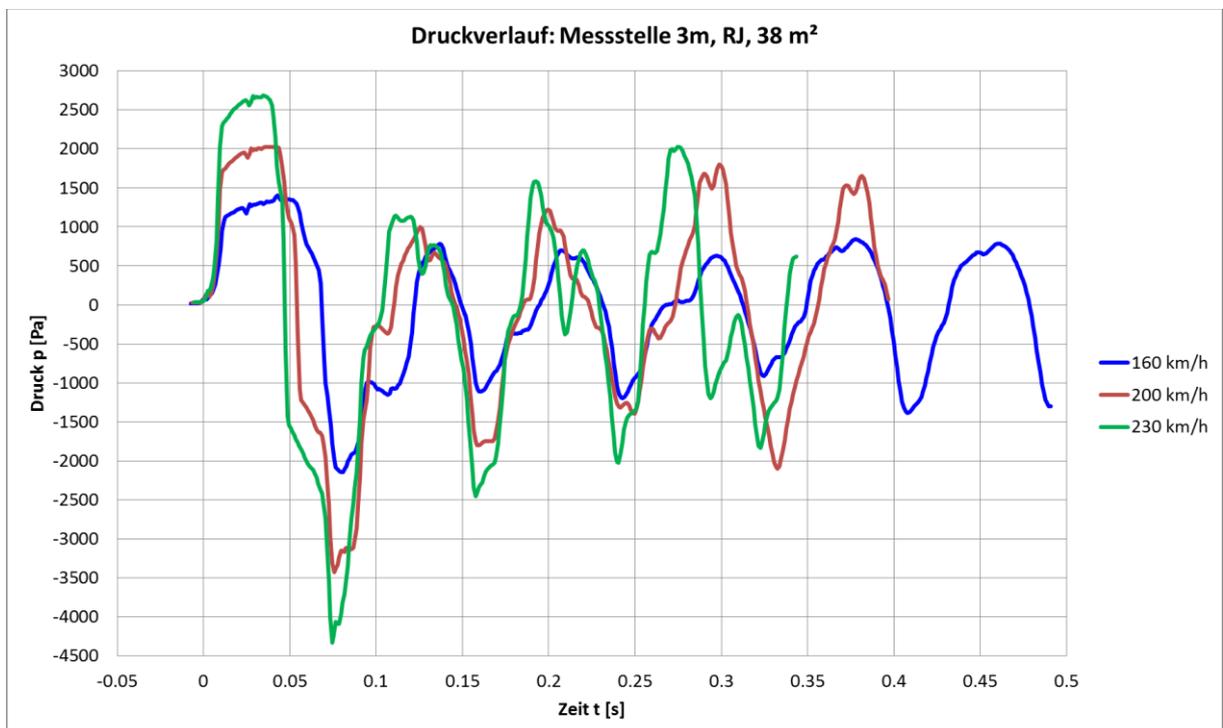


Abbildung 130: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt, Querschnittsfläche: 38 m<sup>2</sup>; Einfluss der Zuggeschwindigkeit

## 8.4 CFD-Berechnung: Variation der Geometrie des Querschlaganschlusses

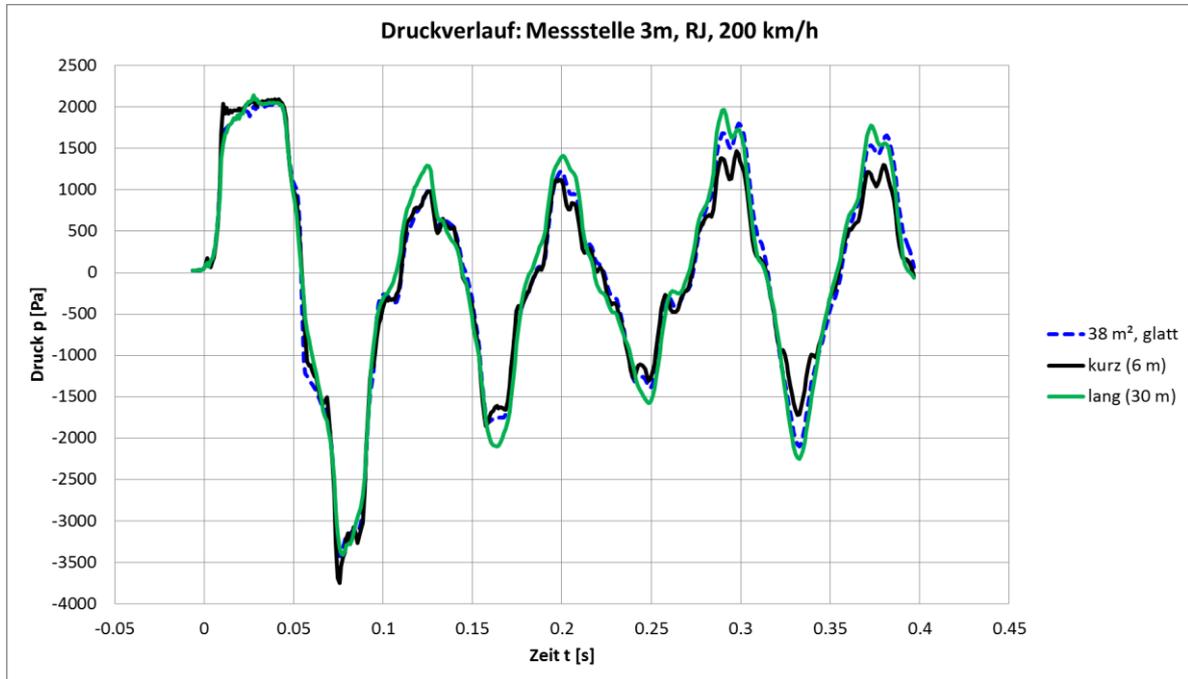


Abbildung 131: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Geometrie des Querschchluss, 200 km/h

