



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall**

**Influence du courant d'air longitudinal  
dans les tunnels routiers en cas d'incendie**

**Influencing the longitudinal airflow  
in road tunnels in case of fire**

**HBI Haeter AG**  
**Dipl. Ing. Petr Pospisil**  
**Dipl. Ing. Ludwig Ilg**  
**Dipl. Ing. Antonio Di Miele**  
**Dipl. Ing. Nik Krasnobajew**  
**Dipl. Ing. Aurélien Jordan**  
**Dipl. Ing. Simon Frey**  
**Dr. Rune Brandt**

**Forschungsauftrag ASTRA 2007/002\_OBF auf Antrag des  
Bundesamtes für Strassen (ASTRA)**

**September 2010**

**1310**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall**

**Influence du courant d'air longitudinal  
dans les tunnels routiers en cas d'incendie**

**Influencing the longitudinal airflow  
in road tunnels in case of fire**

**HBI Haeter AG**  
**Dipl. Ing. Petr Pospisil**  
**Dipl. Ing. Ludwig Ilg**  
**Dipl. Ing. Antonio Di Miele**  
**Dipl. Ing. Nik Krasnobajew**  
**Dipl. Ing. Aurélien Jordan**  
**Dipl. Ing. Simon Frey**  
**Dr. Rune Brandt**

**Forschungsauftrag ASTRA 2007/002\_OBF auf Antrag des  
Bundesamtes für Strassen (ASTRA)**

**September 2010**

**1310**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Dipl. Ing. Petr Pospisil und Dr. Rune Brandt

### Mitglieder

Dipl. Ing. Ludwig Ilg  
Dipl. Ing. Antonio Di Miele  
Dipl. Ing. Nik Krasnobajew  
Dipl. Ing. Aurélien Jordan  
Dipl. Ing. Simon Frey

## Begleitkommission

### Präsident

Dipl. Ing. Werner Furrer

### Mitglieder

Dipl. Ing. Alain Jeanneret  
Dipl. Ing. Walter Steiner  
Dipl. Ing. Pierre-Sébastien Porret  
Dipl. Ing. Peter Wartmann  
Dr. Franz Zumsteg  
Dipl. Ing. John Day  
Prof. Dr. Thomas Staubli

## Antragsteller

HBI Haerter AG, Stockerstrasse 12, 8002 Zürich

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> heruntergeladen werden.

## Impressum

<i>Volltitel</i>	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall
<i>Kurztitel</i>	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall
<i>Auftraggeber</i>	Bundesamt für Strassen ASTRA
<i>Verfasser</i>	Petr Pospisil, Ludwig Ilg, Antonio Di Miele, Nik Krasnobajew, Aurélien Jordan, Simon Frey, Rune Brandt
<i>Projekt- / Objektname</i>	Forschungsprojekt ASTRA 2007/002
<i>Auftragsnummer</i>	08-003
<i>Berichtsnummer</i>	08-003-02
<i>Berichtdatum</i>	2010-09-30
<i>Version</i>	Ver. 2.0
<i>Verteiler</i>	Geschäftsstelle Forschung im Strassenwesen

	<i>Autor</i>	<i>Prüfer</i>	<i>Freigabe</i>	<i>Vers.</i>	<i>Änderungen</i>
<i>Name</i>	Brandt	Krasnobajew	Brandt	1.0	Schlussbericht
<i>Datum</i>	2010-09-30	2010-09-30	2010-09-30		
<i>Name</i>					
<i>Datum</i>					

## Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts ASTRA 2007/002 ‚Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall‘ werden verschiedene Verfahren untersucht, um die Längsströmung in einem Strassentunnel zu kontrollieren. Dazu gehören, neben der heute in der Schweiz am meisten verwendeten Lösung mit Strahlventilatoren, die Verwendung von (Halb-)Querlüftungsanlagen, die konzentrierte Einblasung in den Tunnel (insbesondere in Form von Saccardo-Düsen), Absaugung aus dem Tunnel, Luftvorhänge und mechanische Vorhänge.

Die unterschiedlichen Verfahren werden qualitativ beschrieben und einander gegenübergestellt, mit Darstellung der physikalischen Grundlagen, der rechnerischen Beschreibung und mit Anwendungsbeispielen aus der Praxis.

Ein qualitativer Vergleich wurde durchgeführt bezüglich:

- Wirkung und Effizienz
- Realisierbarkeit (bei neuen und bestehenden Tunneln)
- Baulicher Aufwand (Lüftungszentralen, Kanäle, Nischen etc.)
- Aufwand für die Anlagen (Lüftungsaggregate, Stromversorgung, Messgeräte, Steuerung)
- Kosten (Investition, Betrieb und Unterhalt)
- Zuverlässigkeit
- Betriebserfahrungen aus der Praxis

Als am besten geeignete Verfahren wurden Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen identifiziert. Während für Strahlventilatoren umfangreiche theoretische Untersuchungen und Erfahrungen aus der Praxis bestehen, ist die Anwendung von Saccardo-Düsen zumindest in letzter Zeit in der Schweiz in den Hintergrund getreten.

Deshalb wurde ein Schwerpunkt dieses Forschungsauftrags auf die Untersuchung von Saccardo-Düsen gelegt. Mittels 2D- und 3D-Simulationen wurde der Einfluss von lokalen Strömungseffekten untersucht. Damit konnten Korrekturfaktoren für die (bekannten) eindimensionalen Auslegungsrechnungen ermittelt werden.

In einem bestehenden Strassentunnel wurden Messungen mit einem Saccardo-Düsen Modell durchgeführt. Damit wurden die Simulationen weitgehend bestätigt. Zudem konnten praktische Erkenntnisse für eine mögliche Umsetzung bei Umbauprojekten gewonnen werden.

In Bezug auf die Methoden der Beeinflussung der Längsströmung wurden die folgenden wesentlichen Erkenntnisse gewonnen

- Zur Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall sind Prinzipien mit gezieltem Impuls in Richtung der Tunnellängsachse am besten geeignet, konkret Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen.
- Strahlventilatoren sind heute als Stand der Technik etabliert und haben in den meisten Fällen Vorteile in Bezug auf Effizienz und Investitionskosten.
- Saccardo-Düsen können in Sonderfällen vorteilhafter sein, insbesondere in Umbauprojekten, falls kein Platz für Strahlventilatoren vorhanden ist und wenn bestehende Lüftungszentralen mit Zuluftventilatoren genutzt werden können.
- Saccardo-Düsen haben gegenüber Strahlventilatoren Vorteile in Bezug auf Korrosions- und Brandbeständigkeit, sowie bezüglich Zugänglichkeit für Unterhalts- und Reparaturarbeiten.
- Für die Auslegung von Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen sind die bekannten 1D-Verfahren geeignet. Lokale Effekte werden dabei durch den Impulsumsetzungskoeffizienten  $k_{MX}$  berücksichtigt. Dieser ist ein Mass für die Effizienz der Schubumsetzung vom Luftstrahl auf die Strömung im Tunnel. In der ASTRA-Richtlinie [1] wird der Impulsumsetzungskoeffizient für Strahlventilatoren als Einbauwirkungsgrad bezeichnet.
- Der Impulsumsetzungskoeffizient hängt sowohl für Strahlventilatoren als auch für Saccardo-Düsen von der Geometrie und erheblich vom Strömungszustand ab. Zu unterscheiden sind die folgenden Situationen:
  - o Abbremsen einer Strömung mit Impuls gegen die Strömungsrichtung
  - o Antrieb einer Strömung mit Impuls in Strömungsrichtung, mit Rückströmung, d.h. Strömung in beide Richtungen
  - o Antrieb einer Strömung mit Impuls in Strömungsrichtung, ohne Rückströmung d.h. Strömung in eine Richtung (in den meisten Fällen ist dies der Zielzustand der Auslegung)
  - o Dabei ist auch der dynamische Wechsel zwischen verschiedenen Strömungszuständen zu berücksichtigen.
- Für die detaillierte Ermittlung der Impulsumsetzungskoeffizienten sind Simulationsrechnungen und/oder Messungen nötig. Bei standardisierten geometrischen Anordnungen, insbesondere bei Strahlventilatoren, können in der Regel bekannte Werte übernommen werden.
- Bei Tunneln mit hohem LKW-Anteil und Staugefahr ist eine weitere Reduktion der Impulsumsetzung durch Fahrzeuge, welche den Strahl blockieren, zu berücksichtigen.
- Verfahren zur Beeinflussung der Luftströmung mit gezieltem Impuls in Richtung der Tunnellängsachse müssen geregelt werden bei Richtungsverkehr mit Stau und bei Gegenverkehr.
- Ein Beeinflussen der Luftströmung ohne Notwendigkeit der Regelung ist mittels Ein- und Ausblausung mit hohen Luftmengen und mehreren Lüftungsabschnitten möglich. Dies ist der Fall bei einigen langen Strassentunneln mit Querlüftungsanlagen. Bei neuen oder kürzeren Tunneln würde dies aber zu unnötig hohen Investitionskosten führen und ist deshalb nicht wirtschaftlich.

In Bezug auf die Regelungstechnik konnte folgendes festgestellt werden

- Die Regelung der Längsströmung mit PID-Reglern ist heute Stand der Technik. Allerdings gibt es in der Praxis oft Mängel bei der Umsetzung wegen fehlenden Qualitäts- und Prüfvorgaben.
- Für die Regelung ist die Bereitstellung eines Leitwertes mit einer absolut zuverlässigen, genauen Luftströmungsmessung im Fahrraum essentiell.
- Ein Verbesserungspotential der Regelung besteht darin, eine schnellere Reaktion anzustreben. Dafür ist einerseits ein höher entwickeltes Regelverfahren notwendig, andererseits müsste auch eine genügende Leistungsreserve der Lüftungsanlage, welche über die Auslegung für den stationären Zustand hinausgeht, bereitgestellt werden.

## Résumé

Dans le présent projet de recherche OFROU 2007/002 « Influence de l'écoulement d'air dans les tunnels routiers en cas d'incendie », diverses méthodes ont été étudiées afin de contrôler l'écoulement longitudinal dans un tunnel routier. Il s'agit notamment, en plus de la solution largement utilisée aujourd'hui en Suisse comportant des ventilateurs de jet, l'utilisation d'une ventilation (semi-) transversale, consistant en l'injection concentrée dans le tunnel (sous la forme d'un injecteur Saccardo) et d'une extraction d'air au portail et de rideaux d'air et mécaniques.

Les différentes méthodes sont décrites de manière qualitative et comparées les unes aux autres, avec une représentation des principes physiques, la description mathématique et avec des exemples de la pratique.

Une comparaison qualitative a été faite en ce qui concerne:

- l'impact et l'efficacité
- la faisabilité (pour les tunnels nouveaux et existants)
- les dépenses de construction (usines de ventilation, gaines, niches, etc.)
- les dépenses en équipements (appareils de ventilation, alimentation électrique, instrumentation, contrôle-commande)
- les coûts (investissement, exploitation et entretien)
- la fiabilité
- le retour d'expérience en exploitation pratique

Les ventilateurs de jet et les injecteurs Saccardo ont été identifiés comme méthode la plus appropriée. Du fait qu'il existe d'importantes études théoriques et des expériences de la pratique sur les ventilateurs de jet, l'utilisation d'injecteurs Saccardo, du moins en Suisse, a été mise de côté.

Par conséquent, l'un des objectifs principal de ce projet de recherche a été placé sur l'étude de l'injecteur Saccardo. Des simulations en 2D et 3D ont permis d'étudier l'influence des effets d'écoulements locaux. De cette façon, des facteurs de correction ont été déterminés afin de permettre des calculs (connus) de conception unidimensionnelle.

Des mesures dans un tunnel routier existant ont été effectuées avec un modèle d'injecteur Saccardo. Les simulations ont été largement confirmées ainsi que des connaissances pratiques pour une éventuelle mise en œuvre dans des projets de reconstruction on pu être gagné.

En ce qui concerne les méthodes pour influencer l'écoulement longitudinal, les résultats clés suivants ont été obtenus

- Des principes avec une impulsion spécifique dans le sens de l'axe longitudinal du tunnel, les ventilateurs de jet et les injecteurs Saccardo, sont le plus appropriés pour influencer l'écoulement d'air dans les tunnels routiers en cas d'incendie.
- Les ventilateurs de jet sont maintenant établis comme l'état de l'art et possède, dans la plupart des cas, les avantages en termes d'efficience et de coûts d'investissement.
- Les injecteurs Saccardo peuvent être avantageux dans certains cas spéciaux, en particulier dans les projets de reconstruction, s'il n'y a pas de place disponible pour les ventilateurs de jet et lorsque les centrales de ventilation avec des ventilateurs d'air frais existants peuvent être utilisées.
- Les injecteurs Saccardo ont un avantage quant à la corrosion et à la résistance au feu, ainsi que par rapport à l'accès pour l'entretien et les réparations.
- Pour le dimensionnement des ventilateurs de jet et pour les injecteurs Saccardo, le procédé connu 1-D est approprié. Les effets locaux sont pris en compte ici par les coefficients de réaction d'impulsion  $k_{MX}$ . Il s'agit d'une mesure de l'efficacité de la poussée du jet d'air sur l'écoulement en tunnel. Dans la directive OFROU [1], l'efficacité de la poussée du jet d'air pour les ventilateurs de jet est dénotée comme facteur de montage.
- L'efficacité de la poussée du jet d'air dépend à la fois pour les ventilateurs de jet et pour les injecteurs Saccardo de la géométrie et en particulier de l'état de l'écoulement d'air. Les situations suivantes sont à distinguer:
  - o Décélération d'un écoulement avec une impulsion contraire à la direction d'écoulement
  - o Entraînement d'un écoulement avec une impulsion dans le sens d'écoulement, avec une inversion du flux, à savoir débit dans les deux directions
  - o Entraînement d'un écoulement avec une impulsion dans le sens d'écoulement sans-retour ; à savoir dans un sens (dans la plupart des cas, il s'agit du cas de dimensionnement)
  - o Dans ce cas, la commutation dynamique entre les différentes conditions d'écoulement doit être pris en considération.
- La détermination détaillée des coefficients de réaction d'impulsion sont des simulation et / ou des mesures nécessaires. Typiquement pour des arrangements géométriques standards, en particulier pour les ventilateurs de jet, les valeurs connues sont en général utilisées.
- Pour les tunnels à proportion élevée de camions et à fort risque de congestion, une réduction supplémentaire du coefficient de réaction d'impulsion est à prendre en considération de par les véhicules bloquant le courant d'air.
- Les méthodes pour influencer l'écoulement d'air avec une impulsion spécifique dans le sens de l'axe longitudinal du tunnel doivent prévoir une régulation pour des tunnels unidirectionnels avec congestions et à circulation bidirectionnelle.
- Un contrôle du courant d'air sans la nécessité d'une régulation est possible au moyen d'insufflation et d'extraction d'air avec de grande quantité d'air dans plusieurs sections. Ceci est possible pour quelques longs tunnels équipés d'une ventilation transversale. Pour les nouveaux tunnels ou plus courts, cela conduirait à des investissements inutilement élevés et n'est donc pas économique.

En ce qui concerne la régulation, ce qui suit pourrait être déterminé

- La régulation du débit longitudinal avec les contrôleurs PID est l'état de l'art. Toutefois, en pratique il y a souvent des lacunes dans la mise en œuvre en raison du manque de normes de qualité et d'inspection.
- Pour la régulation, la mise à disposition avec une fiabilité absolue de la mesure précise du flux d'air dans l'espace trafic est indispensable.
- Un potentiel d'amélioration est la rapidité de la régulation. Pour ce faire, des méthodes de contrôle plus sophistiquées sont nécessaires, d'autre part, une réserve de puissance suffisante du système de ventilation, allant au-delà du dimensionnement de l'état stationnaire, doit être prévue.

## Summary

In course of the present research project ASTRA 2007/002 titled "Influencing the longitudinal airflow in road tunnels in case of fire", several ventilation principles are examined for the purpose of controlling the longitudinal air flow in a road tunnel. In addition to jet fans, which are commonly used in Switzerland, the application of following is examined: semi-transverse/transverse ventilation, point injection (in particular as Saccardo nozzles), air extraction from the tunnel, air curtains and mechanical curtains.

The different methods are qualitatively described and compared with each other. This is conducted by representing the physical principals, mathematical descriptions and with examples from practise.

A qualitative comparison was made regarding:

- Impact and effectiveness
- Feasibility (for new and existing tunnels)
- Civil costs (ventilation stations, ducts, niches, etc.)
- Costs of electro-mechanical equipment (fans with ducts and dampers, power supplies, instrumentation, control system)
- Cost (investment, operation and maintenance)
- Reliability
- Genuine experience from operation of such systems

As the most suitable method, jet fans and Saccardo nozzles were identified. While for jet fans extensive theoretical studies and experience is available, in recent years there has been little application of Saccardo nozzles at least in Switzerland.

Therefore, a focus of this research project was on the study of Saccardo nozzles. 2D and 3D simulations investigated the influence of local flow effect. Consequently, correction factors for the (known) one-dimensional design calculation were established.

In an existing road tunnel, measurements with a Saccardo-nozzle model were performed. Thus, the simulations were by and large confirmed. Moreover, practical know-how for possible implementations in refurbishment projects was acquired.

In relation to methods influencing the longitudinal flow, following key findings were obtained:

- The most appropriate methods to influence the longitudinal flow in case of fire are based on inducing impulse in direction of the tunnel axis e.g. using jet fans or Saccardo nozzles.
- Jet fans are now considered to be the state of art and are in most cases favoured in terms of efficiency and investment costs.
- Saccardo nozzles may be advantageous in special cases, in particular in refurbishment projects, if there is no space for jet fans or if existing fans building with fresh-air supply fans are at disposition.
- Compared to jet fans, Saccardo nozzles have benefits in terms of corrosion and heat resistance, as well as with respect to access for maintenance and repair works.
- For the design of jet fans and Saccardo nozzles, well known 1D-methods are appropriate. Local effects are taken into account by the impulse coefficient  $k_{MX}$ . This is a measure of the efficiency of the transfer of the thrust of the injected air to the flow in the tunnel. In the ASTRA/FEDRO guideline [1], the impulse coefficient for jet fans is called the installation efficiency.
- Both for jet fans and for Saccardo nozzles, the impulse coefficient depends on the geometry and in particular on the flow condition. Following situations are distinguished:
  - o Reduce flow speed with impulse opposing the direction of flow in the tunnel
  - o Increase flow speed in the tunnel employing impulse in same direction as the tunnel flow but having reverse flow and hence flow in both directions in the tunnel
  - o Increase flow speed with impulse in flow directions and only having flow in one direction (in most cases, this is the target of the dimensioning).
  - o In any case, also variations in flow conditions have to be considered.
- For the detailed determination of the impulse coefficient, simulations and/or measurements are required. Generally in case of standardized geometrical arrangements and in particular for jet fans, established values are used.
- For tunnels with a high proportion of heavy-goods vehicles and in case of traffic congestion, further reductions of the impulse caused by the vehicles that inhibit the jet, have to be considered.
- Methods for the influencing of the air flow with directed impulse in direction of the tunnel axis have to be regulated in case of bi-directional traffic and at traffic congestion.
- A regulation of the flow is not required when having several ventilation sections with distributed flow injection (transverse to the flow direction) and extraction. This is the situation for some long road tunnels with transverse ventilation. However, for new or shorter tunnels this would lead to unnecessary high investment costs and are therefore not economical solutions.