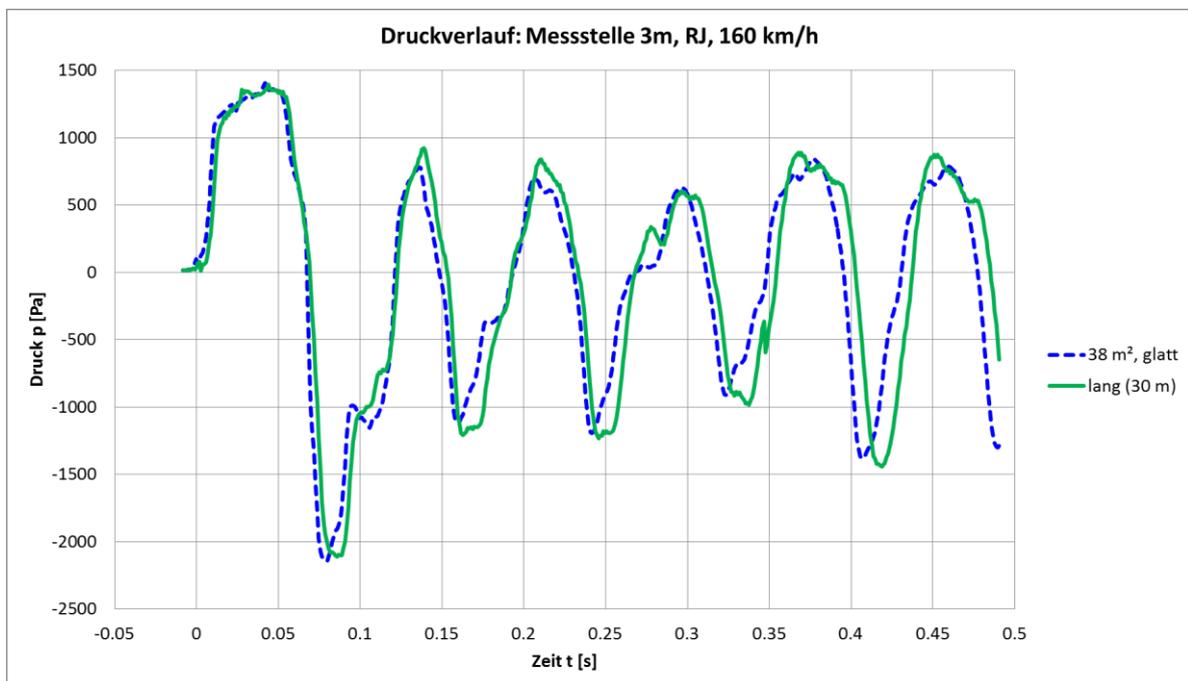


Abbildung 132: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Geometrie des Querschchluss, 160 km/h

## 8.5 CFD-Berechnung: Tunnelaufweitung (38 → 44 → 38 m<sup>2</sup>)

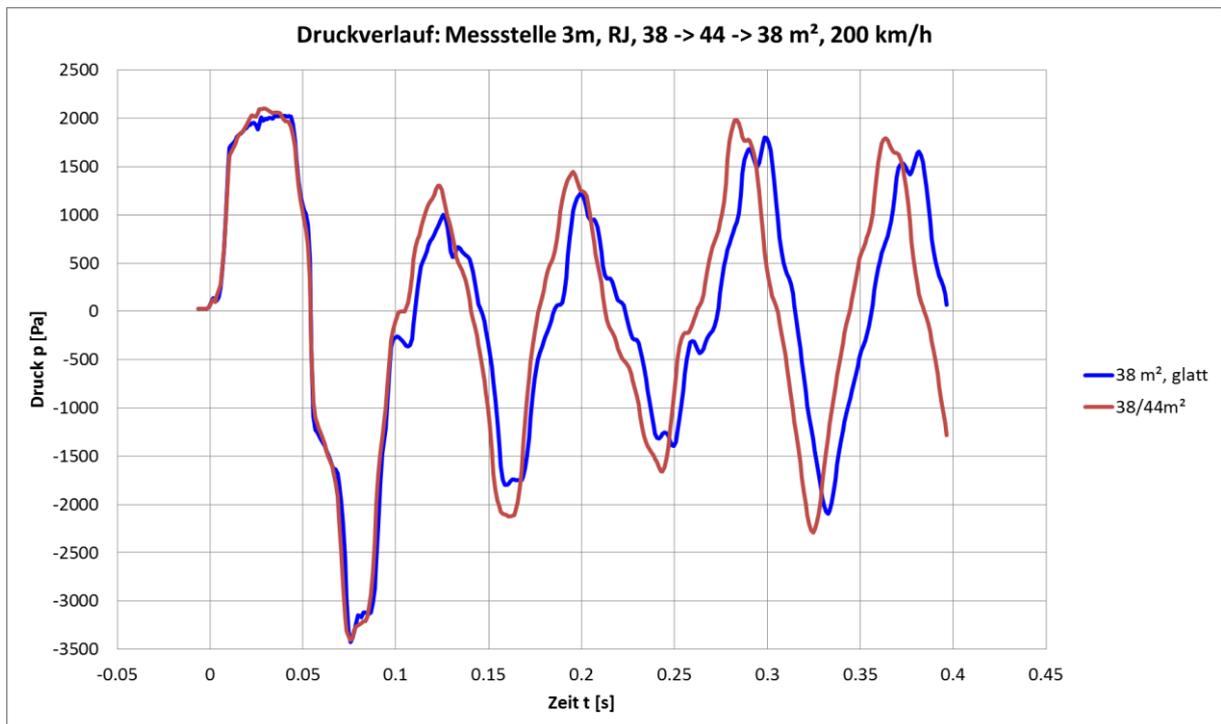


Abbildung 133: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Tunnelaufweitung von 38 m<sup>2</sup> auf 44 m<sup>2</sup> im Bereich der Messstelle; Zuggeschwindigkeit 200 km/h