In terms of control engineering, the following could be determined:

- The regulation of longitudinal flow by PID controllers is state of the art. However, in practise there are often defects in the implementation due to lack of specifications of the quality and inspection plans.
- It is essential to have accurate and reliable flow measurements in order to regulate the longitudinal air flow.
- Rapidly to arrive at the target flow velocity is scope for improvement of the control engineering. On one hand, this requires higher developed control algorithms. On the other hand, adequately spare ventilation capacity, which exceeds the requirement for the stationary situation, has to be at disposition.



4.3.1	Versuchsaufbau.....	45
4.3.2	Vergleich verteilte Zuluft zu Punkt-Zuluft.....	46
4.3.3	Messungen mit der Saccardo-Düse .....	48
4.4	Auswertung.....	51
<b>5</b>	<b>Simulationsrechnungen.....</b>	<b>54</b>
5.1	1D-Simulationen .....	54
5.1.1	Allgemeine Parametervariation.....	54
5.1.2	Lage der Einblasstelle .....	54
5.1.3	Antrieb bei durchgehender Längslüftung.....	54
5.1.4	Abbremsen bei durchgehender Längslüftung.....	56
5.1.5	Lage der Einblasstelle in Kombination mit Absaugung .....	57
5.2	CFD-Simulationen .....	58
5.2.1	Grundlagen.....	58
5.2.2	2D-Simulationen .....	59
5.2.3	3D-Simulationen .....	59
<b>6</b>	<b>Vergleich der Verfahren .....</b>	<b>61</b>
6.1	Übersicht .....	61
6.2	Vergleich von Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen .....	62
6.2.1	Anwendung.....	62
6.2.2	Instationäres Verhalten.....	64
6.2.3	Druckaufbau .....	66
<b>7</b>	<b>Regelung.....</b>	<b>68</b>
7.1	Problemstellung.....	68
7.2	Anwendung.....	68
7.2.1	Leit- und Stellwert.....	68
7.2.2	Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen .....	68
7.2.3	Einsatz von stufenlosen Reglern .....	69
7.2.4	Gütekriterien .....	70
<b>8</b>	<b>Planungsempfehlung.....</b>	<b>72</b>
8.1	Querlüftungsanlagen .....	72
8.2	Strahlventilatoren.....	72
8.3	Zuluft einblasung mit Impuls / Saccardo-Düsen .....	73
8.4	Regelung der Längsströmung im Brandfall .....	74
<b>9</b>	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>75</b>
<b>10</b>	<b>Projektabschluss.....</b>	<b>79</b>
<b>11</b>	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen .....</b>	<b>82</b>
<b>12</b>	<b>Anhang - 1D-Berechnungen Saccardo-Düse .....</b>	<b>88</b>
<b>13</b>	<b>Anhang - 2D-Berechnungen .....</b>	<b>97</b>
13.1	Analyse des Saccardo Systems und Vergleich mit 1D Berechnungen .....	97
13.1.1	CFD-Geometrie .....	97

13.1.2	CFD-Gitter .....	98
13.1.3	Modellierungsgrundlagen .....	98
13.1.4	Randbedingungen .....	99
13.1.5	Rechenfälle.....	100
13.1.6	Ergebnisse, Auswertung.....	101
13.1.7	Vergleich mit 1D Berechnungen .....	104
13.1.8	Folgerungen .....	107
13.2	Vergleich der Impulsumsetzungskoeffizienten zwischen Saccardo Systemen und Strahlventilatoren.....	108
13.2.1	CFD-Geometrie des Saccardo Systems.....	108
13.2.2	CFD-Geometrie des Systems mit Strahlventilator .....	109
13.2.3	CFD-Gitter .....	109
13.2.4	Modellierungsgrundlagen für das Saccardo System und das System mit Strahlventilator.....	110
13.2.5	Randbedingungen des Saccardo Systems .....	111
13.2.6	Randbedingungen des Systems mit Strahlventilator .....	112
13.2.7	Rechenfälle.....	112
13.2.8	Ergebnisse, Auswertung.....	113
13.2.9	Bilder der Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems und des Systems mit Strahlventilator.....	117
13.2.10	Folgerungen .....	122
13.3	Instationäres Verhaltens des Saccardo Systems .....	123
13.3.1	CFD-Geometrie .....	123
13.3.2	CFD-Gitter .....	123
13.3.3	Modellierungsgrundlagen .....	123
13.3.4	Randbedingungen .....	124
13.3.5	Rechenfälle.....	125
13.3.6	Ergebnisse, Auswertung.....	125
<b>14</b>	<b>Anhang - 3D-Berechnungen Saccardo-Düse .....</b>	<b>132</b>
14.1	Antrieb der Längsströmung .....	132
14.2	Abbremsen .....	136
14.3	Blockieren.....	138
14.4	Umluftsystem (äquivalent zu Strahlventilator zu Vergleichszwecken).....	140
<b>15</b>	<b>Anhang - Messdaten Crapteig Tunnel .....</b>	<b>142</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Messdaten Saccardo-Düse Gotthard Bahntunnel.....	38
Tabelle 6.1	Grober Vergleich aller Verfahren zur Beeinflussung der Längsströmung .....	61
Tabelle 6.2	Vergleich der Auslegung der Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen.....	63
Tabelle 10.1	Geometrie und Parameter für die 1D Berechnungen.....	88
Tabelle 11.1:	Geometrische Daten des 2D CFD-Modells für die Analyse des Saccardo Systems .....	98
Tabelle 11.2:	Festlegung der Randbedingungen für die Analyse des Saccardo Systems.....	99
Tabelle 11.3:	Zusammenstellung der Rechenfälle für die Analyse des Saccardo Systems.....	100
Tabelle 11.4:	Vergleich zwischen 2D und 1D Berechnungen.....	106
Tabelle 11.5:	Geometrische Daten des 2D CFD-Modells für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems .....	108
Tabelle 11.6:	Geometrische Daten des 2D CFD-Modells für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator .....	109
Tabelle 11.7:	Festlegung der Randbedingungen für die Bestimmung des	

	Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems .....	111
Tabelle 11.8:	Festlegung der Randbedingungen für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator .....	112
Tabelle 11.9:	Zusammenstellung der Rechenfälle für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems .....	113
Tabelle 11.10:	Zusammenstellung der Rechenfälle für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator .....	113
Tabelle 11.11:	Impulsumsetzungskoeffizienten $k_{MX}$ des Saccardo Systems und des Systems mit Strahlventilatoren (SV) .....	121
Tabelle 11.12:	Festlegung der Randbedingungen für die stationäre Simulation .....	124
Tabelle 11.13:	Festlegung der Randbedingungen für die instationäre Simulation .....	124
Tabelle 11.14:	Definition der zeitlichen Abläufe für die Untersuchung des instationären Verhaltens des Saccardo Systems .....	125
Tabelle 11.15:	Zusammenstellung der Rechenfälle für Untersuchung des instationären Verhaltens des Saccardo Systems .....	125
Tabelle 11.16:	Beschreibung der instationären Strömungszustände mit dem Saccardo System	126

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Längslüftung, Antrieb der Luftströmung .....	14
Abbildung 1.2	Längslüftung, Bremsen der Luftströmung .....	15
Abbildung 1.3	Absaugung, Antrieb der Luftströmung.....	15
Abbildung 1.4	Absaugung, Bremsen der Luftströmung.....	15
Abbildung 2.1	Strahlventilator in einer Röhre, Definitionen, nach [8]. .....	17
Abbildung 2.2	Vereinfachung frei fahrender Propeller, Definitionen nach [8]. .....	18
Abbildung 2.3	Strömungszustände bei Einblasung in den Fahrraum .....	19
Abbildung 2.4	Typische Strömungsbilder einer Einblasung 45°, aus [ 7].....	20
Abbildung 2.5	Einblasung, Definitionen, nach [8]. .....	21
Abbildung 2.6	Verlustbeiwerte bei Einblasung, Theorie und Experiment, nach [9]. .....	22
Abbildung 2.7	Injektorstrahl: Prinzip des Bunsenbrenners.....	23
Abbildung 2.8	Einblasung, Definitionen, nach [8]. .....	23
Abbildung 2.9	Druckgewinn bzw. Verlustbeiwert – Theorie und Experiment, $\theta = 15^\circ$ .....	24
Abbildung 2.10	Prinzip nicht rezirkulierender und rezirkulierender Luftschleier .....	25
Abbildung 2.11	Geometrie des Luftvorhangs, nach [12] .....	26
Abbildung 2.12:	Beispiel zur Definition des Impulsumsetzungskoeffizienten.....	28
Abbildung 2.13	Absaugung, Definitionen, nach [8]......	29
Abbildung 2.14	Energieverlustbeiwert im Tunnel bei Absaugung, $\theta = 45^\circ$ bis $90^\circ$ , aus [8]. .....	30
Abbildung 2.15	Typische Strömungsbilder einer Absaugung 45°, aus [ 7 ] .....	30
Abbildung 2.16	Einsatz von Vorhängen zur Kontrolle der Längsströmung im Brandfall.....	31
Abbildung 2.17	Aerodynamische Charakteristik eines Vorhangs im Strassentunnel, nach [22] .....	32
Abbildung 2.18	Luftgeschwindigkeiten – links: unteres Portal, rechts oberes Portal.....	33
Abbildung 3.1	Brandlüftung flüssiger Richtungsverkehr mit Zu- und Abluft (Bsp. Elbtunnel) .....	34
Abbildung 3.2	Benötigte Anzahl SV in Abhängigkeit der Absaugmenge (Bsp. Flüeler Tunnel) ....	35
Abbildung 3.3	Strahlventilatoren mit Umlenkgeräten.....	35
Abbildung 3.4	Strahlventilatoren mit schräggestellten Schalldämpfern (,Banana Jets') .....	36
Abbildung 3.5	Strömungsprofile mit konventionellen Strahlventilatoren und mit ,Banana Jets' .....	36
Abbildung 3.6	Deckenschlitze für verteilte Zuluft / Abluft .....	37
Abbildung 3.7	Saccardo-Düse für den Gotthard Bahntunnel in Göschenen.....	38
Abbildung 3.8	Überhöhter Längsschnitt des Tunnels Rendsburg.....	39
Abbildung 3.9	Düsen-Anordnung im Holmesdale Tunnel, [14] .....	40
Abbildung 3.10	Strömungsbild (in m/s) bei Frischluftimpuls-Klappe, 30° Einblaswinkel.....	40
Abbildung 3.11	Strömungsbild (in m/s) bei Frischluftimpuls-Klappe, 140° Einblaswinkel.....	41
Abbildung 3.12	Vorhang im Tunnel .....	42
Abbildung 4.1	Geöffnete Abluftklappe vom Kanal aus gesehen .....	44
Abbildung 4.2	Abluftklappe Längsschnitt.....	44
Abbildung 4.3	Schema Crapteig Tunnel.....	45

Abbildung 4.4 Mobiler Strahlventilator des Tiefbauamts Graubünden .....46

Abbildung 4.5 Abbremsen einer Längsströmung mit verteilter Zuluft ohne Längsimpuls .....46

Abbildung 4.6 Abbremsen einer Längsströmung mit verteilter Zuluft mit Längsimpuls .....47

Abbildung 4.7 Abbremsen einer Längsströmung mit Punkt-Zuluft aus der Klappenöffnung .....47

Abbildung 4.8 Messungen mit verteilter und Punkt-Zuluft am 27.04.2009.....47

Abbildung 4.9 Seitenansicht der Saccardo-Düse aus Holz.....48

Abbildung 4.10 Saccardo-Düse im Fahrraum-Querschnitt.....48

Abbildung 4.11 Abbremsen einer Längsströmung mit Saccardo-Düse .....49

Abbildung 4.12 Messungen mit der Saccardo-Düse am 01.05.2009.....49

Abbildung 4.13 Antreiben einer Längsströmung mit Saccardo-Düse .....49

Abbildung 4.14 Messungen mit der Saccardo-Düse am 20.05.2009.....50

Abbildung 4.15 Strömungsbild Saccardo-Düse mit Rauchblasung.....50

Abbildung 4.16 Messung und Nachrechnung 01.05.2009 Saccardo-Düse u:  
 Luftströmungsgeschwindigkeit [m/s] T: Lufttemperatur [°C].....51

Abbildung 4.17 Messung und Nachrechnung 20.05.2009 Saccardo-Düse u:  
 Luftströmungsgeschwindigkeit [m/s] T: Lufttemperatur [°C] \_PortS: vor dem  
 Südportal \_T: im Tunnelinnern .....52

Abbildung 4.18 Messung und Nachrechnung 20.05.2009, Abbremsen und Umkehren Saccardo-  
 Düse (Legende siehe Abbildung 4.17) .....52

Abbildung 4.19 Abbremsen und Umkehren, Vergleich der Messungen Sacc: Saccardo-Düse  
 PktZL: Punkteinblasung Zuluft vertZL: Verteilte Einblasung Zuluft.....53

Abbildung 5.1 Einfluss der Lage der Einblasstelle .....54

Abbildung 5.2 Tunnelschema Längslüftung mit Lage der Einblasstelle .....54

Abbildung 5.3 Antreiben einer Längsströmung in Abhängigkeit der Einblasstelle.....55

Abbildung 5.4 Schub der Saccardo-Düse in Abhängigkeit der Einblasstelle .....55

Abbildung 5.5 Abbremsen/Strömungsblockade in Abhängigkeit der Einblasstelle, mit  
 Gegendruck .....56

Abbildung 5.6 Tunnelschema mit Einblasstelle links der Absaugung .....57

Abbildung 5.7 Tunnelschema mit Einblasstelle rechts der Absaugung .....57

Abbildung 5.8 Absaugung in Tunnelmitte mit Antrieb durch Zuluft, ohne Gegendruck .....57

Abbildung 6.1 Instationäres Verhalten nach dem Einschalten, 1 km Tunnel .....64

Abbildung 6.2 Instationäres Verhalten nach dem Einschalten, 3 km Tunnel .....64

Abbildung 6.3 Instationäres Verhalten nach dem Einschalten, 10 km Tunnel .....65

Abbildung 6.4 Druckverlauf, 1 km Tunnel.....66

Abbildung 6.5 Druckverlauf, 3 km Tunnel.....66

Abbildung 6.6 Druckverlauf, 10 km Tunnel.....67

Abbildung 7.1 Vergleich zwischen Regelung und Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen ...69

Abbildung 7.2 Erreichen des Sollwerts der Luftströmungsgeschwindigkeit.....70

Abbildung 7.3 Ausregeln einer Störung.....71

Abbildung 10.1 Tunnelschema mit Parametern der 1D-Berechnungen.....88

Abbildung 10.2  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 4.5$  m<sup>2</sup> .....90

Abbildung 10.3  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> .....90

Abbildung 10.4  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 2.25$  m<sup>2</sup> .....91

Abbildung 10.5  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 9.0$  m<sup>2</sup> .....91

Abbildung 10.6  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 13.5$  m<sup>2</sup> .....92

Abbildung 10.7  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup> .....92

Abbildung 10.8  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 1.0$  km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup> .....93

Abbildung 10.9  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 2.5$  km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup> .....93

Abbildung 10.10  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 5.0$  km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup> .....94

Abbildung 10.11  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 10.0$  km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup> .....94

Abbildung 10.12  $\varphi = 10^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup> .....95

Abbildung 10.13  $\varphi = 20^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup> .....95

Abbildung 10.14  $\varphi = 30^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup> .....96

Abbildung 11.1: Geometrie des CFD-Modells mit den relevanten Angaben für die Analyse des  
 Saccardo Systems.....97

Abbildung 11.2: Festlegung der Randbedingungen für die Analyse des Saccardo Systems.....99

Abbildung 11.3: Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) bei unterschiedlichen Einblasungswinkeln 101

Abbildung 11.4: Verteilung des statischen Drucks bei unterschiedlichen Einblasungswinkeln .... 102

Abbildung 11.5: Geschwindigkeitsvektoren im Bereich der Einblasung bei unterschiedlichen  
 Einblasungswinkeln ..... 103

Abbildung 11.6:	Vergleich zwischen 2D und 1D Berechnungen.....	105
Abbildung 11.7:	Alternative Gestaltung der Luftenblasung (zweiseitig) .....	107
Abbildung 11.8:	Geometrie des CFD-Modells mit den relevanten Angaben für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems .....	108
Abbildung 11.9:	Geometrie des CFD-Modells mit den relevanten Angaben für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator.....	109
Abbildung 11.10:	Modellierung eines Strahlventilators mit einer Impulsquelle (schematisch).....	110
Abbildung 11.11:	Festlegung der Randbedingungen für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems .....	111
Abbildung 11.12:	Festlegung der Randbedingungen für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator .....	112
Abbildung 11.13:	Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) im Bereich der Einblasung bei einem konstanten Einblaswinkel von 15°.....	114
Abbildung 11.14:	Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) im Bereich der Einblasung bei einem konstanten Einblaswinkel von 30°.....	114
Abbildung 11.15:	Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) im Bereich der Einblasung bei einem konstanten Einblaswinkel von 45°.....	115
Abbildung 11.16:	Geschwindigkeitsvektoren im Bereich des Strahlventilators.....	116
Abbildung 11.17:	Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) und Druckverteilung bei einem konstanten Einblasungswinkel von 15°.....	117
Abbildung 11.18:	Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) und Druckverteilung bei einem konstanten Einblasungswinkel von 30°.....	118
Abbildung 11.19:	Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) und Druckverteilung bei einem konstanten Einblasungswinkel von 45°.....	119
Abbildung 11.20:	Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) und Druckverteilung im System mit Strahlventilator.....	120
Abbildung 11.21:	Impulsumsetzungskoeffizient in Abhängigkeit des Einblaswinkels für verschiedene Strömungszustände (Saccardo System) .....	121
Abbildung 11.22:	Geometrie des CFD-Modells mit den relevanten Angaben für die Analyse des instationären Verhaltens des Saccardo Systems.....	123
Abbildung 11.23:	Festlegung der Randbedingungen für die stationäre und instationäre Simulation	124
Abbildung 11.24:	Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeit an den Portalen und an der Einblasstelle für die instationäre Simulation des Saccardo Systems	127
Abbildung 11.25:	Verteilung des statischen Drucks in unterschiedlichen Zeitpunkten der instationären Simulation des Saccardo Systems .....	128
Abbildung 11.26:	Geschwindigkeitsvektoren in unterschiedlichen Zeitpunkten der instationären Simulation des Saccardo Systems .....	129
Abbildung 11.27:	Impulsumsetzungskoeffizient in Abhängigkeit der Zeit für die instationäre Simulation des Saccardo Systems .....	130
Abbildung 12.1	Beschleunigen, Luftgeschwindigkeiten Vertikalschnitt, Tunnelmitte.....	132
Abbildung 12.2	Beschleunigen, Luftgeschwindigkeiten Horizontalschnitt, H = 1.5 m.....	133
Abbildung 12.3	Beschleunigen, Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung Horizontalschnitt, H = 1.5 m.....	134
Abbildung 12.4	Beschleunigen, Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung Vertikalschnitt, Tunnelmitte .....	135
Abbildung 12.5	Abbremsen max. Schub, Luftgeschwindigkeiten Vertikal- und Horizontalschnitt	136
Abbildung 12.6	Abbremsen max. Schub, Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung.....	137
Abbildung 12.7	Blockieren max. Schub, Luftgeschwindigkeiten Vertikal- und Horizontalschnitt..	138
Abbildung 12.8	Blockieren max. Schub, Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung .....	139
Abbildung 12.9	Umluftsystem, Luftgeschwindigkeiten Vertikal- und Horizontalschnitt.....	140
Abbildung 12.10	Umluftsystem, Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung .....	141
Abbildung 13.1	Natürliche Strömung → N, 0:33 h.....	142
Abbildung 13.2	Beschleunigung der Strömung mit Saccardo-Düse → N, 0:45 h .....	142
Abbildung 13.3	Strömung mit mobilem Strahlventilator → S, 1:20 h.....	143
Abbildung 13.4	Abbremsen und Umkehren der Strömung mit Saccardo-Düse → N, 1:35 h.....	143

# 1 Ausgangslage

## 1.1 Anforderungen an die Kontrolle der Längsströmung

Die Brandlüftung in Strassentunneln soll gemäss ASTRA-Richtlinie 13 001 'Lüftung der Strassentunnel' [1] in einer ersten Phase die Selbstrettung der Tunnelbenützer und in einer zweiten Phase die Einsatzkräfte unterstützen. In beiden Phasen ist die Rauchausbreitung zu kontrollieren. Der wichtigste Aspekt der Brandlüftung ist deshalb die Beeinflussung der Längsströmung im Tunnel, mit welcher sich der Rauch ausbreitet. In der Richtlinie [1] sind Vorgaben für die Dimensionierung der Brandlüftung und insbesondere von Strahlventilatoren für die Kontrolle der Längsströmung festgehalten.

Die Luftströmung im Tunnel wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- Geometrie
- Betrieb der Lüftungsanlage
- Verkehr
- Barometrische Druckunterschiede zwischen den Portalen
- Winddruck auf die Portale
- Auf-/Abtrieb aufgrund von Temperaturunterschieden Tunnel innen – aussen
- Im Brandfall: Auftrieb durch die Brandwärme
- Betrieb von weiteren Anlagen im Tunnel (insbesondere Sprinkler o.ä.)
- Trägheit der Luft

Grundsätzlich muss das System zur Kontrolle der Längsströmung die aufgelisteten äusseren Kräfte sowie geometrische Asymmetrie so ausgleichen, dass sich an einem gewünschten Ort ein gewünschter Strömungszustand einstellt. Die Beeinflussung der Längsströmung sollte effizient, sicher und einfach ansteuerbar sein.

Die Entrauchung in Fahrtrichtung bei **Richtungsverkehrstunneln mit geringer Stauhäufigkeit** ist diesbezüglich die einfachste und beste Lösung, wenn sichergestellt werden kann, dass alle Tunnelbenützer mit ihren Fahrzeugen stromabwärts vom Brandort aus dem Tunnel herausfahren können. Die Luftströmung im Tunnel muss **angetrieben** werden. Eine Regelung ist in diesem Fall nicht erforderlich, zumindest nicht in der Schweiz gemäss ASTRA-Richtlinie [1].

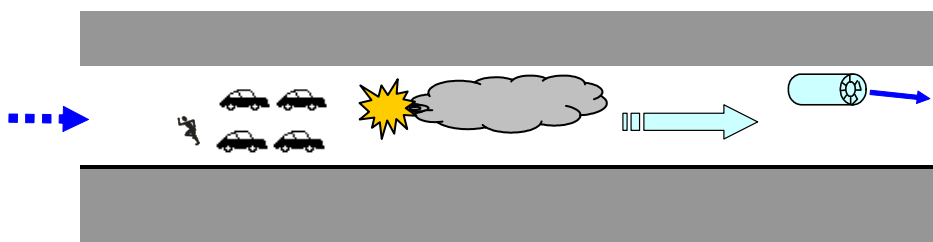


Abbildung 1.1 Längslüftung, Antrieb der Luftströmung

Bei **Stau oder Gegenverkehr** ist die Rauchausbreitung wesentlich problematischer. Bei Längslüftung muss eine Umkehrung der Strömung vermieden werden, die Luftströmungsgeschwindigkeit sollte so stabilisiert werden, dass eine mögliche Rauchsichtung erhalten bleibt. Dazu wird eine kontrollierte Rauchausbreitung in einer Richtung angestrebt. Die Rauchausbreitungsgeschwindigkeit sollte unter der Fluchtgeschwindigkeit der Personen begrenzt werden. Die Luftströmung im Tunnel muss dann in der Regel **abgebremst** werden.



Abbildung 1.2 Längslüftung, Bremsen der Luftströmung

Bei Absaugung sollte der Rauch in Nähe des Brandes aus dem Fahrraum entfernt werden, dann wird eine möglichst symmetrische Zustromung von beiden Seiten zum Absaugort angestrebt. Je nach Position der Einrichtung zur Beeinflussung der Längsströmung (z. Bsp. Strahlventilatoren), Position der Absaugstelle und äusseren Kräften (Wind, Auftrieb, barometrische Drücke, etc.) muss die Luftströmung im Tunnel auf einer Seite der Absaugung **angetrieben** oder **abgebremst** werden. Dadurch wird auch die Luftströmung auf der anderen Seite der Absaugung entsprechend beeinflusst.

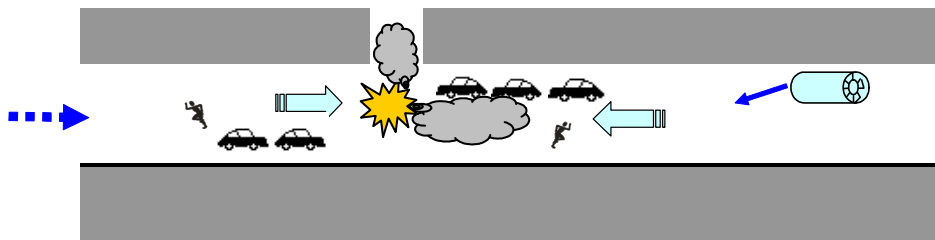


Abbildung 1.3 Absaugung, Antrieb der Luftströmung

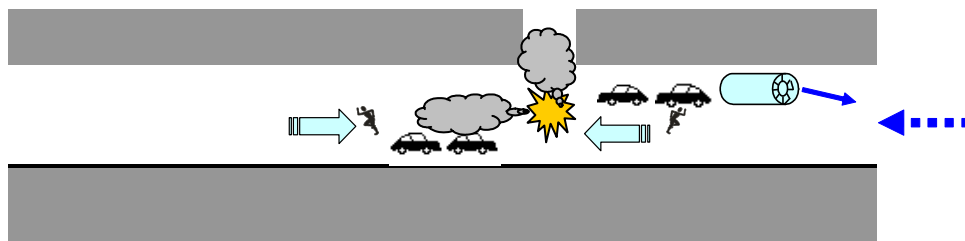


Abbildung 1.4 Absaugung, Bremsen der Luftströmung

In beiden Fällen, mit oder ohne Absaugung, muss die Längsströmung anhand der Luftströmungsmessung geregelt werden. Die Regelung der Längsströmung ist mit einem erheblichen mess- und regelungstechnischen Aufwand verbunden. Sie hängt von der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Luftströmungsmessung ab. Die Verwendung von falschen Messwerten kann katastrophale Folgen haben.

## 1.2 Einsatz von Strahlventilatoren

In den meisten Tunneln mit einer mechanischen Lüftung wird die Längsströmung durch Strahlventilatoren kontrolliert. Damit bestehen umfangreichere Erfahrungen. Auslegung und Einsatz von Strahlventilatoren sind heute weitgehend standardisiert. Die einfachen Rechenmodelle für Standardfälle der Strahlventilatorauslegung haben sich in der Praxis bewährt.

Diesen Modellen sind aber Grenzen gesetzt. Bei instationären Vorgängen sowie unter besonderen geometrischen Verhältnissen ist das Verhalten von Strahlventilatoren nicht einfach modellierbar. Bei Strahlverlusten durch Hindernisse oder mit dem Einsatz von Strahlumlenkungen können sich grosse Diskrepanzen zwischen Messresultaten in der Praxis und theoretischen Rechenmodellen ergeben.

In neuen Tunneln, insbesondere bei Längslüftung ohne Absaugung, können Strahlventilatoren ohne baulichen Aufwand installiert werden. Gegenüber anderen Lüftungssystemen, welche Lüftungszentralen und / oder Luftkanäle erfordern, ergeben sich dadurch die geringsten Investitionskosten.

Der Einsatz von Strahlventilatoren hat aber auch Nachteile. Da sich Strahlventilatoren im Fahrraum befinden, sind sie der korrosiven Tunnelatmosphäre ausgesetzt, was ihre Lebensdauer reduziert. Für Unterhalts- und Reparaturarbeiten an Strahlventilatoren sind immer Röhren- oder zumindest Spersperrungen nötig.

In Tagbautunneln kann die Tunnelhöhe reduziert werden, wenn auf Strahlventilatoren verzichtet wird. Bei vielen bestehenden Tunneln, welche auf den neuen Sicherheitsstandard (z. Bsp. gemäss Richtlinie [1]) gebracht werden sollten, können Strahlventilatoren aus Platzgründen kaum untergebracht werden, oder würden kostspielige bauliche Anpassungen für den Ausbruch von Nischen erfordern.

## 1.3 Ziele des Forschungsprojekts

Wegen den erwähnten Vorbehalte bezüglich Strahlventilatoren sind alternative Verfahren zu untersuchen, um die Längsströmung zu kontrollieren, wie zum Beispiel die Verwendung von bestehenden (Halb-)Querlüftungsanlagen, konzentrierte Einblasung in den Tunnel, insbesondere in Form von Saccardo-Düsen, Absaugung aus dem Tunnel, Luftvorhänge und anderen Möglichkeiten.

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen die verschiedenen Möglichkeiten der Beeinflussung der Längsströmung miteinander verglichen werden. Die verschiedenen Prinzipien werden qualitativ beschrieben und einander gegenübergestellt. Ein Schwerpunkt wird auf Untersuchungen zu konzentrierter Einblasung in den Tunnel in Form von Saccardo-Düsen gesetzt.

Praktisches Ziel dieses Projektes ist eine Empfehlung für den Einsatz des je nach Tunnel-typ und Anwendung jeweils am Besten geeigneten Prinzips zur Beeinflussung der Längsströmung abzugeben.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Übersicht der Verfahren

Verfahren für die Beeinflussung der Luftströmung in Tunneln können in zwei Hauptgruppen unterteilt werden:

#### A Mit Impuls in Längsrichtung

- Strahlventilatoren
- Punktuelle Zuluft gerichtet
- Verteilte Zuluft gerichtet

#### B Ohne Impuls in Längsrichtung

- Absaugung
- Zuluft senkrecht / Luft-Vorhang
- Mechanischer Vorhang

### 2.2 Strahlventilatoren

Die Wirkung eines Strahlventilators beruht auf dem direkten Eintrag von Impuls in die Strömung ohne dass sich deren Volumenstrom verändert. Die in die Strömung eingebrachte Kraft stützt sich über die Aufhängung des Ventilators an der Tunneldecke ab.

Die Abbildung 2.1 zeigt die Situation eines in einem Rohr eingebauten Strahlventilators. Der Ventilator „fängt“ die Luft aus einem relativ grossen Querschnitt („Fangquerschnitt“) langsamer Luftgeschwindigkeit  $v_1$  ein und bläst sie über den relativ kleinen Austrittsquerschnitt  $A_2$  mit relativ grosser Luftgeschwindigkeit  $v_2$  aus.

Typische Grössenordnungen sind 30 m/s bis 40 m/s für die Austrittsgeschwindigkeit, 1 m<sup>2</sup> für den Austrittsquerschnitt und etwa 15 m<sup>2</sup> für den Fangquerschnitt eines einzelnen Strahlventilators. Daraus ergibt sich, dass bei einer Anordnung von mehreren Strahlventilatoren in einer Gruppe der Fangquerschnitt die Grössenordnung des Tunnelquerschnitts erreichen kann und so der Strahlventilator die gesamte, im Tunnel strömende Luft erfasst.

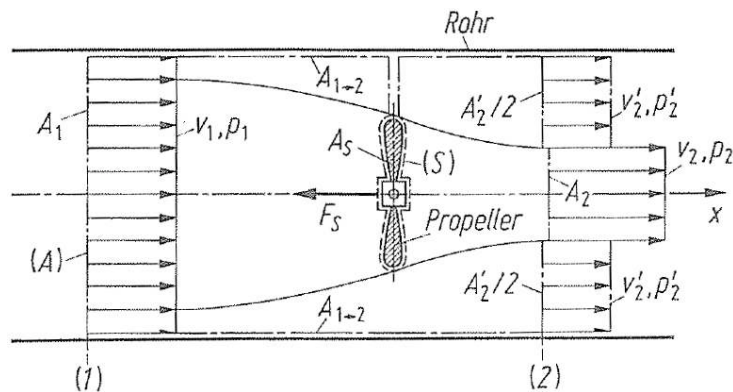


Abbildung 2.1 Strahlventilator in einer Röhre, Definitionen, nach [8].

Die maximal erreichbare Schubkraft des Strahlventilators ergibt sich zu:

$$F_S = \frac{\rho}{2} \frac{A_1 A_2}{(A_1 - A_2)^2} \left[ (2A_1 - 3A_2)v_2^2 - 2(A_1 - 2A_2)v_1 v_2 - A_2 v_1^2 \right] \quad \text{Gleichung 2.1}$$

ohne die Berücksichtigung von Wirkungsgraden und Reibungsverlusten.

Typisches Beispiel:

$$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3, v_1 = 2 \text{ m/s}, v_2 = 30 \text{ m/s}, A_1 = 60 \text{ m}^2, A_2 = 1 \text{ m}^2 \rightarrow F_S = 1017 \text{ N}$$

In der Praxis wird, als Vereinfachung, der ‚frei fahrende Propeller‘ betrachtet, siehe Abbildung 2.2.

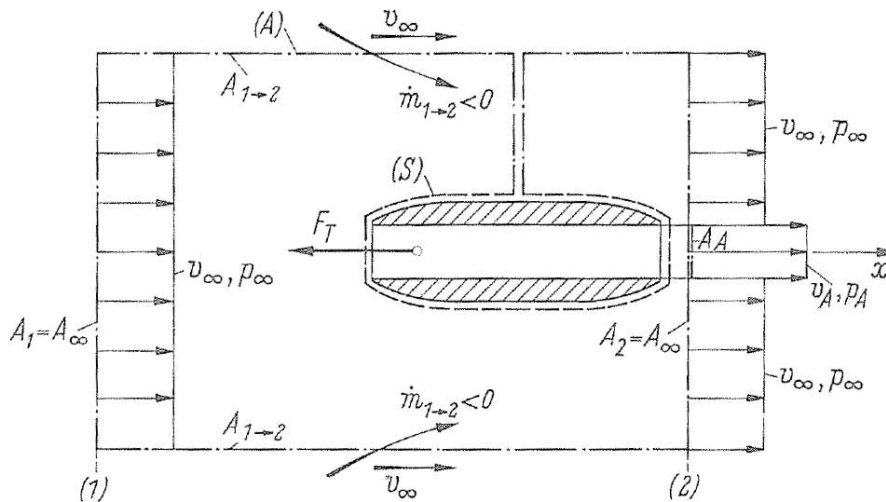


Abbildung 2.2 Vereinfachung frei fahrender Propeller, Definitionen nach [8].

$$F_S = \dot{m}_A (v_A - v_\infty), \text{ bzw. } F_S = \rho A_A v_A (v_A - v_\infty) \quad \text{Gleichung 2.2}$$

Der hierdurch entstandene Fehler liegt typisch in der Größenordnung von 2 bis 3 % wobei das Ergebnis der Näherungslösung etwas unter dem genauen Ergebnis liegt, was im Fall einer Planung eine konservative Auslegung der Anlage bedeutet.

Das typische Strömungsbild des Strahlventilators entspricht der Darstellung aus Abbildung 2.1. Bei ungünstiger Dimensionierung und während des Anfahrens können sich andere Strömungsbilder einstellen, insbesondere dann, wenn die Grundströmung sich entgegen der Blasrichtung des Strahlventilators bewegt. Nahe Wänden, Decken oder Fahrzeuge können darüber hinaus den Austrittsstrahl ungünstig beeinflussen. Durch Reibung der Luft an diesen Elementen sowie innerhalb freier Scherschichten zwischen dem Freistrah und der umgebenden, langsameren Strömung ergeben sich Verluste, die sich im Wirkungsgrad niederschlagen. Üblicherweise wird dies durch einen Einbauwirkungsgrad  $\eta_E$  (verursacht durch die Reibung des Freistrahls an Decken, Wänden etc.) und Schubwirkungsgrad  $\eta_{Schub}$  (sonstige, z.B. interne Reibungsverluste) berücksichtigt.

Die so reduzierte wirksame Schubkraft eines Strahlventilators auf die Längsströmung ergibt sich dann zu:

$$F_S = \eta_E \cdot \eta_{Schub} \cdot \rho A_A v_A (v_A - v_\infty)$$

oder idealisiert als Totaldruckerhöhung am Einbauort des Strahlventilators:

$$\Delta p_{T,SV} = \frac{\eta_E \cdot \eta_{Schub} \cdot \rho A_A v_A (v_A - v_\infty)}{A_{Tunnel}}$$

## 2.3 Einblasung

### 2.3.1 Allgemeine Betrachtung

Durch die konzentrierte Einblasung von Luft in den Fahrraum können sich die folgenden stationären Hauptströmungszustände im Fahrraum einstellen:

- *Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung*  
 Dieser Strömungszustand beschreibt eine Luftströmung im Tunnel, welche auf beiden Seiten der Einblasstelle die gleiche Längsrichtung wie der eingeblasene Luftstrahl aufweist.
- *Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung*  
 Dieser Strömungszustand beschreibt eine Luftströmung im Tunnel, welche auf einer Seite der Einblasstelle (in Einblasrichtung) die gleiche Längsrichtung wie der eingeblasene Luftstrahl aufweist. Auf der anderen Seite der Einblasstelle herrscht eine Luftströmung entgegen der Längsrichtung des eingeblasenen Luftstrahls.
- *Bremsen der Längsströmung mit Rückströmung*  
 Dieser Strömungszustand beschreibt eine Luftströmung im Tunnel, welche auf beiden Seiten der Einblasstelle entgegen der Längsrichtung des eingeblasenen Luftstrahls ist.