## 8.6 CFD-Berechnung: Kurzer vs halb-unendlich langer Tunnel

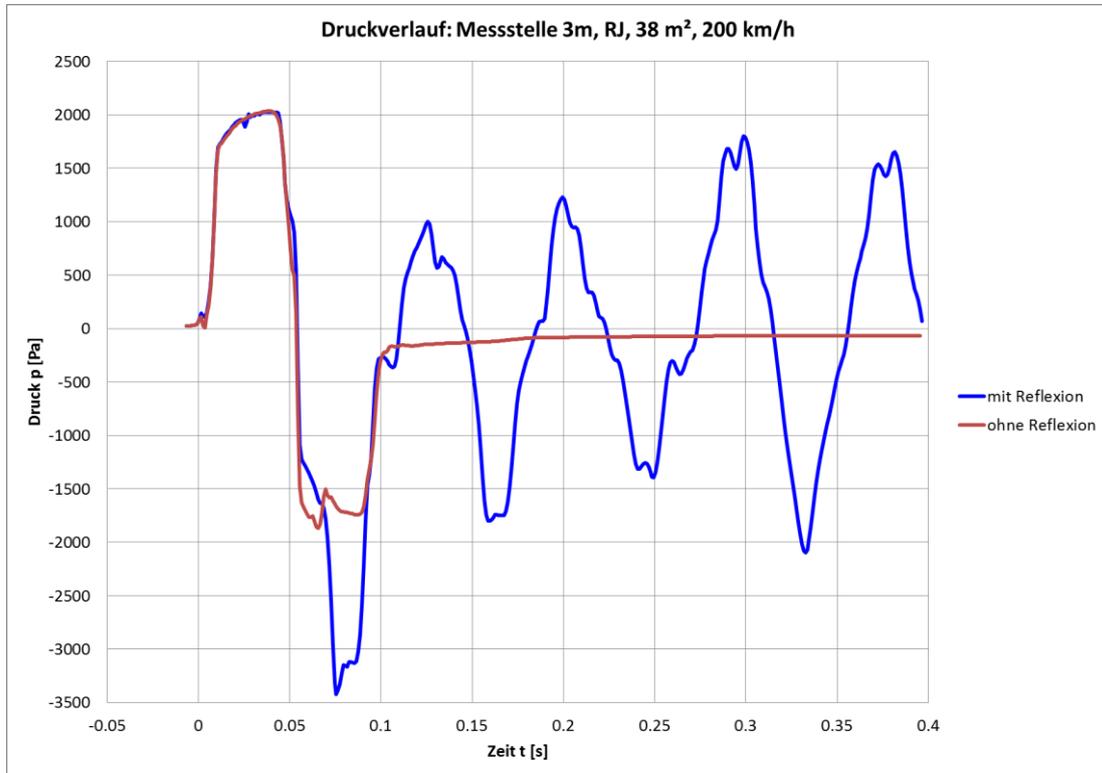


Abbildung 134: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Reflexion am Tunnelende; Zuggeschwindigkeit 200 km/h

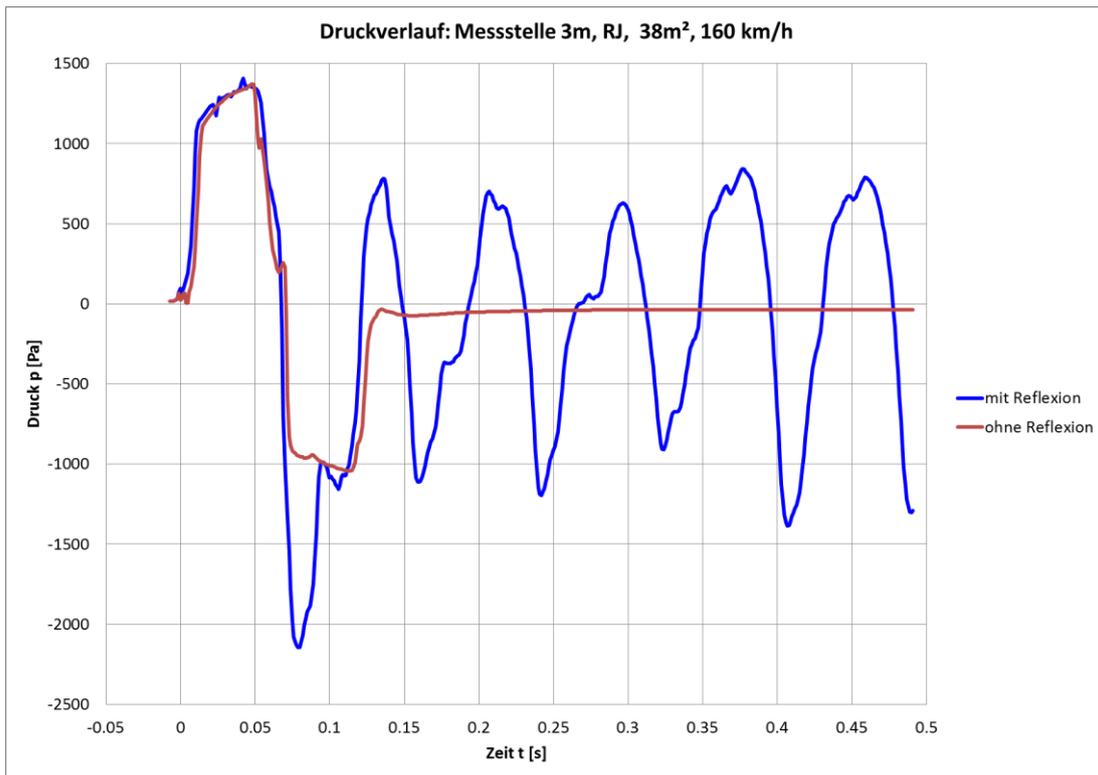


Abbildung 135: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Reflexion am Tunnelende; Zuggeschwindigkeit 160 km/h

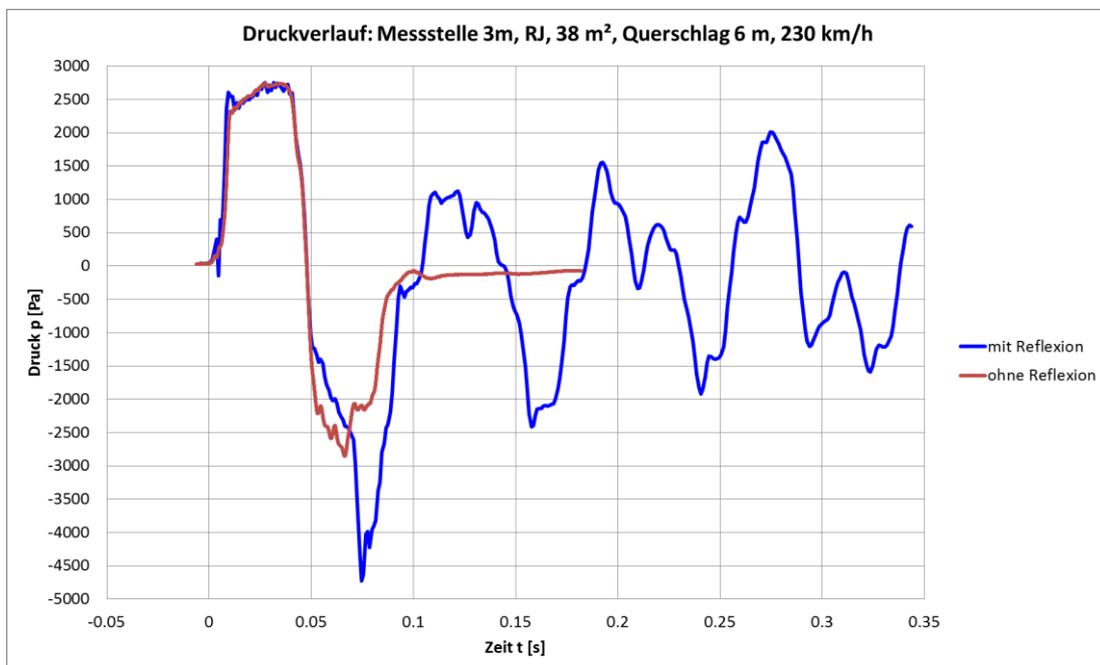


Abbildung 136: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Reflexion am Tunnelende und kleine Nische (6 m) vor Notausgang; Zuggeschwindigkeit 230 km/h

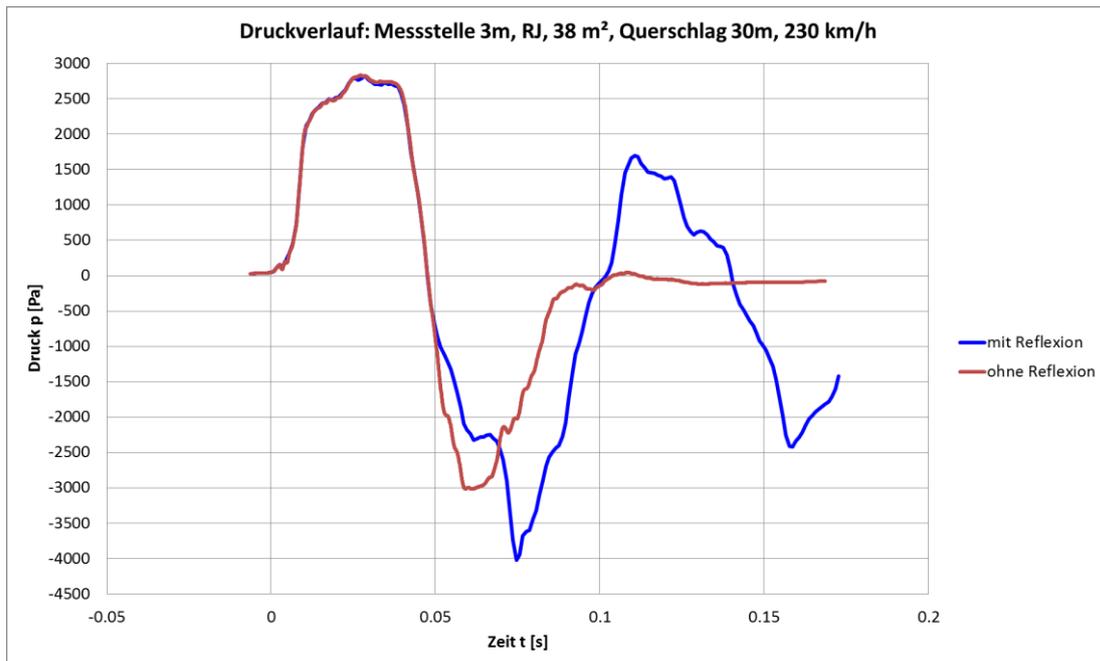


Abbildung 137: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Reflexion am Tunnelende und große Nische (30 m) vor Notausgang; Zuggeschwindigkeit 230 km/h

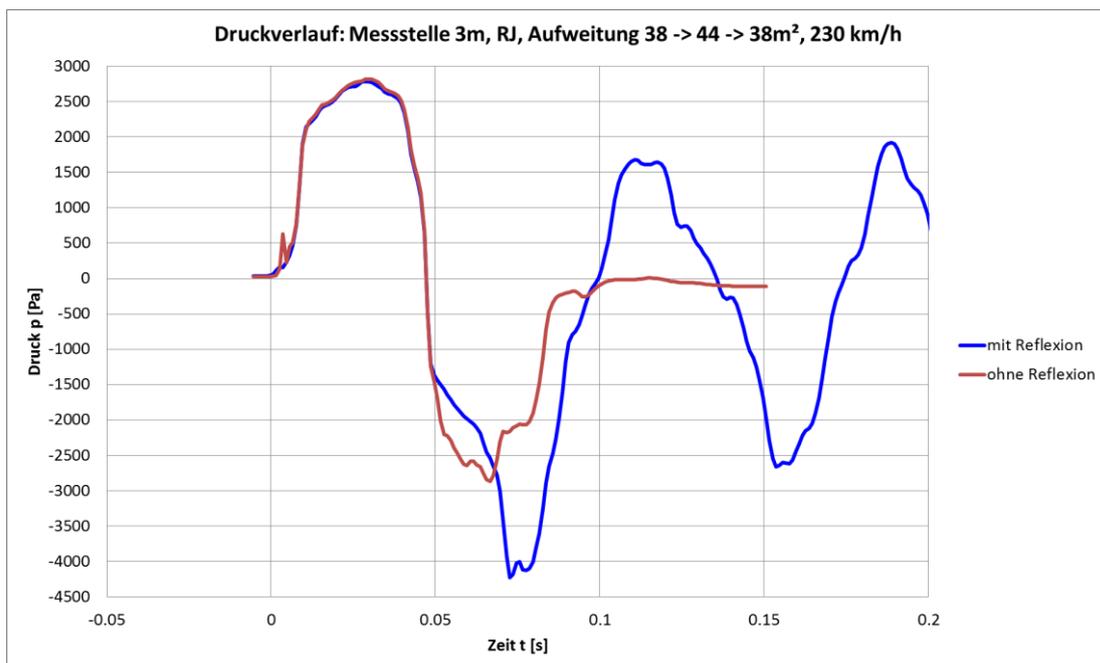


Abbildung 138: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Reflexion am Tunnelende und Aufweitung; Zuggeschwindigkeit 230 km/h