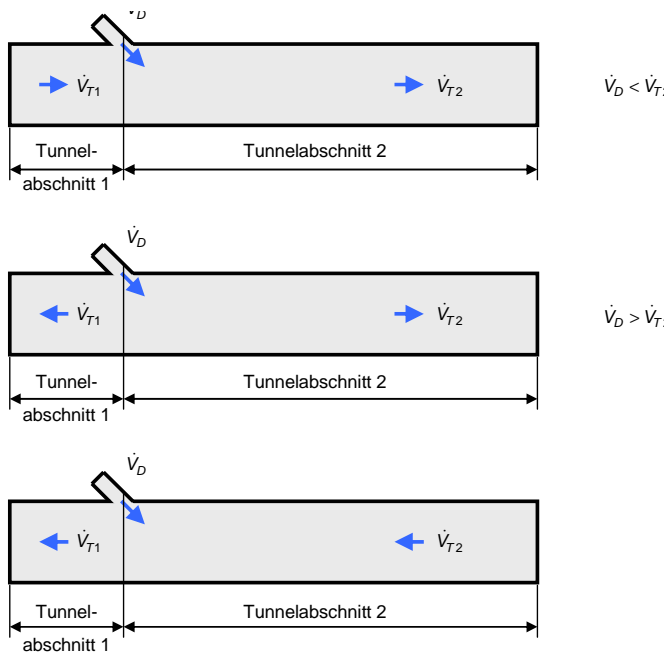


Abbildung 2.3 Strömungszustände bei Einblasung in den Fahrraum

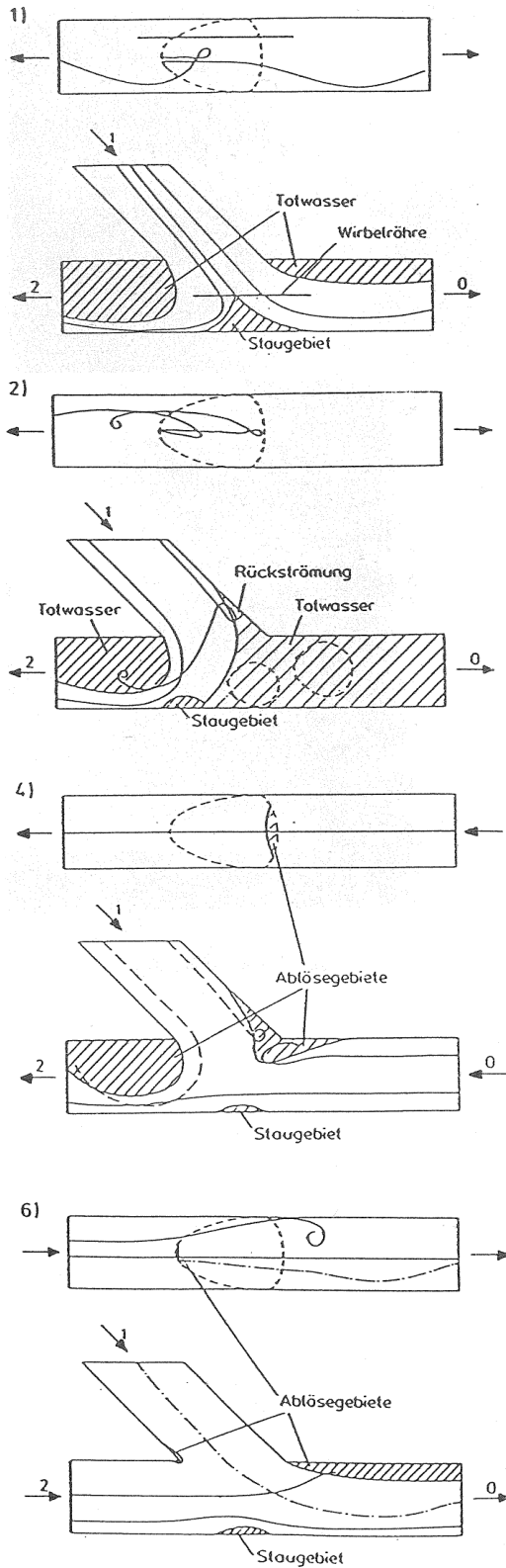


Abbildung 2.4 Typische Strömungsbilder einer Einblasung 45°, aus [7].

Der Strömungszustand wird wie folgt beschrieben:

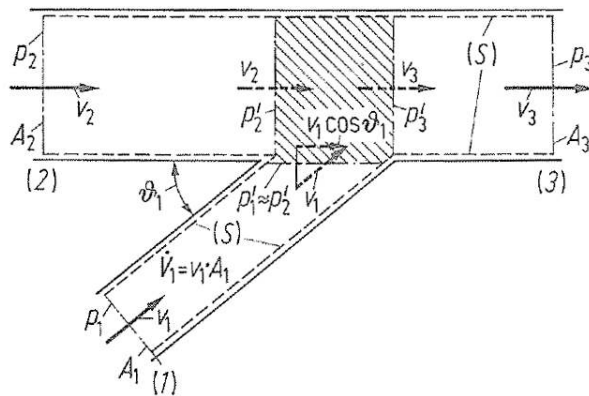


Abbildung 2.5 Einblasung, Definitionen, nach [8].

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_1 + \dot{V}_2, \text{ mit } \dot{V}_1 = v_1 A_1, \dot{V}_2 = v_2 A_2 \text{ und } \dot{V}_3 = v_3 A_3 \quad \text{Gleichung 2.3}$$

Durch Anwendung des Impulssatzes lässt sich der aerodynamische Verlustkoeffizient  $\zeta_{23}$  (bezogen auf die Geschwindigkeit des Hauptstroms nach der Einblasstelle) zwischen den Orten vor und nach der Einblasstelle für den Fall der vollständigen Umsetzung des Impulses des eintretenden Luftstrahls in die Hauptströmung im Tunnel bestimmen.

$$\zeta_{23} = 1 - \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^2 - 2 \frac{A_1}{A_3} \left(\frac{v_1}{v_3}\right)^2 \cos \vartheta_1, \text{ mit } (A_2 = A_3) \quad \text{Gleichung 2.4}$$

Durch Messungen wurden zwischen dem theoretischen Ergebnis und der Realität zum Teil erhebliche Abweichungen ermittelt. Die berechneten und gemessenen Verlustbeiwerte sind in Abbildung 2.6 für den Fall der Einblasung unter den Winkeln 45° und 90° dargestellt.

Die Unterschiede sind zum Teil mit der unvollständigen Umsetzung des Impulses des eintretenden Injektorstrahls in die Hauptströmung zu erklären.

Im dargestellten Beispiel einer Einblasung unter einem Winkel von 45° sollte theoretisch bereits ab einem Volumenstromverhältnis von  $V_1/V_3 = 0.26$  ein Druckgewinn für die Hauptströmung auftreten, während das Experiment dies erst ab einem Volumenstromverhältnis von  $V_1/V_3 = 0.68$  zeigt. Andererseits sind die gemessenen Verlustbeiwerte der Hauptströmung absolut gesehen deutlich kleiner als theoretisch abgeleitet. Für diese Situation könnten die beiden Ergebnisse durch die Einführung folgender Faktoren in Einklang gebracht werden:

$$\zeta_{23} = c \cdot \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v_3} \right)^2 - 2 k_{MX} \frac{A_1}{A_3} \left( \frac{v_1}{v_3} \right)^2 \cos \vartheta_1 \right] \tag{Gleichung 2.5}$$

Der Koeffizient  $c$  trägt der abweichenden Geometrie des Treibstrahls Rechnung während der als Impulsumsetzungskoeffizient bezeichnete Parameter  $k_{MX}$  die mangelnde Übertragung des Impulses vom eingeblasenen Strahl in die Hauptströmung kennzeichnet.

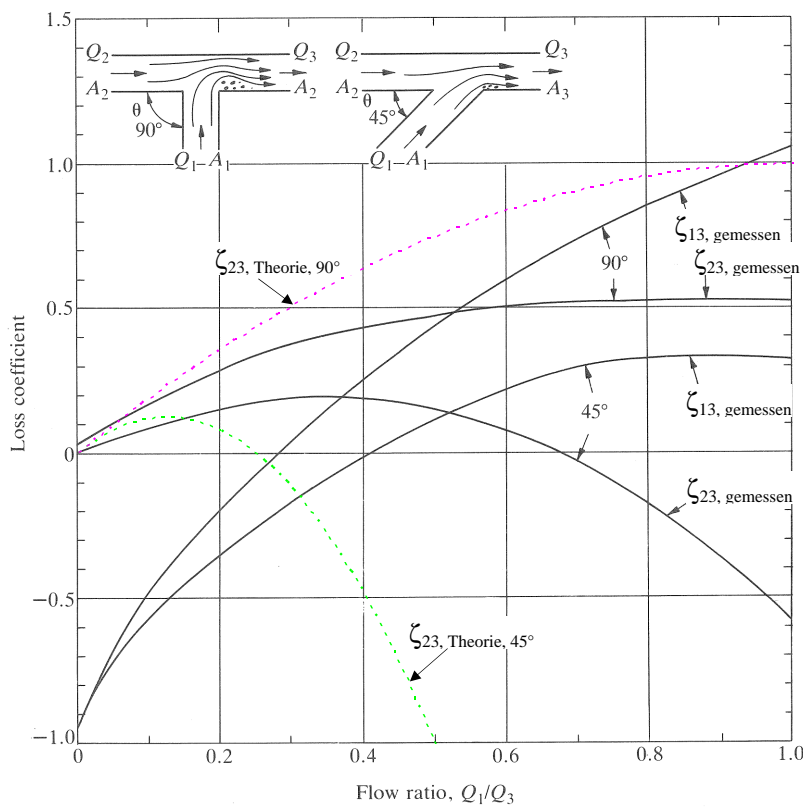


Abbildung 2.6 Verlustbeiwerte bei Einblasung, Theorie und Experiment, nach [9].

### 2.3.2 Injektorstrahl

Ein Sonderfall der Einblasung ist ein Injektorstrahl. Dabei wird eine Hauptströmung in einem grösseren Querschnitt durch einen parallel oder unter flachem Winkel eingetragenen impulsreichen Fluidstrahl angetrieben.

Aufzeichnungen über die Nutzung von Wasserstrahlpumpen sind bereits im 15. Jahrhundert angefertigt worden. Zum Beispiel im Bunsenbrenner wird durch einen Gas-Injektorstrahl die für die Verbrennung benötigte Luft in ein Rohr gesaugt (Abbildung 2.7).

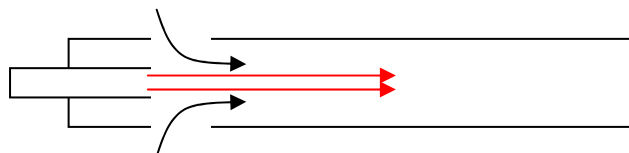


Abbildung 2.7 Injektorstrahl: Prinzip des Bunsenbrenners

Ende des 19. Jahrhunderts erkannte der italienische Ingenieur Marco Saccardo die Nutzbarkeit des zu Grunde liegenden physikalischen Zusammenhangs von Injektorstrahlen für die Lüftung von Bahntunneln [3].

In neuerer Zeit zu Beginn der 1990er Jahre haben Yoshizawa e.a. [6] grundlegende Messungen zur Wirksamkeit und Einsetzbarkeit von Injektorstrahlen zur Längslüftung von Tunnelröhren durchgeführt.

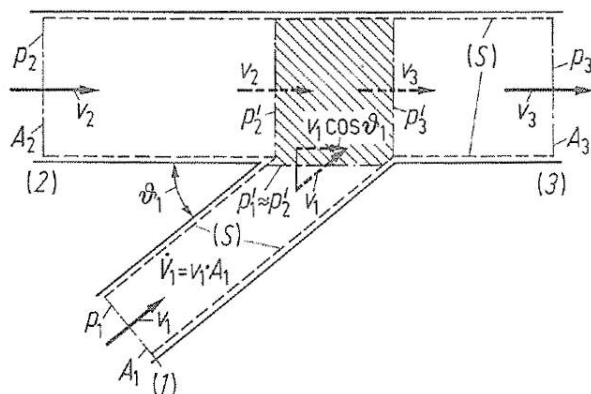


Abbildung 2.8 Einblasung, Definitionen, nach [8].

Zunächst gelten auch hier die Ableitung nach Kapitel 2.3.1. Zur leichten Handhabbarkeit der Ausdrücke und zum Vergleich der Messergebnisse aus verschiedenen Quellen seien in Anlehnung an die Darstellungen die folgenden Parameter definiert:

- $f$  Flächenverhältnis  $A_{Injektor} / A_{Tunnel}$  bzw.  $A_1 / A_3$
- $\epsilon$  Volumenstromverhältnis  $v_{Injektor} A_{Injektor} / v_{Tunnel} A_{Tunnel}$  bzw.  $v_1 A_1 / v_3 A_3$

Damit wird

$$\zeta_{23} = c \cdot \varepsilon \cdot \left[ 2 - \varepsilon - k_{MX} 2 \frac{\varepsilon}{f} \cos \vartheta_1 \right] \tag{Gleichung 2.6}$$

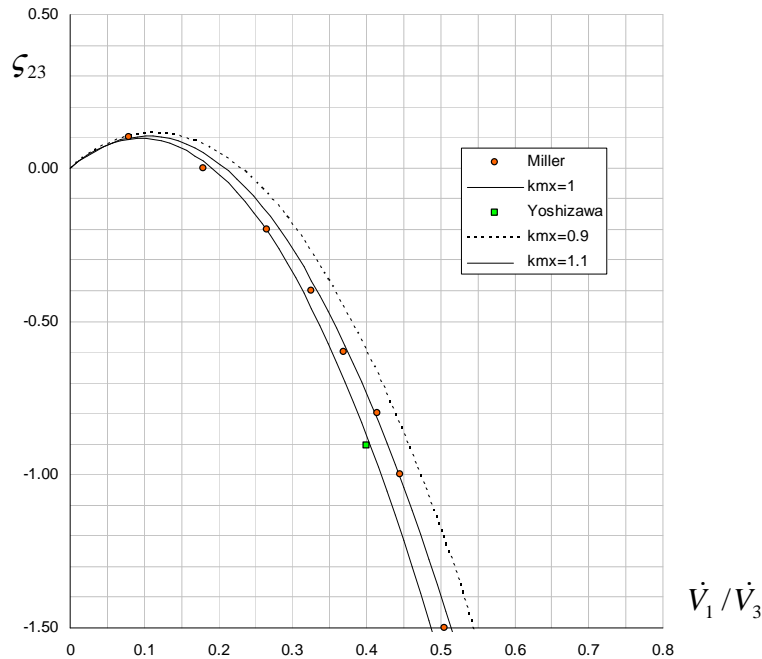


Abbildung 2.9 Druckgewinn bzw. Verlustbeiwert – Theorie und Experiment,  $\theta = 15^\circ$

In Abbildung 2.9 ist der Beiwert  $\zeta_{23}$  einer Saccardo-Düse mit einem Einblaswinkel von  $15^\circ$  und einem Flächenverhältnis  $f=0.225$  und  $c=1$  eingetragen.

Die Geometrie der in der Regel in die Tunneldecke integrierten Düsen lässt sich nicht ohne weiteres so gestalten, dass ein homogenes Geschwindigkeitsprofil zustande kommt. Auf Grund der quadratischen Abhängigkeit des Austrittsimpulses von der Geschwindigkeitsverteilung ist in die oben dargestellten Gleichungen eine entsprechend korrigierte, effektive Austrittsgeschwindigkeit einzusetzen.

$$v_{eff} = \sqrt{\int_{A_1} v^2 dA}$$

Für praktische Anwendungen ist es günstiger statt dem Energieänderungs-Beiwert  $\zeta_{23}$  direkt den Anstieg des statischen Drucks vor und nach der Saccardo-Düse zu berechnen (für  $v_3 \neq 0$ ).

$$\Delta p_{23} = \rho \cdot v_3^2 \cdot \left[ 1 - (1 - \varepsilon)^2 - k_{MX} \frac{\varepsilon^2}{f} \cos \vartheta \right] \tag{Gleichung 2.7}$$



Zur Regulierung einer Längsströmung im Tunnel, die nicht die Geschwindigkeit Null haben soll, ist der Luftvorhang nicht geeignet. In einem solchen Fall reduziert sich der Effekt auf den Eintrag von Masse und den Eintrag von Impuls in Längsrichtung. Durch den sehr steilen Einblaswinkel (die optimale Wirkung ergibt sich gemäss mehreren Autoren bei ca. 30° gegenüber der Vertikalen) ist der Impulseintrag in Längsrichtung nur etwa halb so gross wie bei Einrichtungen mit flachem Einblaswinkel.

Eine sinnvolle Anwendung findet der Luftvorhang im Tunnel daher nur dann, wenn das Sicherheitskonzept für den Brandfall eine im Mittel stillstehende Strömung links und rechts des Luftvorhangs vorsieht. In diesem Fall kann der Luftvorhang in der Lage sein, eine gewisse Druckdifferenz aufzubauen um eine Längsströmung zu verhindern.

Bei Hayes [12] findet sich eine Darstellung der physikalischen Grundlagen und die analytische Ableitung der Strahltrajektorie, welche von den meisten Autoren übernommen worden ist.

Für die Funktionsweise des Luftvorhangs ist es wesentlich, dass der Freistrah den Boden erreicht und dort in beide Richtungen abströmt. Durch die Wirkung der unterschiedlichen Drücke auf beiden Seiten wird der Strahl gekrümmt (siehe Abbildung 2.11).

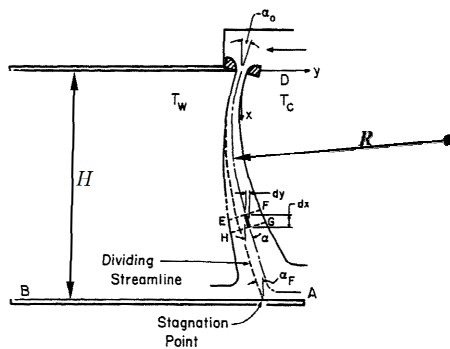


Abbildung 2.11 Geometrie des Luftvorhangs, nach [12]

Aus der Anwendung des Impulssatzes lässt sich der Krümmungsradius  $R$  des Vorhangs ableiten zu

$$R = \frac{I_0}{\Delta p} = \frac{\rho \cdot e \cdot U_0^2}{\Delta p} \quad \text{Gleichung 2.10}$$

wobei  $I_0$  die auf die Breite  $L$  des Strahls bezogene Impulsstromdichte im Freistrah der Dicke  $e$  in der Ebene parallel zur Tunnelachse und  $\Delta p$  die Druckdifferenz zwischen den beiden Seitenflächen des mit der Geschwindigkeit  $U_0$  über die Tunneldecke eintretenden Freistrahls darstellt. Einige Autoren stellen in Experimenten Abweichungen von diesem idealen Verlauf fest. Der Grund für die Abweichungen wurde allerdings nicht eindeutig festgestellt.

Verbreitet ist die Anwendung der Euler-Zahl zur Übertragung der Ergebnisse aus Experimenten in andere Massstäbe

$$Eu = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} \cdot U_0^2}$$

und die Darstellung der Abhängigkeit der Eulerzahl von den geometrischen Verhältnissen als

$$Eu = f\left(\sin \alpha, \frac{H}{e}\right)$$

Für den letztgenannten Zusammenhang gibt es eine Reihe von Vorschlägen, u.a.:

$$Eu = \frac{43 \frac{e}{H} \sqrt{H} - 0.4}{20} \quad \text{Guyonnaud, [10], semi-empirisch, } \alpha=30^\circ$$

$$Eu = \left(1.71 + 0.0264 \cdot \frac{H}{e}\right) \cdot \frac{e}{H} \cdot \sin \alpha \quad \text{Lajos und Preszler, [13], semi-empirisch, } \alpha=30^\circ$$

$$Eu = 2 \frac{e}{H} \left(2.4 \sqrt{\frac{e}{H}} \left(1 - 2.56 \frac{e}{H}\right) - \sin \alpha\right) \quad \text{Hayes und Stoecker, [12], analytisch}$$

Für das von verschiedenen Autoren untersuchte Beispiel eines unter  $\alpha=30^\circ$  gegen die Vertikale geneigten Luftvorhangs des Strahldicken/Höhen-Verhältnisses  $e/H=0.08$  (z.B. Strahldicke  $e=0.2 \text{ m}$  in einen  $H=2.5 \text{ m}$  hohen Tunnelraum) umfasst die Spanne der ausgewerteten Eulerzahlen Werte zwischen  $Eu=0.0064$  und  $Eu=0.252$ .

Für eine Einblasgeschwindigkeit von  $U_0=30 \text{ m/s}$  würden die im Tunnel mit diesem Luftvorhang erzielbaren Druckdifferenzen von  $\Delta p=3.5 \text{ Pa}$  bis  $\Delta p=136 \text{ Pa}$  reichen.

Die Spanne der Ergebnisse der bisherigen Forschung auf diesem Gebiet zeigt, dass die Planungssicherheit von Luftvorhang-Anlagen zum Einsatz in Strassentunneln sehr beschränkt ist.

Ein grosses Problem ist offensichtlich die mangelhafte Übertragbarkeit von Ergebnissen, welche in Experimenten oder numerischen Simulationen erzielt worden sind, auf die originalgrosse Ausführung.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Luftvorhanganlagen nur begrenzt für die Kontrolle der Luftströmung in einem Tunnel eingesetzt werden können.

### 2.3.4 Erläuterung zum Impulsumsetzungskoeffizienten

Das Einbringen von Schub in einen Tunnel für die Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt in den meisten Fällen in Wandnähe. Strahlventilatoren werden üblicherweise an der Tunneldecke oder in Seiten- oder Deckennischen installiert. Beim Saccardo System erfolgt die Einblasung von Luft von der Decke des Tunnels oder von den Seitenwänden.

Die Nähe der Krafteinleitung zur Wand führt in der Regel zu einer Minderung des übertragenen Impulses auf die Tunnelströmung, welche insbesondere durch die erhöhte Wandreibung in der Umgebung der Krafteinleitung hervorgerufen wird. Die Güte der Übertragung der Kraft an die Tunnelströmung wird durch den Impulsumsetzungskoeffizienten  $k_{MX}$  gemäss Kap. 2.3.1 definiert.

Der Impulsumsetzungskoeffizient  $k_{MX}$  wird für das Saccardo System wie folgt definiert. Diese Definition gilt analog auch für den Impulsumsetzungskoeffizienten eines Strahlventilators.

$$k_{MX} = \frac{F_{Dx} + F_{WReibTD} - F_{WReibT}}{F_{Dx}} \tag{Gleichung 2.11}$$

mit

- $F_{Dx}$  [N] Kraft in x-Richtung, welche durch die Einblasung in den Tunnel eingebracht wird
- $F_{WReibTD}$  [N] Wandreibungskraft bei Betrieb der Einblasung
- $F_{WReibT}$  [N] Wandreibungskraft ohne Betrieb der Einblasung (Referenz)

Die Definition des Impulsumsetzungskoeffizienten wird am Saccardo System erläutert. Es wird dabei der Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“ betrachtet.

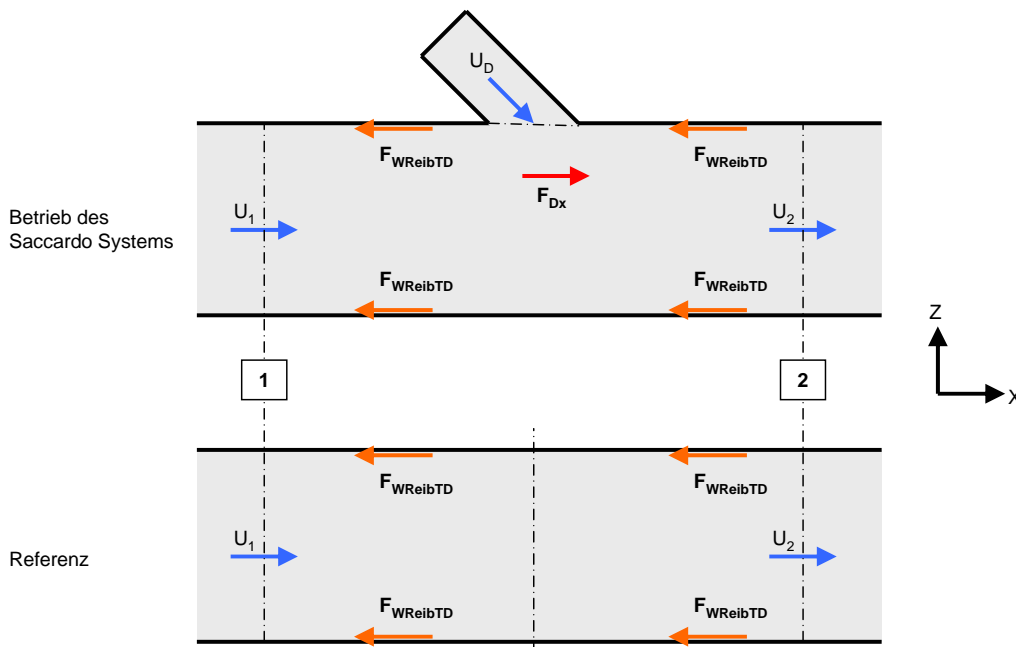


Abbildung 2.12: Beispiel zur Definition des Impulsumsetzungskoeffizienten

Das obere Bild der Abbildung 2.12 zeigt den Betrieb des Saccardo Systems. Die Kraft  $F_{DX}$  wird dabei durch die Einblasung in die Strömung eingebracht. Im betrachteten Abschnitt (1 bis 2) entsteht entgegengesetzt der Kraft  $F_{DX}$  eine Reibkraft  $F_{WReibTD}$ . Die Kraft  $F_{WReibTD}$  wird aber nicht nur durch Reibungskräfte hervorgerufen, welche von der Einblasung erzeugt werden. Von  $F_{WReibTD}$  wird somit der Kraftanteil  $F_{WReibT}$  subtrahiert, welcher nicht vom Saccardo System bewirkt wird. Die Kraft  $F_{WReibT}$  entspricht dabei der theoretischen Wandreibung, welche bei einer Tunnelströmung entsteht (siehe Abbildung 2.12, unten). Bei der Berechnung von  $F_{WReibT}$  werden die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten auf beiden Seiten der „Einblasstelle“ berücksichtigt. Die Kraft  $F_{WReibT}$  wird auch als Referenz verwendet. Die Kraft  $F_{DX}$  wird somit nur durch die Verluste reduziert, welche durch die Einblasung entstehen. Mit der Division durch die eingeleitete Kraft  $F_{DX}$  entsteht der dimensionslose Impulssetzungskoeffizient  $k_{MX}$ .

## 2.4 Absaugung

Die Abbildung 2.13 zeigt die Strömungsverhältnisse bei der Absaugung eines Teilvolumenstroms aus der Hauptströmung im Tunnel. Der im Tunnel verbleibende Hauptstrom erfährt einen Druckverlust durch Querschnittsaufweitung.

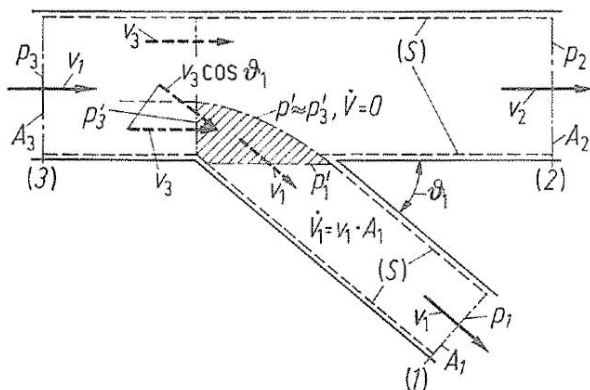


Abbildung 2.13 Absaugung, Definitionen, nach [8].

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_1 + \dot{V}_2, \text{ mit } \dot{V}_1 = v_1 A_1, \dot{V}_2 = v_2 A_2 \text{ und } \dot{V}_3 = v_3 A_3 \tag{Gleichung 2.12}$$

Durch Anwendung des Impulssatzes lässt sich der aerodynamische Verlustkoeffizient  $\zeta_{32}$  (bezogen auf die Geschwindigkeit des Hauptstroms vor der Absaugstelle) zwischen den Orten vor und nach der Absaugstelle bestimmen.

$$\zeta_{32} = k \left( 1 - \frac{v_2}{v_3} \right)^2, \text{ wobei } k = 0.35 \text{ bis } 0.4 \text{ und } (A_2 = A_3) \tag{Gleichung 2.13}$$

Durch Messungen wurde die Abweichung zwischen dem theoretischen Ergebnis und der Realität ermittelt. Die berechneten und gemessenen Verlustbeiwerte für die Hauptströmung sind in Abbildung 2.14 für ein Experiment mit senkrechter Absaugung dargestellt. Der Verlauf ist weitgehend unabhängig von dem Winkel, unter dem der Strom abzweigt.

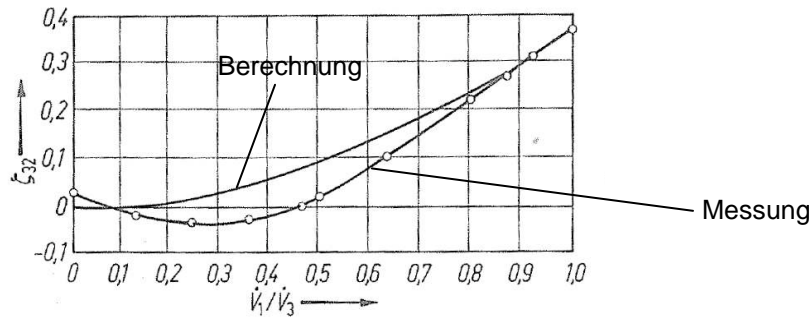


Abbildung 2.14 Energieverlustbeiwert im Tunnel bei Absaugung,  $\theta = 45^\circ$  bis  $90^\circ$ , aus [8].

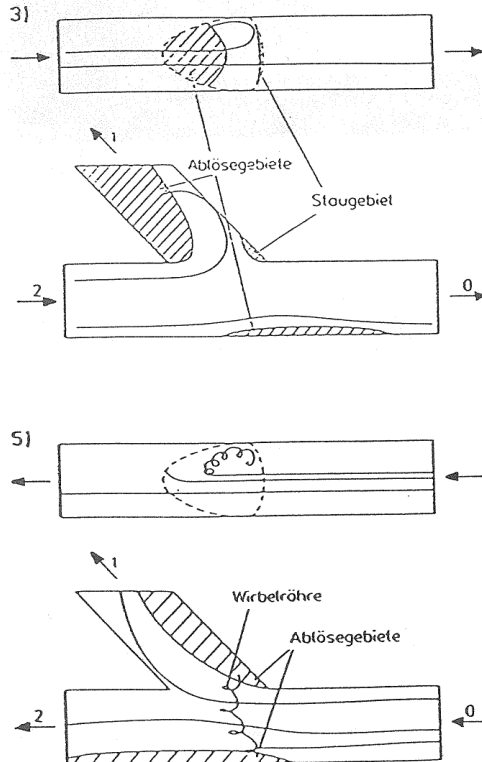


Abbildung 2.15 Typische Strömungsbilder einer Absaugung  $45^\circ$ , aus [7].

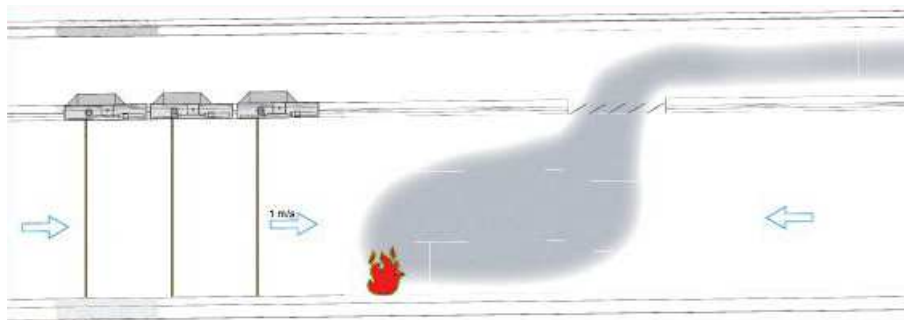
In der Praxis erfolgt bei der Querlüftung bzw. der saugenden Halbquerlüftung eine Folge von einzelnen Absaugungen von Teilvolumenströmen aus dem Fahrraum so, dass sich über die Länge eine verteilte Absaugung ergibt.

Bei einer konzentrierten Absaugung dagegen wird der gesamte Volumenstrom so abgesaugt, dass die Luft im Fahrraum von beiden Seiten her zum Absaugort strömt.

## 2.5 Mechanische Vorhänge

Mechanische Vorhänge in Strassentunneln können durch Erhöhung des Strömungswiderstands im Fahrraum die Luftströmung abbremsen. Der typische Einsatzfall ist das Abbremsen der Längsströmung im Einfahrtsportal eines aufwärtsgerichteten Tunnels bei einem Brand.

Die praktische Weiterentwicklung dieses Prinzips zur Kontrolle der Längsströmung wurde in den letzten Jahren vor allem in Österreich vorangetrieben. Im Vergleich zur Schweizer Praxis arbeitet man in Österreich mit relativ geringen Abluft-Volumenströmen zur Rauchabsaugung [2]. Damit verbunden ist die Notwendigkeit, die Längsströmung im Tunnel soweit zu reduzieren, dass kein Rauch an der Absaugstelle vorbeiströmt. Die Luftgeschwindigkeiten müssen hierbei auf die Grössenordnung von 1 m/s bis 1,5 m/s reduziert werden, was gerade bei aufwärts geneigten Tunneln im Brandfall erhebliche Widerstandskräfte erfordert. In Abbildung 2.16 ist die typische, aerodynamische Wirkung eines flexiblen Vorhangs dargestellt.



Quelle: [70]

Abbildung 2.16 Einsatz von Vorhängen zur Kontrolle der Längsströmung im Brandfall

Damit im Ereignisfall die Fahrzeuge oder Personen den Tunnel noch verlassen können (siehe [23]), müssen die Vorhänge entsprechend flexibel ausgeführt werden. Dies führt dazu, dass auch ein entsprechend starker Luftstrom den Vorhang aufbiegen und damit den gewünschten Brems-Effekt deutlich abschwächen kann.

Der hier verwendete Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  ist wie folgt definiert:

$$c_w = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} u^2}, \text{ die Bezugsfläche ist der lichte Tunnelquerschnitt.}$$

Wobei:

$u$	mittlere Luftgeschwindigkeit im Fahrraum
$\Delta p$	Druckverlust am Vorhang
$\rho$	die Luftdichte

Bei einer Strömungsgeschwindigkeit zwischen  $u=0$  m/s und  $u=1.3$  m/s kann beispielsweise ein Luftwiderstandsbeiwert (bezogen auf den Fahrraumquerschnitt) in der Grössenordnung von  $c_w=45$  erreicht werden. Mit beginnendem Abheben des Vorhangs durch den Luftstrom reduziert sich der  $c_w$ -Wert erheblich, bei einer Strömungsgeschwindigkeit von mehr als 10 m/s sinkt der  $c_w$ -Wert nahezu auf Null ab.



**1. Kein Vorhang:** Ohne den Einsatz des Vorhangs (oder weiterer Maßnahmen zur Kontrolle der Längsströmung) entsteht stromauf des Brandes auf Grund dessen Thermik eine Zuströmung von Frischluft mit einer Geschwindigkeit von bis zu 3 m/s. Die durch den Brand erhitzte Luft wird nur zum Teil abgesaugt. Ein Teil strömt an der Absaugstelle vorbei, so dass der Rauch sich mit ca. 1.5 m/s weiter im Tunnel ausbreitet.

**2. Vorhang im unteren Portal:** Die Zuströmung von Frischluft wird abgebremst auf gut 1.0 m/s. Im oben gelegenen Tunnelabschnitt kommt die Strömung zum Erliegen und der Rauch breitet sich dorthin nur sehr langsam aus. Mit dem Fortschritt des Brandes beschleunigt sich die Ausbreitung etwas.

**3. Vorhang im unteren und im oberen Portal:** Der Vorhang im oberen Portal hat praktisch keine zusätzliche Wirkung, da an diesem Ort nahezu keine Strömungsgeschwindigkeit herrscht. Es ergeben sich ähnliche Verhältnisse wie bei der Variante 2.

**4. Je zwei Vorhänge im unteren und im oberen Portal:** Die Abbremsung im unteren Portal ist deutlich stärker als bei Variante 2, die Luftgeschwindigkeit der nachströmenden Luft reduziert sich auf weniger als 1.0 m/s. Am oberen Portal kommt es zu einer Rückströmung mit Luftgeschwindigkeiten in der Grössenordnung von 0.5 m/s.

In Abbildung 2.18 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Das linke Diagramm zeigt den Verlauf der Luftgeschwindigkeiten über der Zeit im unteren Portal. Im rechten Diagramm sind die Luftgeschwindigkeiten im oberen Portal dargestellt.

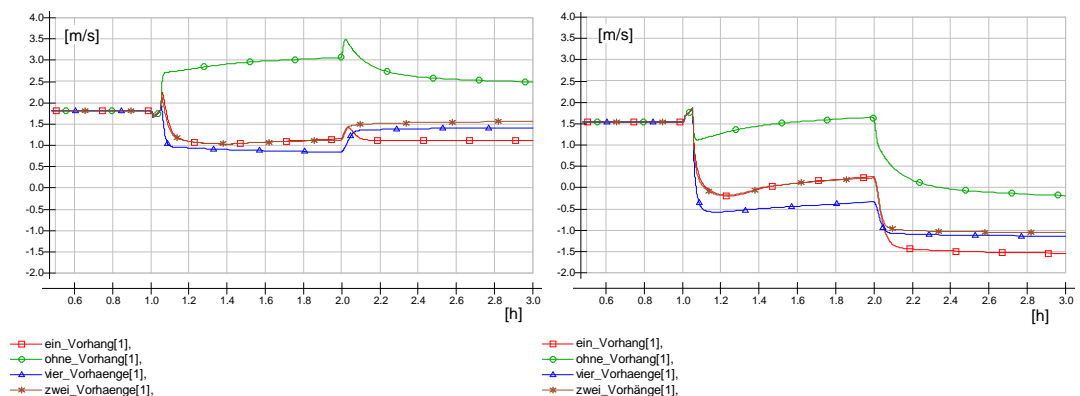


Abbildung 2.18 Luftgeschwindigkeiten – links: unteres Portal, rechts oberes Portal

Fazit:

1. Der mechanische Vorhang eignet sich in aerodynamischer Hinsicht innerhalb von gewissen Grenzen zur Kontrolle der Längsströmung im Fahrraum bei einem Brandereignis.
2. Der Vorhang entfaltet seine Wirkung nur dort, wo eine gewisse Mindest-Luftströmungsgeschwindigkeit herrscht ( $> 1$  m/s).
3. Für eine ausreichende Wirkung sind in der Regel mehrere hintereinander geschaltete Vorhänge nötig.
4. Wenn bereits eine hohe Luftgeschwindigkeit im Tunnel herrscht ( $\approx 10$  m/s) kann sie durch das Schliessen der Vorhänge kaum noch abgebremst werden.