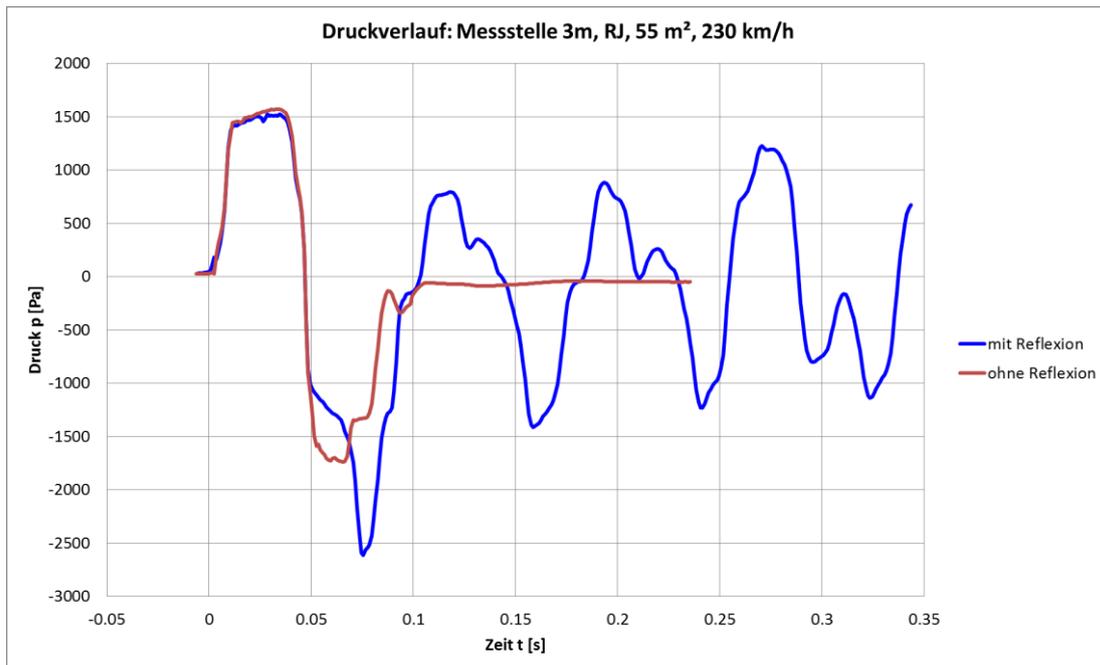
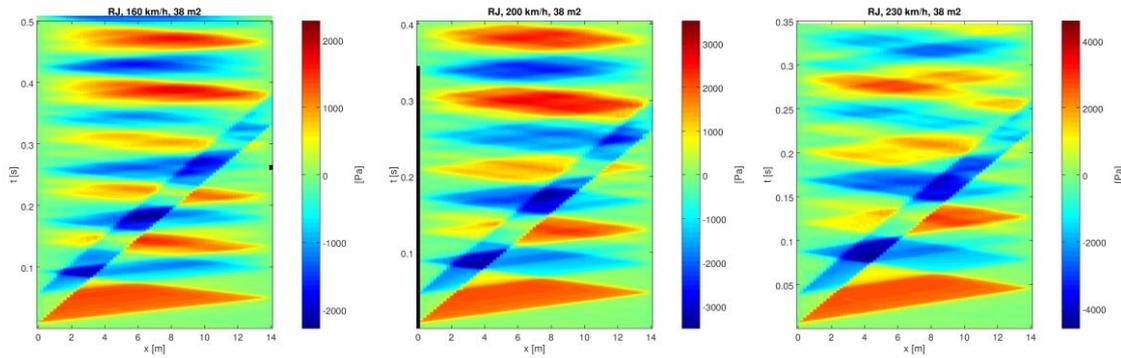


Abbildung 139: Druckverlauf an Messstelle 3 m nach Tunneleinfahrt; Einfluss der Reflexion am Tunnelende; Zuggeschwindigkeit 230 km/h

## 8.7 CFD-Berechnung: Drucksignatur im glatten Tunnel

Abbildung 140: CFD-Simulation, Railjet-Modell: Druckverlauf für die verschiedenen Tunnelquerschnittsflächen und Zuggeschwindigkeiten

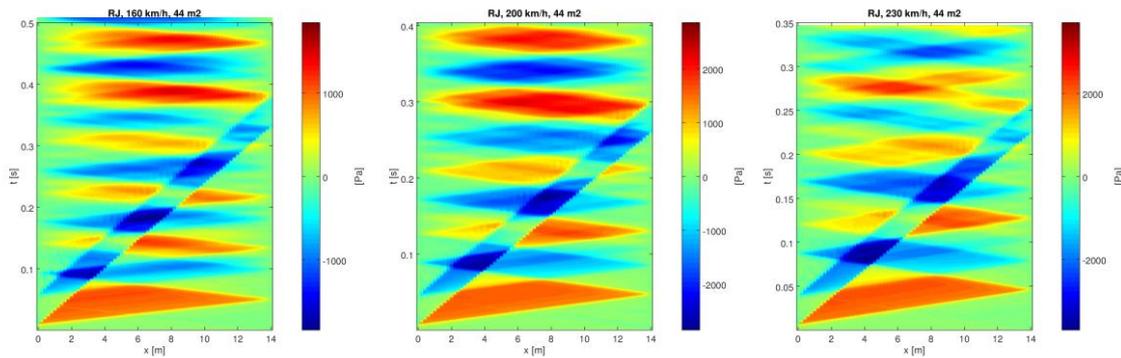
38 m<sup>2</sup> Tunnel bei 160, 200 und 230 km/h



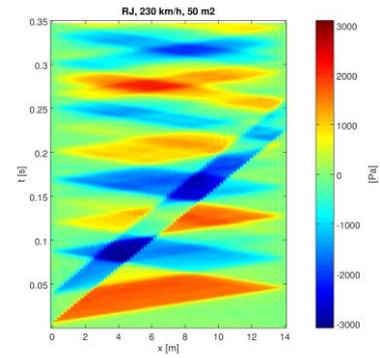
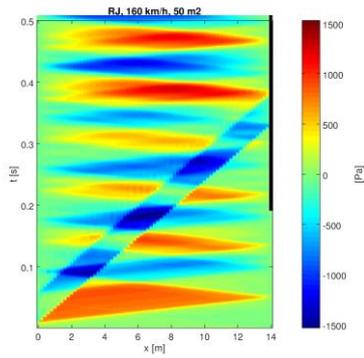
42 m<sup>2</sup> Tunnel bei 160 und 230 km/h



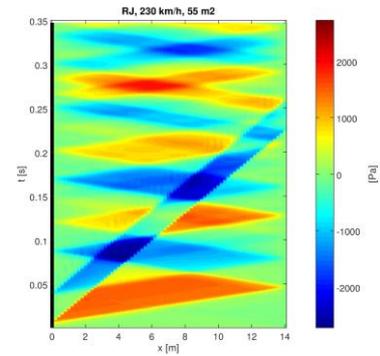
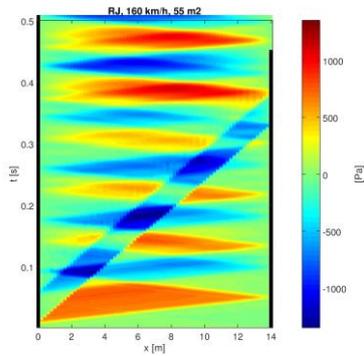
44 m<sup>2</sup> Tunnel bei 160, 200 und 230 km/h