## 3 Praktische Anwendung

### 3.1 Querlüftung

Die Kontrolle der Längsströmung unter Einsatz von Querlüftungsanlagen (verteilte Zu- und Abluft) wird bei einigen Tunneln mit mehreren Lüftungsabschnitten angewendet.

Bei flüssigem Richtungsverkehr ist vor dem Brandort eine ausreichend hohe Längsströmung in Verkehrsrichtung anzustreben. Dazu wird in den Sektoren zwischen Einfahrtportal und Brandabschnitt Zuluft und in den Sektoren zwischen Brandabschnitt und Ausfahrtportal Abluft gefahren.

Bei Stau oder Gegenverkehr ist die Längsströmung so zu beeinflussen, dass von beiden Seiten eine möglichst symmetrische Zuströmung zum Brandort erfolgt. Mit Betrieb der Querlüftung kann eine durch äussere Kräfte induzierte Luftströmung abgebremst werden.

Die alten Lüftungsanlagen aus den 70er und 80er Jahren sind für die früher wesentlich höheren Fahrzeugemissionen im Normalbetrieb ausgelegt. Diese grossen Luftmengen stehen für die Beeinflussung der Längsströmung zur Verfügung.

Bei bestehenden Tunneln, welche mit Abluftklappen für die konzentrierte Absaugung nachgerüstet werden, wird die verteilte Zu- oder Abluft für die Beeinflussung der Längsströmung angewendet, wenn der Tunnel in mehrere Zu- oder Abluftsektoren unterteilbar ist.

Als Beispiele seien genannt:

- Elbtunnel Hamburg, Röhren 1 – 3 (vor der Nachrüstung)
- Gotthard Strassentunnel
- Seelisbergtunnel (Vorgezogene Massnahmen)

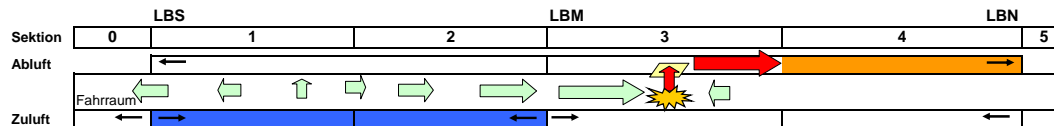


Abbildung 3.1 Brandlüftung flüssiger Richtungsverkehr mit Zu- und Abluft (Bsp. Elbtunnel)

### 3.2 Konzentrierte Absaugung

Grundsätzlich können die Anforderungen der Richtlinie [1] für die konzentrierte Absaugung im Brandfall, nämlich eine minimale Strömungsgeschwindigkeiten von beiden Seiten zur Absaugstelle hin, ohne zusätzliche Massnahmen zur Beeinflussung der Längsströmung erreicht werden.

Wegen der Asymmetrie durch Geometrie und Stödrücke bleibt das Verhältnis der zuströmenden Luftströme auf beiden Seiten der Absaugung erhalten, wenn keine zusätzliche Massnahme zur Beeinflussung der Längsströmung erfolgt. Dabei wird die gewünschte Längsströmung auf einer Seite mit einer übermässig hohen Längsströmung auf der jeweils anderen Seite der Absaugung erkauft. Dies führt zu entsprechend hohen Absaugmengen.

Da bei gleichen geometrischen Verhältnissen die installierte Leistung proportional zur dritten Potenz des Volumenstroms steigt, führen hohe Absaugmengen zu unverhältnismässig hohen Drücken und Anschlussleistungen. Der Absaugmenge sind deshalb Grenzen gesetzt.

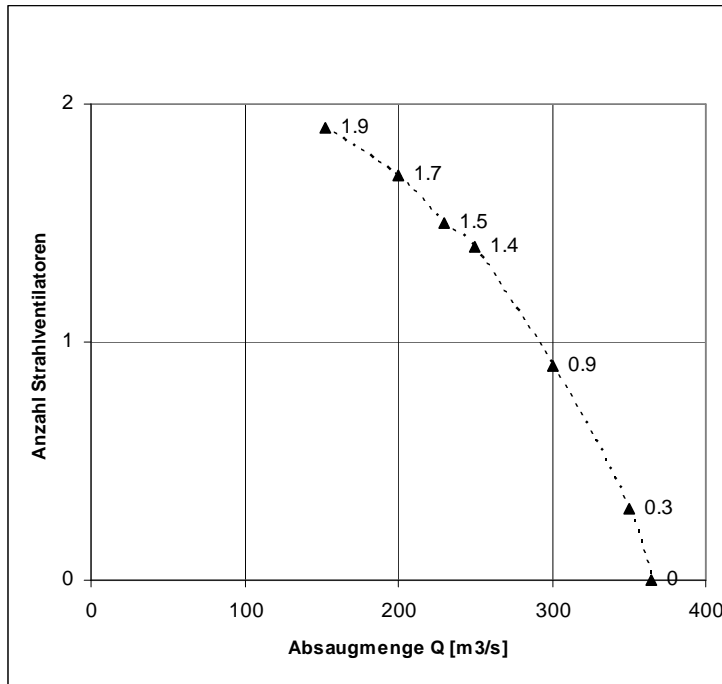


Abbildung 3.2 Benötigte Anzahl SV in Abhängigkeit der Absaugmenge (Bsp. Flüeler Tunnel)

### 3.3 Strahlventilatoren

Die Mehrzahl der Strassentunnel ist heute mit Strahlventilatoren zur Beeinflussung der Luftströmung ausgerüstet. Diesbezüglich bestehen Messresultate und Betriebserfahrungen von Hunderten von Anlagen weltweit. Auf eine allgemeine Darstellung des Einsatzes von Strahlventilatoren wird hier verzichtet.

Verluste entstehen vor allem durch Reibung des Luftstrahls, welcher an der Tunneldecke bzw. Wand anliegt (Coanda-Effekt), siehe Kap. 2.2. Diese Verluste können vermindert werden, wenn der Strahl in einem Winkel zur Tunnel-Längsachse geneigt ist. Dadurch verbessert sich der Einbauwirkungsgrad  $\eta_E$ . Dies kann z.. Bsp. durch Umlenkgritter am Austrittsquerschnitt erreicht werden.

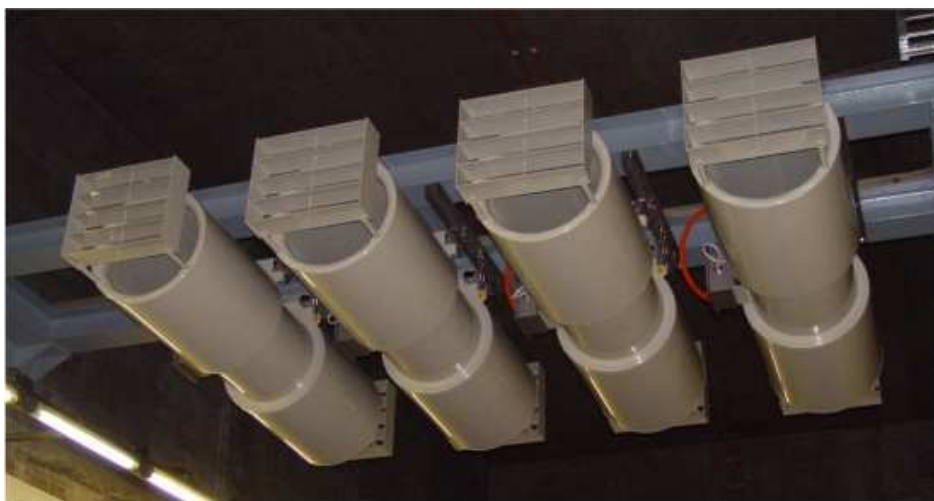


Abbildung 3.3 Strahlventilatoren mit Umlenkgrittern

Eine weitere Möglichkeit der Strahlumlenkung sind schräggestellte Schalldämpfer. Dies wird durch einen Hersteller, welcher das Verfahren patentiert hat, als ‚Banana Jet‘ bezeichnet.

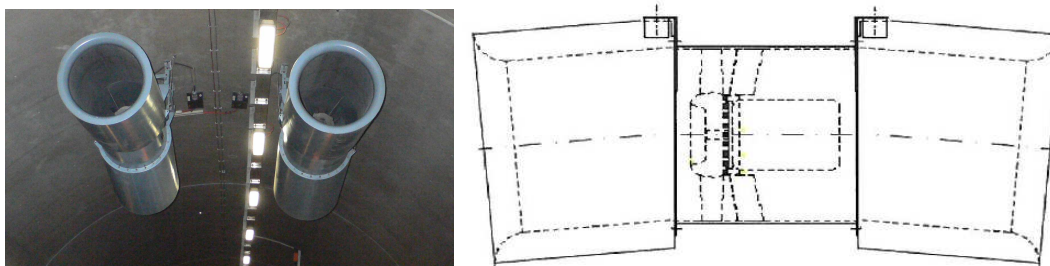


Abbildung 3.4 Strahlventilatoren mit schräggestellten Schalldämpfern (‚Banana Jets‘)

In den Tunneln Balmenrain und Uznaberg (Kt. SG) wurden ‚Banana Jets‘ erstmals in grösserem Umfang in Strassentunneln eingesetzt. Die Abnahmemessungen haben die bessere Schubumsetzung im Tunnel gegenüber konventionellen Strahlventilatoren nachgewiesen. Dabei wurden auch umfangreiche Vergleichsmessungen der Strömungsprofile im Fahrraum mit und ohne schräggestellte Schalldämpfer durchgeführt, jeweils in Abständen von 20, 40, 60 und 120 m von den Strahlventilatoren [14].

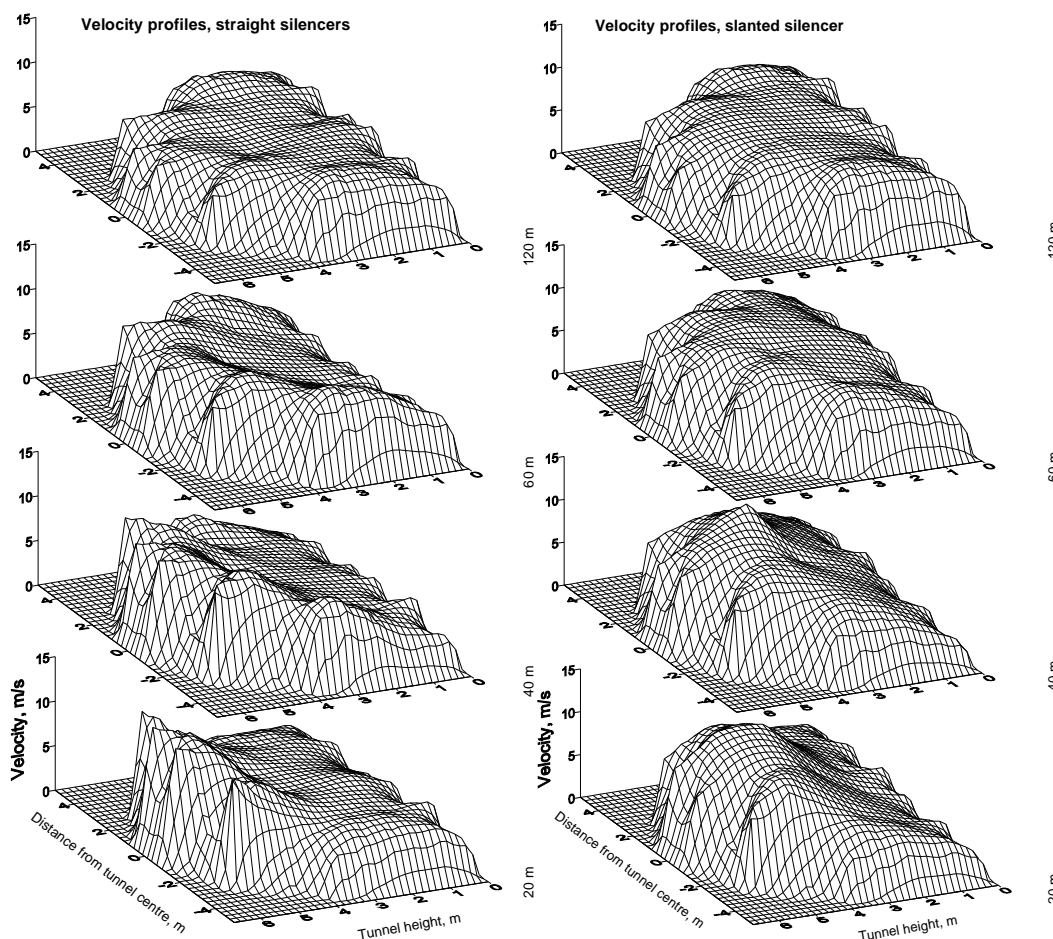


Abbildung 3.5 Strömungsprofile mit konventionellen Strahlventilatoren und mit ‚Banana Jets‘

Der optimale Strahlwinkel zur Tunnellängsachse wurde mit CFD-Simulationen von Betta et al. [15] wie folgt bestimmt:

- im leeren Tunnel: 6°
- mit durchgehendem Stau (Lastwagenanteil 12%, Fahrzeugabstand 2 m) im Tunnel: 2° - 4°

### 3.4 Verteilte Einblasung senkrecht

Bei den üblichen (blasenden) Halbquer- und Querlüftungsanlagen erfolgt die Einblasung der Zuluft senkrecht zur Tunnellängsachse. Damit kann ein Abbremsen einer überlagerten Längsströmung erreicht werden, andererseits werden bei einer Halbquerlüftung durch die einblasene Luft Längsströmungen nach aussen induziert.

Der praktische Einsatz erfolgt gemäss Kap. 3.1

### 3.5 Verteilte Einblasung mit Längsimpuls

Bei den in den 1990er Jahren in der Schweiz üblichen reversiblen Halbquer-/Querlüftungsanlagen wurde die Zuluft auch durch geneigte Schlitze in der Zwischendecke eingeblasen. Im Brandfall wurde die Luftströmung im Kanal reversiert und durch die Schlitze abgesaugt (siehe Beschreibung Crap-Teig Tunnel im Kap. 4.1).

Die Schlitze haben einen Winkel von ca. 30° zur Tunnellängsachse. Damit wird ein Längsimpuls der angesaugten Luft im Kanal erreicht, welcher zu einem Druckrückgewinn und somit zu einer Verminderung der benötigten Ventilatorleistung führt. Zur Gewährleistung einer gleichmässigen Zuluft- bzw. Abluftverteilung sind die Schlitze mit einem Kunststoff-Drosselelement bestückt, welches sich bei ca. 100° C verformen sollte, und so im Brandfall die Absaugöffnungen in unmittelbarer Umgebung des Brandherdes zu vergrössern.

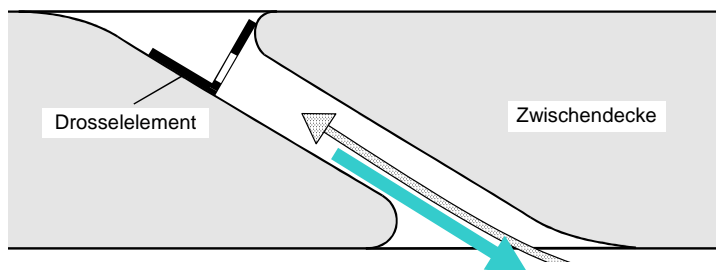


Abbildung 3.6 Deckenschlitze für verteilte Zuluft / Abluft

Für die Beeinflussung der Längsströmung im Fahrraum im Zuluftbetrieb wurde dies nur bedingt eingesetzt. Früher wurde die Bedeutung der Kontrolle der Längsströmung unterschätzt, und mangels zuverlässiger Luftströmungsmessung war keine Regelung der Strömung möglich.

Im 2003 eröffneten Tunnel Branisko (SK) wird die Zuluft durch Gliederklappen mit einem Winkel von ca. 5 - 10° eingeblasen. Diese wirken so mit als ‚Zuluftimpulsklappen‘. Im Brandfall werden die meisten Klappen im Brandabschnitt geschlossen und die Klappen am Brandort zur konzentrierten Absaugung ganz geöffnet. Der Zuluftventilator im Portal wird abgeschaltet, der Abluftventilator am Schacht in der Umgebung der Tunnelmitte läuft an, die Luftströmungsrichtung im Zu-/Abluftkanal bleibt gleich. Dieser kann durch Trennklappen vor dem Schacht abgetrennt werden. Somit kann in der anderen Tunnelhälfte die Zuluft weiter betrieben werden, um durch den Impuls der gerichteten Zuluft durch die Klappen die Luftströmung im Fahrraum so zu beeinflussen, dass eine möglichst symmetrische Absaugung erreicht wird.

### 3.6 Saccardo-Düsen

Ursprünglich wurden Tunnellüftungsanlagen für die Verdünnung der Emissionen aus der Kohleverbrennung in den Dampflokomotiven benötigt. Bereits 1899 wurde eine Lüftungsanlage mit einer Saccardo-Düse im Gotthard Bahntunnel installiert [4], [5]. Die Radialventilatoren wurden mit einer Dampfmaschine (stationäre Lokomotive) angetrieben.

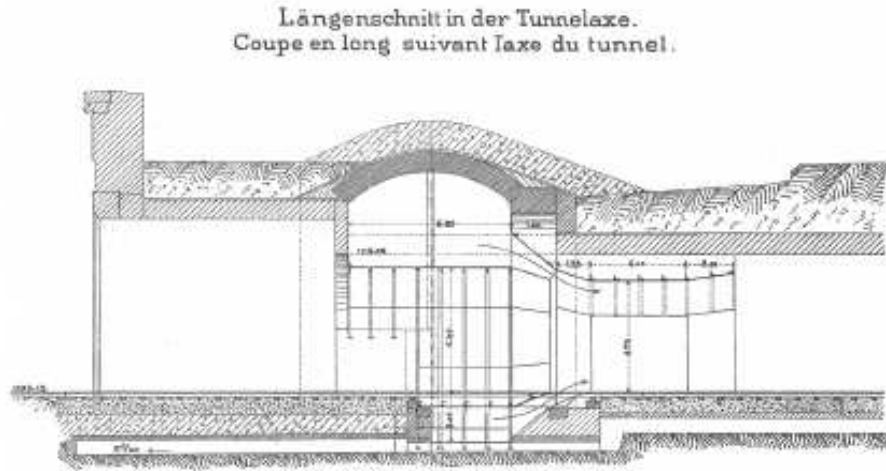


Abbildung 3.7 Saccardo-Düse für den Gotthard Bahntunnel in Göschenen

Technische Kennwerte des Systems sind (gemäss Beschreibung in [4]):

Tunnellänge:	15 km
Lichter Querschnitt:	47.1 m <sup>2</sup>
Einblaswinkel:	17°
Treibstrahlquerschnitt:	10 m <sup>2</sup> (20 m x 0.5 m, ringförmig)

Aus der Veröffentlichung lassen sich folgende Messergebnisse entnehmen:

Nr.	Datum	Ventilator aus	Ventilator drehzahl	Ventilator ein
		(Naturzug)		U/Min.
		Luftgeschwindigkeit		Luftgeschwindigkeit
		von Nord n. Süd		von Nord n. Süd
1	22.März.1898	- 2.0 m/s	70	+ 1.3 m/s
2	7.April 1898	+ 2.0 m/s	65	+ 2.8 m/s
3	7.April 1898	+ 2.0 m/s	100	+ 4.0 m/s
4	11.April 1898	- 2.0 m/s	65	+ 0.75 m/s
5	11.April 1898	- 2.0 m/s	100	+ 1.90 m/s

Tabelle 3.1 Messdaten Saccardo-Düse Gotthard Bahntunnel

Eine Angabe des Volumenstroms der Ventilatoren findet sich im vorliegenden Artikel leider nicht, aus anderen Quellen kann die Ventilatorenleistung zu ca. 265-295 kW (2 Radialventilatoren á 360 – 400 PS') entnommen werden.

Unter der Annahme, dass der Ventilator im wesentlichen den Austrittsverlust der Saccardo-Düse zu bewältigen hat, kann für eine angenommene Ventilator-Leistung von 280 kW (bei 100 U/min) ein Volumenstrom von ca.  $\dot{V}_3 = 350 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw. eine Austrittsgeschwindigkeit  $v_3 = 35 \text{ m/s}$  berechnet werden.

Unter der Annahme eines Rohrreibungskoeffizienten von  $\lambda=0.030$  lassen sich Impulssetzungskoeffizienten berechnen. Bei Berücksichtigung der zu vermutenden Fehler der damaligen Messungen und der ungenauen Spezifikation der Ventilatordaten muss festgestellt werden, dass sich die Messergebnisse mit Impulskoeffizienten zwischen  $k_{MX} = 0.5$  und  $k_{MX} = 1.5$  erklären lassen.

Als weiteres Anwendungsbeispiel dient der Tunnel Rendsburg. Hier handelt es sich um einen 640 m langen Tunnel, welcher von 1957 bis 1961 erstellt und bis zum Umbau 2008 mit tunneleinwärts gerichteten Saccardo-Düsen ausgestattet war. In der Abnahmemessung im Jahr 1961 wurde ein Schub  $F \approx 2500$  N festgestellt.

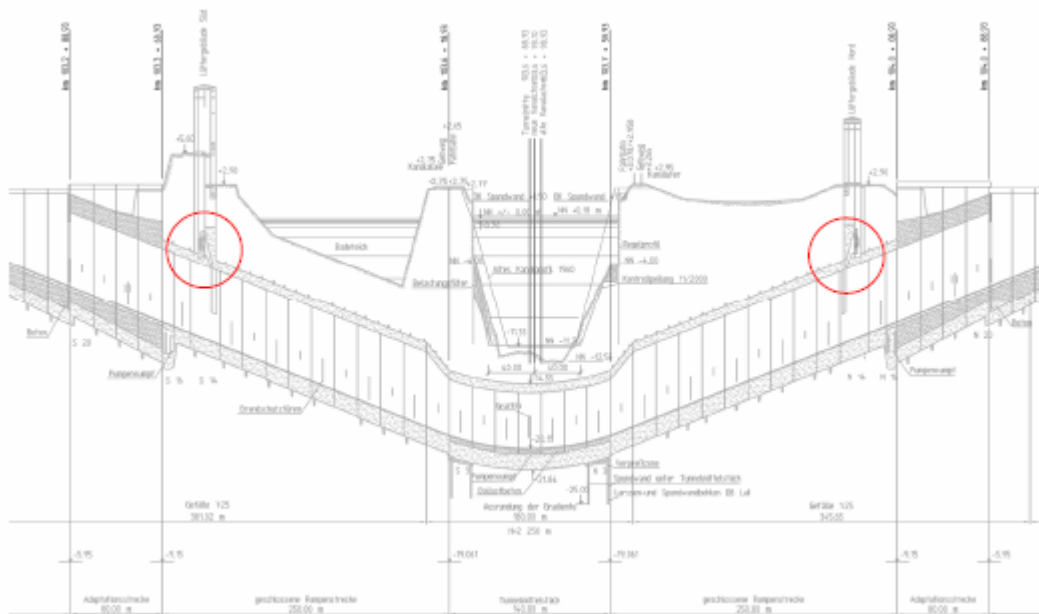


Abbildung 3.8 Überhöhter Längsschnitt des Tunnels Rendsburg

$A_3=47.2 \text{ m}^2$ ,  $A_1=7.8 \text{ m}^2$ ,  $\dot{V}_3=141 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\theta = 7^\circ$  (Annahme),  $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$  (Annahme),  
 $\lambda=0.020$  (Annahme), leerer Tunnel (Annahme)

Für die gegebenen Daten ist der gemessene Schub für Impulssetzungskoeffizienten  $k_{MX} < 1$  nicht erklärbar (berechneter Wert wäre für  $k_{MX} = 1.2 \div 1.3$ ).

Nimmt man jedoch an, dass es im Anschluss an den Austritt aus der Düse zu einer Einschnürung der Strömung kommt, so wird das Ergebnis plausibel.

Bei einem angenommenen realistischen Impulssetzungskoeffizient von  $k_{MX} = 0.9$  müsste der Querschnitt des Injektorstrahls allerdings lediglich etwa  $5.2 \text{ m}^2$  betragen um auf den gemessenen Schub zu gelangen. Dies käme einer Einschnürung um etwa 33% gleich. In den Zeichnungen der Düsen ist eine lineare Verengung des Düsenquerschnitts erkennbar, was zu einer entsprechenden Einschnürung des Strahls führen könnte.

Eine neuere Anwendung des Saccardo-Systems ist die Sanierung des Holmesdale-Strassentunnels der M25 in Grossbritannien, welche 2007 abgeschlossen wurde.

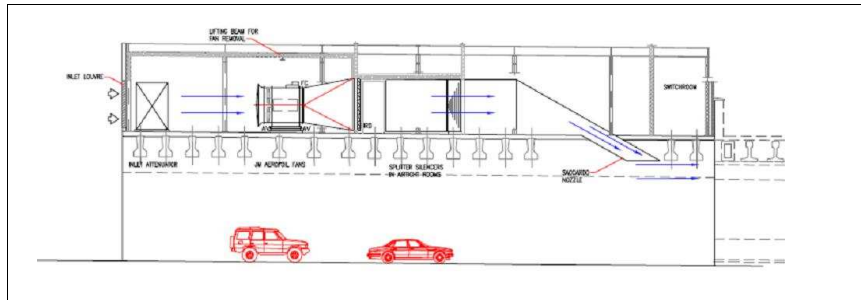


Abbildung 3.9 Düsen-Anordnung im Holmesdale Tunnel, [14]

### 3.7 Zuluftklappen für die konzentrierte Einblasung

Zuluftklappen für die konzentrierte Einblasung entsprechen im Prinzip den Saccardo-Düsen, sind aber strömungstechnisch ungünstiger. Dafür sind sie in beide Richtungen schwenkbar, und können einfach in Aussparungen in der Zwischendecke eingebaut werden. Dies ist insbesondere bei Umbauprojekten von Vorteil. Gegenüber Saccardo-Düsen ergibt sich dadurch eine wirtschaftlichere Lösung, die auf einem bewährten Abluftklappen-Typ aufbaut.

Der minimal mögliche Winkel ist auf ca. 30° in Hauptblasrichtung und auf 40° (-140°) in Gegenblasrichtung beschränkt.

Die Beeinflussung der Luftströmung mit Zuluftklappen (bzw. ‚Frischluf-Impuls-Klappen‘) ist in Österreich patentiert [18]. Von Brandl [19] wurden mit 3D-Berechnungen (CFD) die Strömungsbilder durch die Klappe dargestellt:

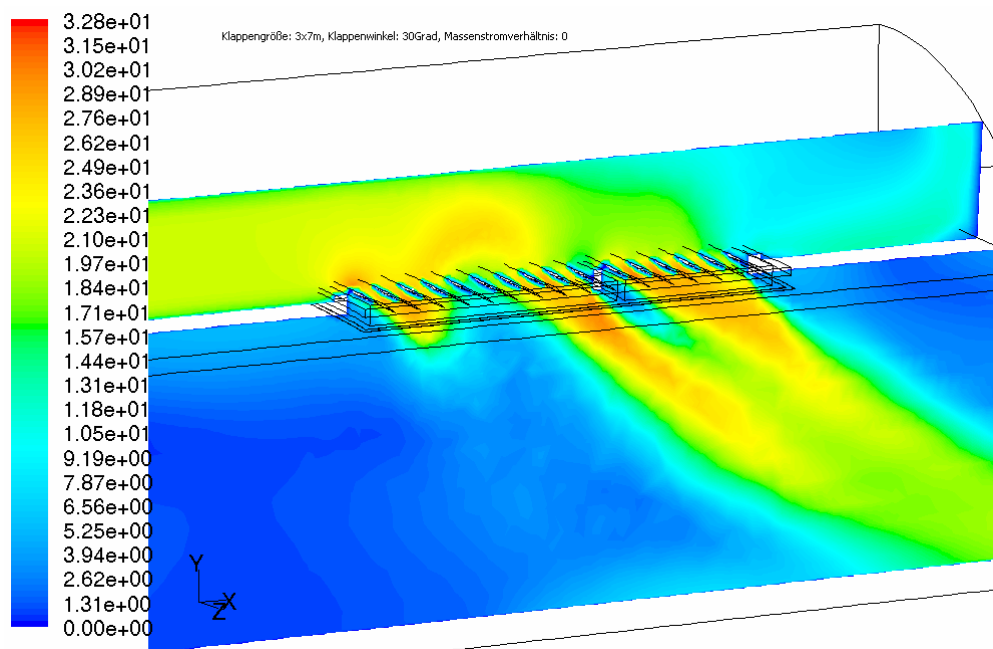


Abbildung 3.10 Strömungsbild (in m/s) bei Frischluftimpuls-Klappe, 30° Einblaswinkel

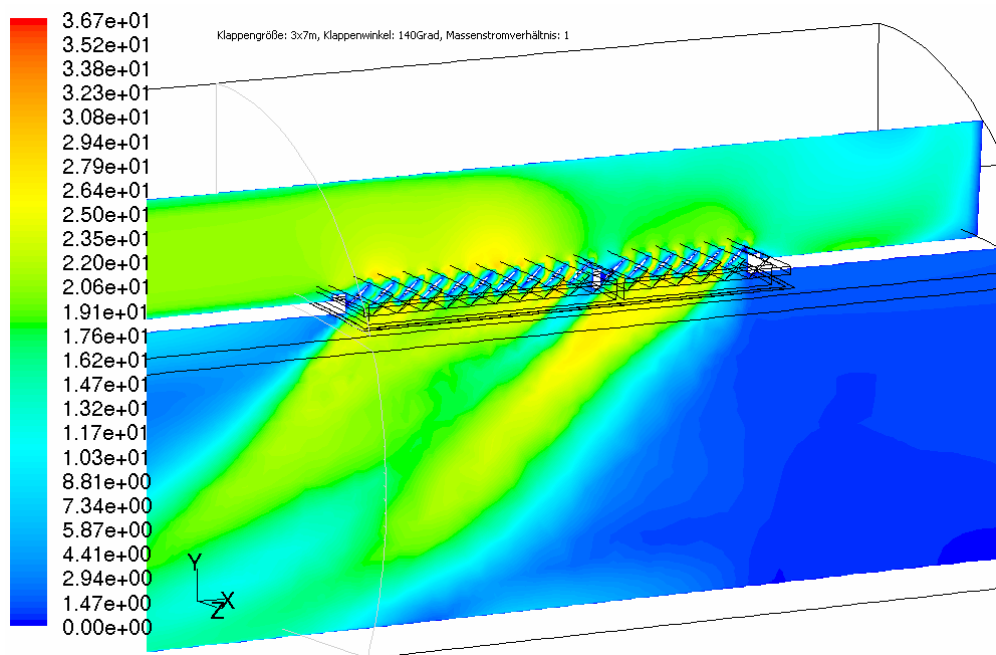


Abbildung 3.11 Strömungsbild (in m/s) bei Frischluftimpuls-Klappe, 140° Einblaswinkel

Frishluft-Impuls-Klappen sind im Katschbergtunnel (A) im Einsatz, welcher seit April 2009 umgebaut und mit einer zweiten Röhre erweitert ist. Messungen über deren Effizienz wurden von der TU Graz durchgeführt, die Ergebnisse sind aber nicht veröffentlicht.

### 3.8 Luftvorhänge

Betriebserfahrungen aus Strassentunneln sind derzeit noch nicht bekannt. Luftvorhänge sind allerdings in den folgenden Tunneln projektiert bzw. zumindest vorgeschlagen:

Antwerpen:  $H=8\text{ m}$ ,  $\alpha=35^\circ$ ,  $e=0.2\text{ m}$ ,  $U_0=35\text{ m/s}$ ,  $\Delta p \approx 50\text{ Pa bis }60\text{ Pa}$  (Planer G. Hereau, BG)

A86 Paris:  $H=3\text{ m}$ ,  $\alpha=35^\circ$ ,  $e=0.2\text{ m}$ ,  $U_0=35\text{ m/s}$ ,  $\Delta p \approx 150\text{ Pa}$  (Planer G. Hereau, BG)

### 3.9 Mechanische Vorhänge

In den Jahren 2001 und 2002 führte die TU Graz eine Reihe von Versuchen mit textilen Vorhängen in Strassentunneln durch. Dabei wurde ein neu entwickeltes Produkt untersucht.

Zunächst wurden 2001 Versuche im Katschbergtunnel durchgeführt [21]. Der Katschbergtunnel ist Teil der Tauernautobahn. Seine Länge beträgt 5400 m, die lichte Fläche des Fahrraumes beträgt ca.  $50\text{ m}^2$ . Bis zu 6 Prototypen der Vorhänge wurden etwa in der Mitte des Tunnels in einem Abstand von 2360 m zum Nordportal installiert.

Die Längsströmung wurde durch mehrere mobile Strahlventilatoren erzeugt. Auch Heissbrandversuche wurden durchgeführt. Die Bremskraft am Vorhang wurde direkt mit einer Waage gemessen.

Die Widerstandsbeiwerte  $c_w$  (mit Bezugsfläche Tunnelquerschnitt) sind abhängig von der Längsgeschwindigkeit im Tunnel ermittelt worden. Aus den Messergebnissen wurde empirisch der folgende Zusammenhang abgeleitet:

$$c_w(u) = \begin{cases} 45 & u \leq 1.3 \frac{m}{s} \\ 120 \cdot e^{-0.7294 \cdot u} & u > 1.3 \frac{m}{s} \end{cases}$$

Als Ergebnis hielten die Autoren fest, dass „... sich ein derartiges System sehr gut als sekundäre Brandschutzmassnahme für Tunnel eignet ...“

Aufbauend auf die ersten Versuche wurde dann 2002 eine Weiterentwicklung des Produkts im Gleinalmtunnel getestet [22]. Der Gleinalmtunnel ist Teil der Pyhrn-Autobahn und hat eine Länge von 8320 m. Diesmal wurden im Abstand von ca. 50 m zueinander 9 fernsteuerbare Prototypen in der Nähe des unteren Portals eingebaut. Bei den Versuchen im Gleinalmtunnel wurden die Erkenntnisse aus den ersten Experimenten im Katschbergtunnel, insbesondere der Zusammenhang zwischen  $c_w$ -Wert und Strömungsgeschwindigkeit bestätigt. Die Autoren bemerken allerdings, dass die empirisch gefundene Formel für den  $c_w$ -Wert oberhalb von 5.4 m/s nur hypothetisch ist.

Im Roppener Tunnel der Arlberg-Schnellstrasse ist heute ein solches Vorhangsystem als Teil des Brandschutzkonzepts im Einsatz. Erste Betriebserfahrungen liegen vor, wurden jedoch noch nicht publiziert.



Abbildung 3.12 Vorhang im Tunnel

## 4 Messungen im Tunnel

### 4.1 Ziele der Messungen

In der Schweiz gibt es zur Zeit keine Tunnellüftungsanlagen mit Saccardo-Düsen, während z. Bsp. im angelsächsischen Raum solche Anlagen verbreitet sind, insbesondere auch in der Bahn- und Metrolüftung. Mit Strahlventilatoren dagegen bestehen umfangreiche Messreihen von den verschiedensten Anlagen.

Um die bestehenden Rechenmodelle mit aktuellen Messdaten zu validieren und weitere Erkenntnisse zur Auslegung der Saccardo-Düse gewinnen, wurde entschieden, Messungen mit Saccardo-Düsen und, falls möglich, anderen Geometrien der Lufteinblasung durchzuführen.

Als geeignetes Objekt für die Durchführung dieser Messungen wurde der Crapteig Tunnel evaluiert.

### 4.2 Beschreibung Crapteig Tunnel

Der 1997 eröffnete, ca. 2.2 km lange Crapteig Tunnel befindet sich auf der A13 zwischen Thusis und Andeer. Er hat 3 Fahrspuren (2 bergwärts, 1 talwärts) und eine grosse Steigung von 6.5% von Nord nach Süd. Die Lüftung des Crapteig Tunnels kann mit verteilter Zuluft (im Normalbetrieb) oder mit verteilter Abluft (im Brandfall) betrieben werden. In den beiden Lüftungszentralen an den Portalen sind je ein Zuluftventilator und ein Zu-/Abluftventilator mit variabler Drehzahl angeordnet. Die Zu-/Abluftventilatoren sind zusätzlich mit verstellbaren Schaufeln ausgestattet.

Das Tunnelgewölbe über der Zwischendecke ist in zwei parallel zum Fahrraum verlaufende Luftkanäle unterteilt. Der eine Kanal ist durchgehend und dient als reiner Zuluftkanal, aus welchem die Luft über Sekundärkanäle ca. 1 m über dem Gehweg quer zur Tunnel-längsachse in den Fahrraum zugeführt wird. Der Zuluftkanal wird an beiden Enden durch je einen Ventilator mit maximal 115 m<sup>3</sup>/s gespiesen. Der zweite Kanal diente als Zuluft- oder Absaugkanal und ist etwa in Tunnelmitte durch eine Absperrklappe unterteilt. Dadurch ergeben sich im Tunnel zwei Lüftungsabschnitte Süd und Nord. Jeder Abschnitt wird durch

einen Zu-/Abluftventilator versorgt, welcher im Zuluftbetrieb über die Deckenschlitze ca. 95 m<sup>3</sup>/s förderte. Im Absaugbetrieb werden über Deckenschlitze (gemäss Abbildung 3.6) je Ventilator maximal 90 m<sup>3</sup>/s gefördert und im alternativen Absaugbetrieb für den Immissionsschutz durch die 50 m<sup>2</sup> grossen Abluftklappen vor den beiden Portalen 200 m<sup>3</sup>/s. Die Deckenschlitze haben einen Abstand von 9 m.

Aufgrund der Sicherheitsanforderung der Richtlinie [1], welche eine Einblasung von Zuluft aus der Decke verbietet, wurde der Zuluftbetrieb des Zu-/Abluftventilators in der Steuerung gesperrt, und nur die verteilte Absaugung vorgesehen. Die Portalabsaugung läuft in der Praxis nie.

Im geöffneten Zustand sperrt die Abluftklappe für die Portalluftabsaugung den Zu-/Abluftkanal ab. Im (ursprünglich nicht vorgesehenen) Zuluftbetrieb wird deshalb die Luft direkt in den Fahrraum eingeblasen. Der Öffnungswinkel der Klappe, relativ zur Tunnel-längsachse, beträgt 18.5°.