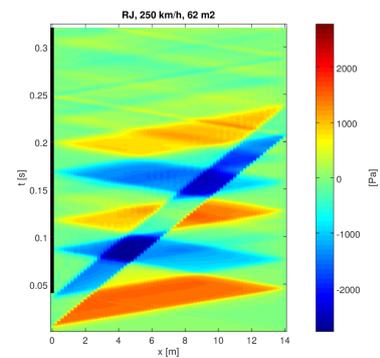
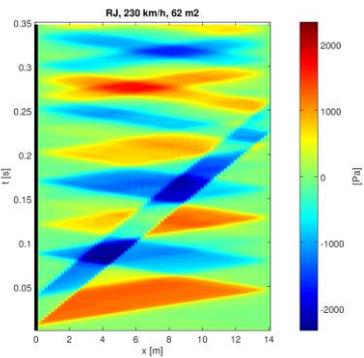
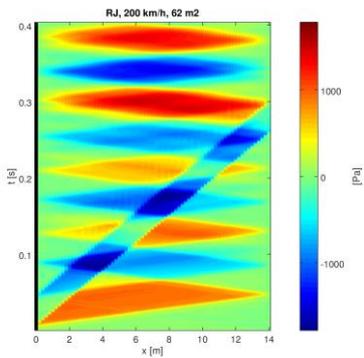
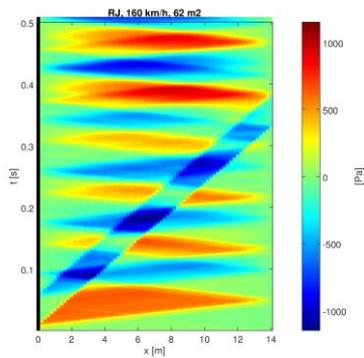
50 m<sup>2</sup> Tunnel bei 160 und 230 km/h



55 m<sup>2</sup> Tunnel bei 160 und 230 km/h



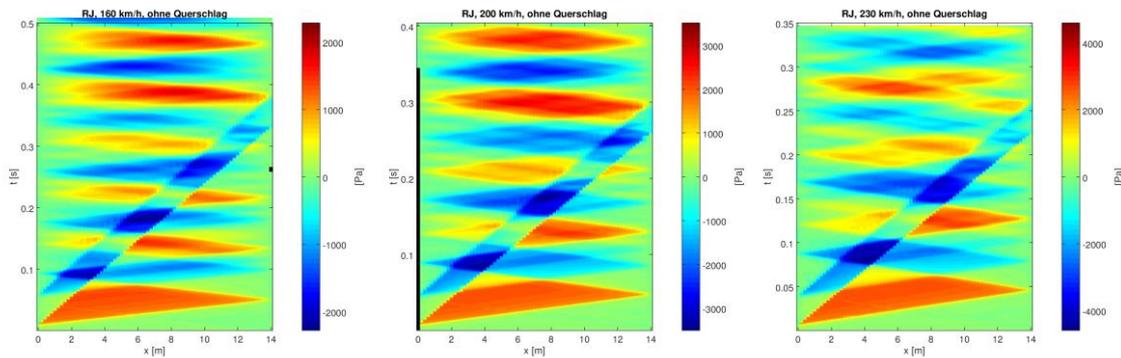
62 m<sup>2</sup> Tunnel bei 160, 200, 230 und 250 km/h



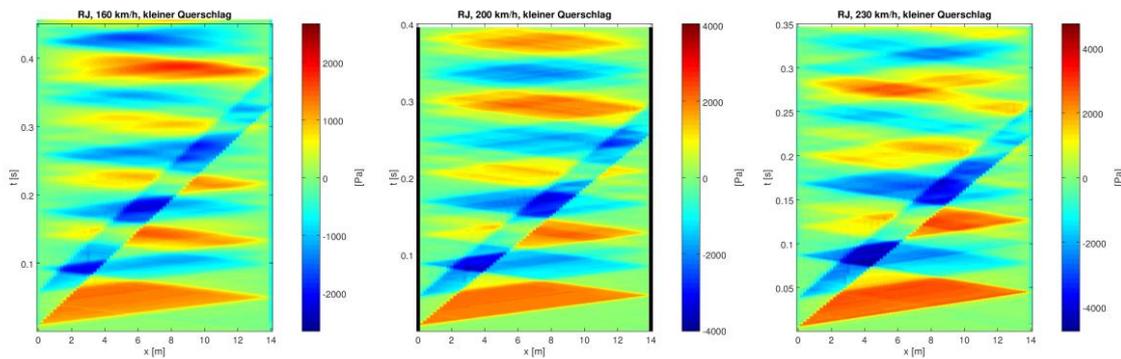
## 8.8 CFD-Berechnung: Drucksignatur der Querschlagsvariationen

Abbildung 141: CFD-Simulation, 38 m<sup>2</sup> Tunnel, Railjet-Modell: Druckverlauf für die verschiedenen Querschlagskonfigurationen

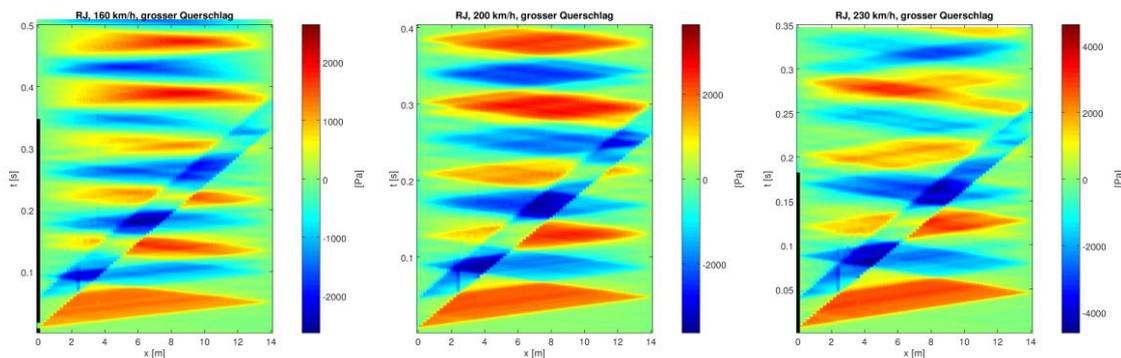
38 m<sup>2</sup> Tunnel, ohne Querschlag bei 160, 200 und 230 km/h



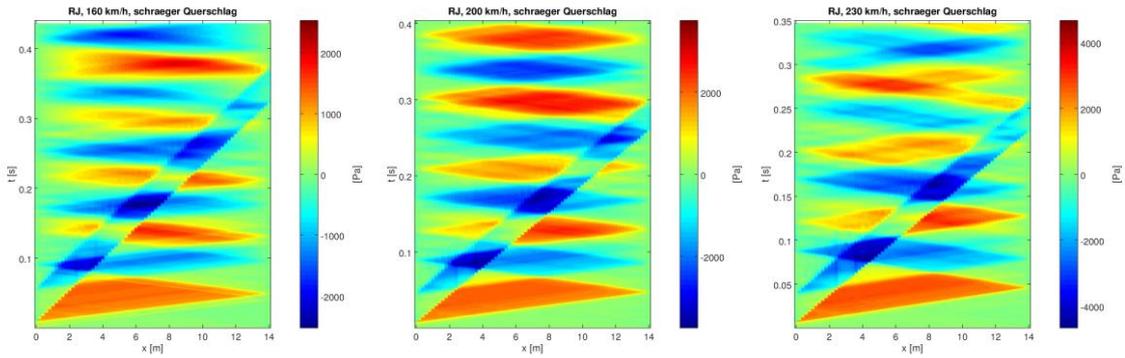
38 m<sup>2</sup> Tunnel, kleiner Querschlag bei 160, 200 und 230 km/h



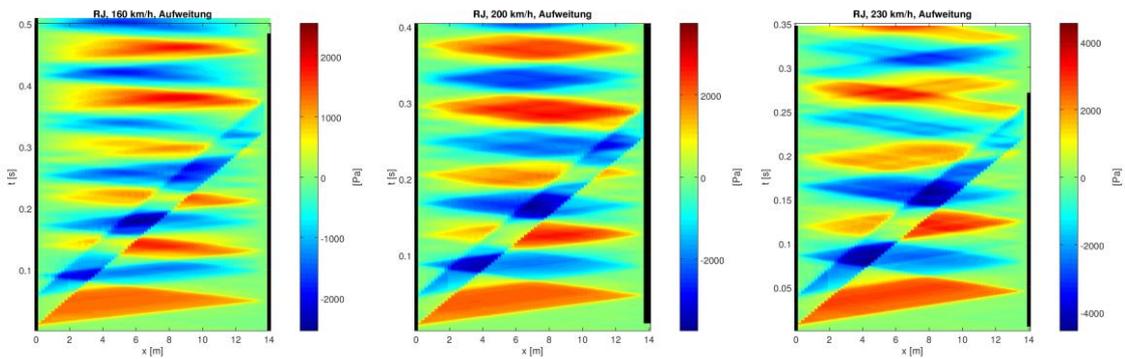
38 m<sup>2</sup> Tunnel, großer Querschlag bei 160, 200 und 230 km/h



38 m<sup>2</sup> Tunnel, schräger Querschlag bei 160, 200 und 230 km/h



38 m<sup>2</sup> Tunnel mit Aufweitung auf 44 m<sup>2</sup> bei 160, 200 und 230 km/h



### 8.9 TSG-Versuche

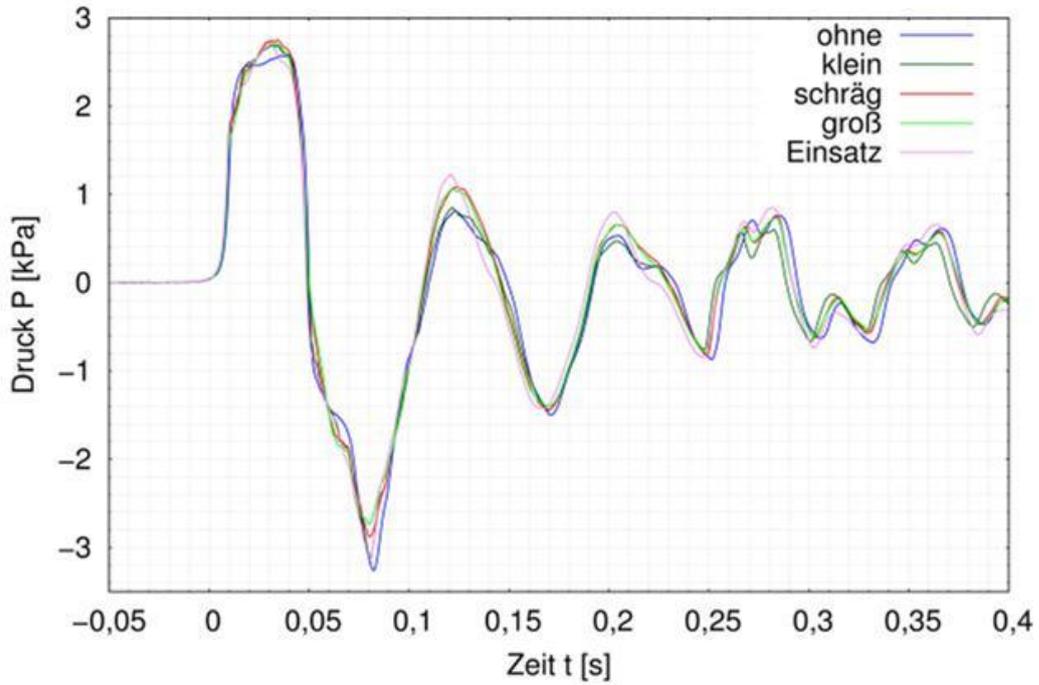


Abbildung 142: Vergleich der Konf. 1-5, Railjet, 230km/h, Messposition 3m

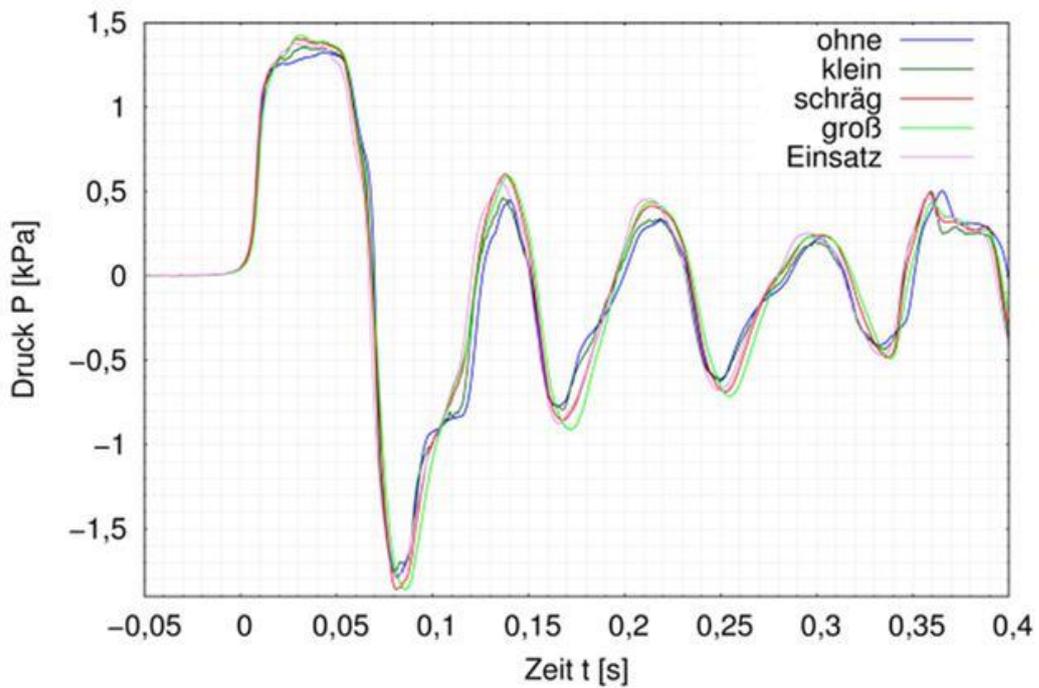


Abbildung 143: Vergleich der Konf. 1-5, Railjet, 160km/h, Messposition 3m

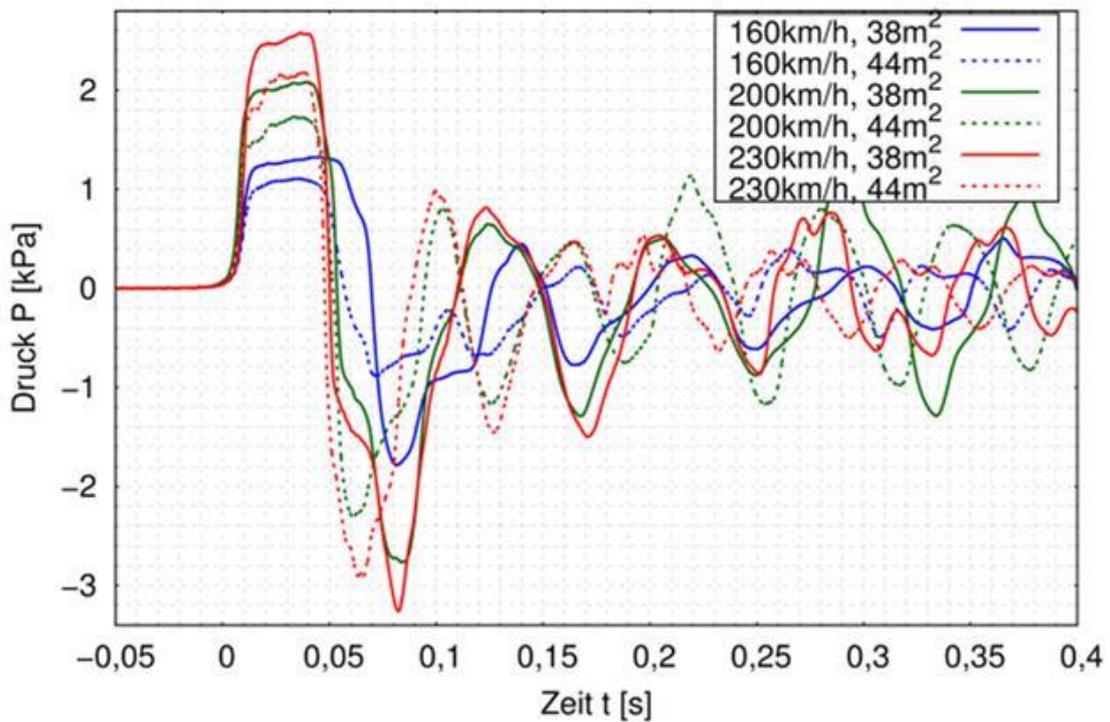


Abbildung 145: Vergleich der zwei Tunnelgrößen bei drei Geschwindigkeiten, Railjet, x=3m

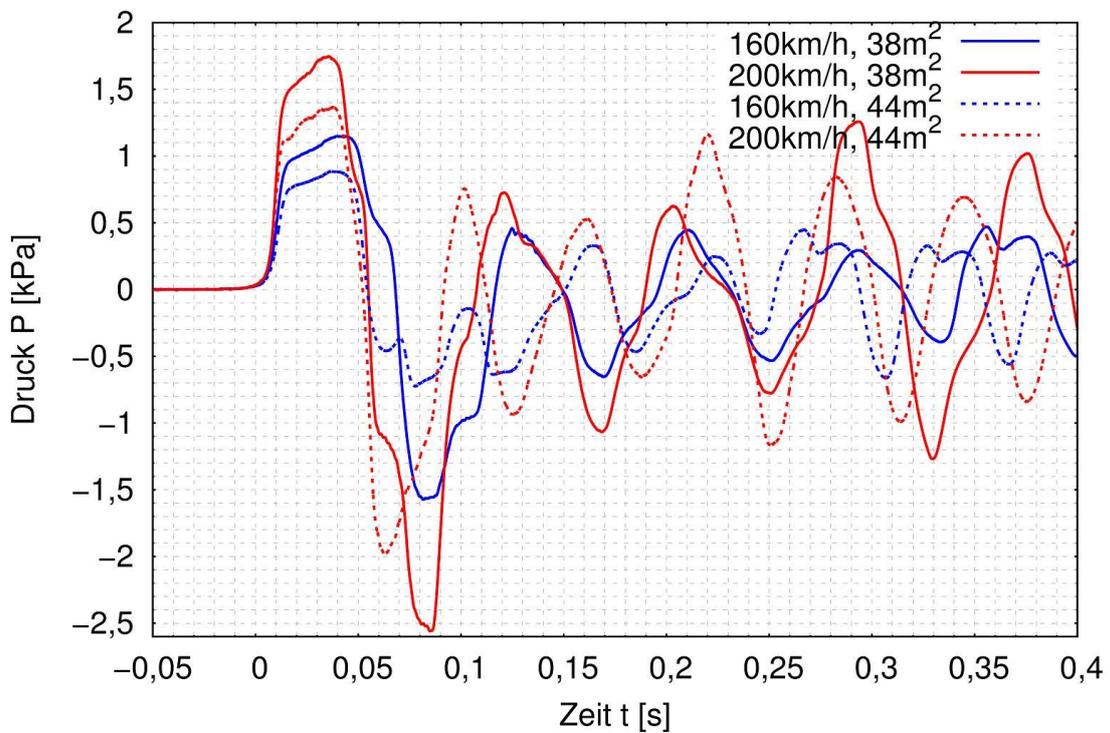


Abbildung 144: Vergleich der zwei Tunnelgrößen bei zwei Geschwindigkeiten, ICE3, x=3m