Abbildung 4.1 Geöffnete Abluftklappe vom Kanal aus gesehen

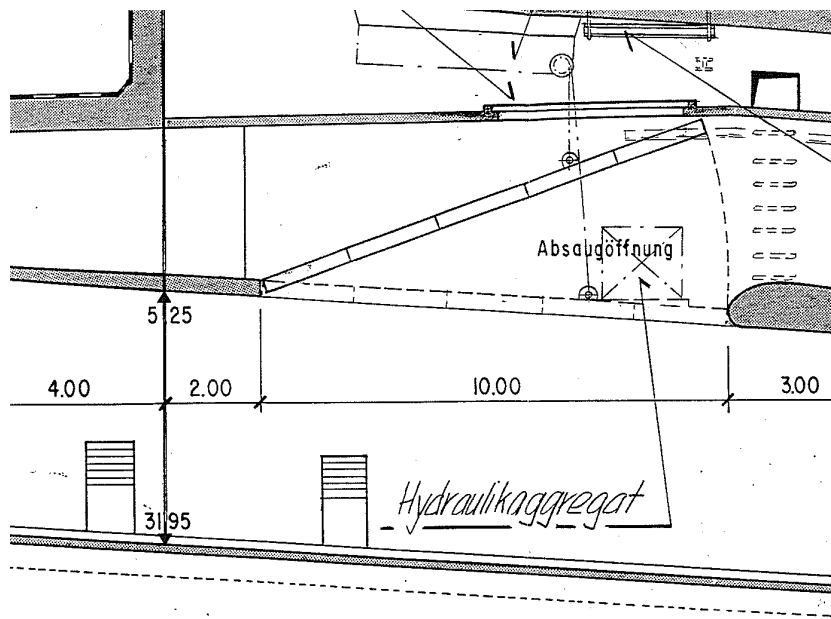


Abbildung 4.2 Abluftklappe Längsschnitt

Aufgrund der grossen Steigung bestehen starke Auf- und Abtriebsströmungen, welche im Brandfall abzubremsen wären. Somit kann auch direkt die Eignung einer Saccardo-Düse für den praktischen Einsatz der Brandlüftung beurteilt werden.

## 4.3 Durchführung der Messungen

### 4.3.1 Versuchsaufbau

Im Crapteig Tunnel besteht die Möglichkeit, mit geringem Aufwand ein Modell einer Saccardo-Düse in die Öffnung für die Abluftklappe zu bauen und den entsprechenden Ventilator im Zuluftbetrieb zu fahren. Zudem können auch die Möglichkeiten der Beeinflussung der Längsströmung mit der bestehenden Lüftungsanlage (Abluftklappe, Deckenschlitze, Zuluftpfeifen) untersucht werden.

Die beiden Abluftklappen befinden sich in Abständen von ca. 150 m zu den Portalen. Die Luftströmungsmessung im Fahrraum erfolgt an zwei Querschnitten mit jeweils 3 Punktmessgeräten (Fabrikat ACP). Der Mittelwert der 3 Punktmesswerte ergibt den massgebenden Messwert. Eine Kalibrierung dieser Messgeräte erfolgte mit einer Netzmessung am 19./20.05.2009 im Rahmen der beschriebenen Versuche.

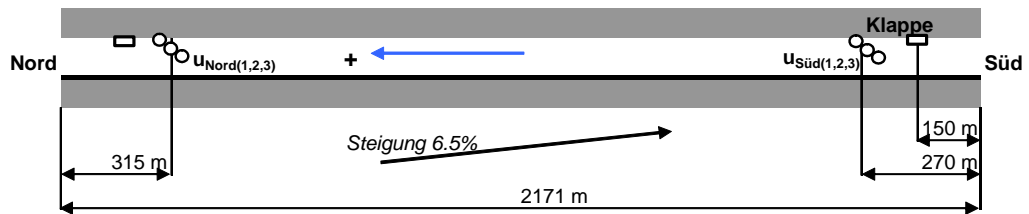


Abbildung 4.3 Schema Crapteig Tunnel

Bei der Messung am 20.05.2009 wurde zusätzlich die Luftströmung zwischen der Klappe und dem Südportal mit einem provisorisch installierten Anemometer an einem Punkt erfasst.

Die Zu-/Abluftventilatoren haben keine installierte Volumenstrommesseinrichtung. Für den Zuluftbetrieb über die Deckenschlitze wird der Nennvolumenstrom von  $95 \text{ m}^3/\text{s}$  angenommen, für den Betrieb über die offene Klappe  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , abgeschätzt anhand einer überschlagsmässigen Auslegung mit der vorhandenen Ventilator Kennlinie und der gemessenen Leistungsaufnahme.

Die Temperaturen im Tunnel wurden an 5 Orten mittels Thermometern mit Dataloggern, der barometrische Druck für die Bestimmung der Luftdichte manuell erfasst.

Drücke, welche die Längsströmung beeinflussen, wurden mit einem mobilen Strahlventilator mit folgenden Kennwerten simuliert.

Laufraddurchmesser	1.25 m
Leistung:	117 kW (Benzinmotor)
Volumenstrom:	58 m <sup>3</sup> /s
Ausblasgeschwindigkeit:	ca. 48 m/s (berechnet)
Standschub:	ca. 2600 N (berechnet, bei $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ )



Abbildung 4.4 Mobiler Strahlventilator des Tiefbauamts Graubünden

### 4.3.2 Vergleich verteilte Zuluft zu Punkt-Zuluft

Am 27.04.2009 wurden die Möglichkeiten der Beeinflussung der Längsströmung mit der bestehenden Lüftungsanlage ausgetestet:

Abbremsen einer Längsströmung mit der verteilten Zuluft über die Zuluftpfeifen senkrecht zur Tunnellängsachse.

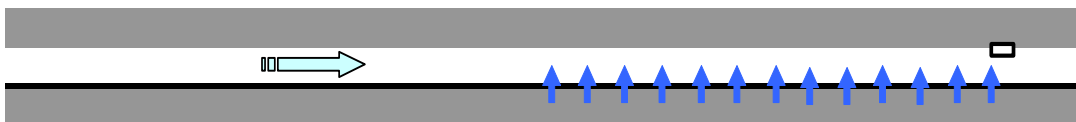


Abbildung 4.5 Abbremsen einer Längsströmung mit verteilter Zuluft ohne Längsimpuls

Abbremsen und Umkehren einer Längsströmung mit der verteilten Zuluft über die Deckenschlitze mit Impuls in Tunnellängsachse.



Abbildung 4.6 Abbremsen einer Längsströmung mit verteilter Zuluft mit Längsimpuls

Abbremsen und Umkehren einer Längsströmung mit Punkt-Zuluft aus der Klappenöffnung (mit unbekannter Strahlgeometrie)



Abbildung 4.7 Abbremsen einer Längsströmung mit Punkt-Zuluft aus der Klappenöffnung

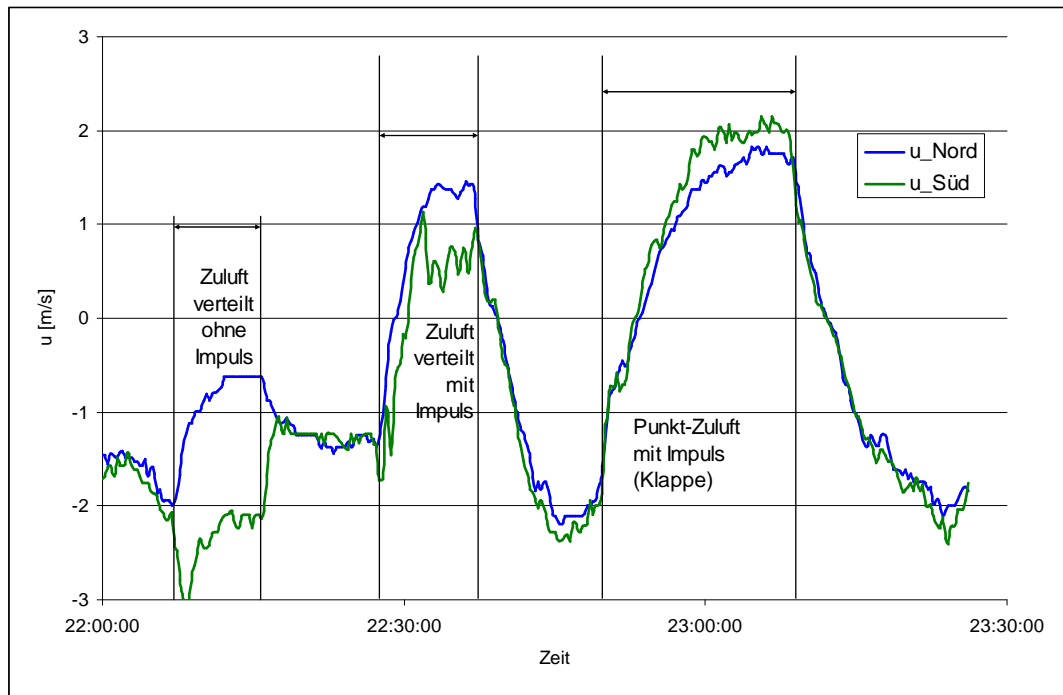


Abbildung 4.8 Messungen mit verteilter und Punkt-Zuluft am 27.04.2009

### 4.3.3 Messungen mit der Saccardo-Düse

Die Saccardo-Düse wurde provisorisch in die Klappenöffnung beim Südportal eingebaut. Sie wurde aerodynamisch möglichst günstig als Holzkiste ausgeführt, um eine definierten Strahl zu erreichen. Dabei wurde insbesondere auf folgende Punkte geachtet:

- Einströmdüse
- Genügende Länge für die Ausbildung einer parallelen, beruhigten Strömung
- Abrisskante

Einbau, Messungen und Ausbau erfolgten jeweils während einer Nachtsperung. Dafür mussten Kompromisse eingegangen werden, z. Bsp. ragt das Düsenmodell ins Licht- raumprofil, was bei einer realen Ausführung natürlich nicht zulässig wäre.



Abbildung 4.9 Seitenansicht der Saccardo-Düse aus Holz



Abbildung 4.10 Saccardo-Düse im Fahrraum-Querschnitt

Die Strömungsgeschwindigkeit in der Saccardo-Düse wurde über die Messung des dynamischen Drucks mit einem Prandtl-Rohr ermittelt.

Am 01.05.2009 wurde die natürliche Auftriebsströmung mit der Saccardo-Düse abgebremst und umgekehrt.



Abbildung 4.11 Abbremsen einer Längsströmung mit Saccardo-Düse

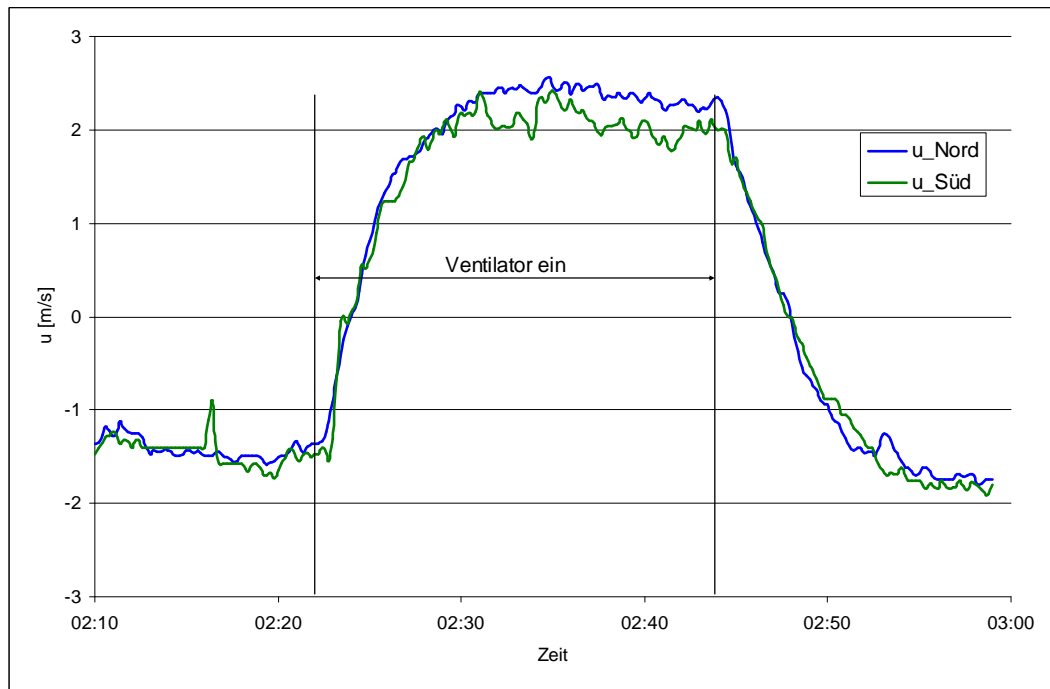


Abbildung 4.12 Messungen mit der Saccardo-Düse am 01.05.2009

Am 20.05.2009 wurde zuerst die natürliche Strömung in Richtung Nord mit der Saccardo-Düse weiter angetrieben und verstärkt. Danach wurde die Strömung mit dem mobilen Strahlventilator umgekehrt in Richtung Süd. Diese wurde wiederum mit der Saccardo-Düse abgebremst und umgekehrt.



Abbildung 4.13 Antreiben einer Längsströmung mit Saccardo-Düse

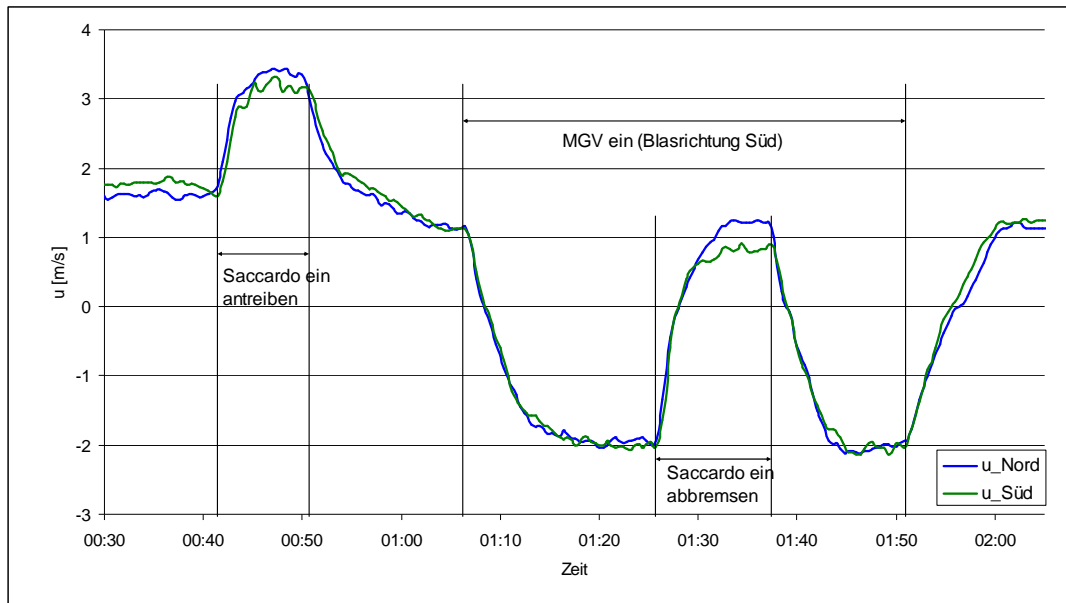


Abbildung 4.14 Messungen mit der Saccardo-Düse am 20.05.2009

Gleichzeitig war eine 5 x 5 Punkt Netzmessung in einem Abstand von ca. 60 m nördlich der Klappe, und somit im Strahlbereich der Saccardo-Düse, installiert. Damit erfolgte eine Kalibration der eingebauten Luftströmungsmessungen, d.h. die Ermittlung von Korrekturfaktoren so, dass die Messwertwerte übereinstimmen.

Zur Visualisierung des Strahls wurde in den Austrittsquerschnitt Rauch eingeblasen.



Abbildung 4.15 Strömungsbild Saccardo-Düse mit Rauchblasung

### 4.4 Auswertung

Die Messungen wurden mit einem eindimensionalen Simulationsprogramm (Equa RTV) nachgerechnet. Darin ist das in Kap. 2.3.2 bzw. in der Literatur [20] beschriebene Berechnungsmodell umgesetzt.

Folgende Parameter sind vorgegeben:

Tunnel:  
 Länge: 2171 m  
 Querschnittsfläche: 60 m<sup>2</sup>  
 Hydr. Durchmesser: 7 m  
 Lambda (Reibung): 0.03

Verteilte Einblasung senkrecht  
 Einblaswinkel: 90°  
 Volumenstrom: 100 m<sup>3</sup>/s  
 Einblasung über Länge: 1050 m

Verteilte Einblasung gerichtet  
 Einblaswinkel: ca. 30°  
 Volumenstrom: 95 m<sup>3</sup>/s  
 Einblasung über Länge: 1050 m  
 Strahlquerschnitt unbekannt  
 (Drosselemente gemäss Abbildung 3.6)

Punkt Einblasung mit offener Klappe  
 Einblaswinkel: ca. 20° (Annahme)  
 Volumenstrom: 100 m<sup>3</sup>/s (Annahme)  
 Strahlquerschnitt unbekannt

Saccardo-Düse  
 Einblaswinkel: 15°  
 Einblasgeschwindigkeit: ca. 25 m/s (Punktmessung im Austritt)  
 Düsenquerschnitt: 4.65 x 0.65 m  
 Volumenstrom: ca. 75 - 80 m<sup>3</sup>/s (Annahme)

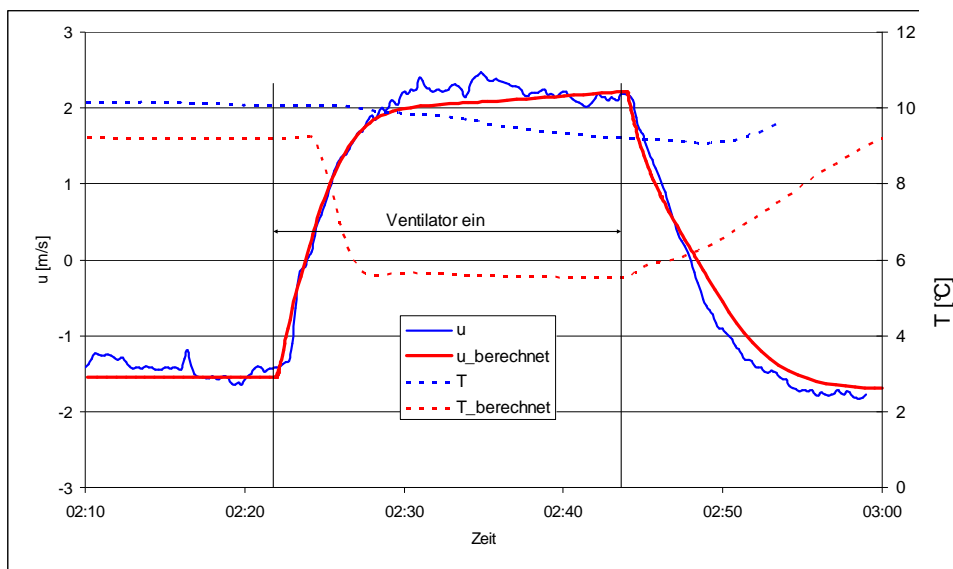


Abbildung 4.16 Messung und Nachrechnung 01.05.2009 Saccardo-Düse  
 u: Luftströmungsgeschwindigkeit [m/s]  
 T: Lufttemperatur [°C]

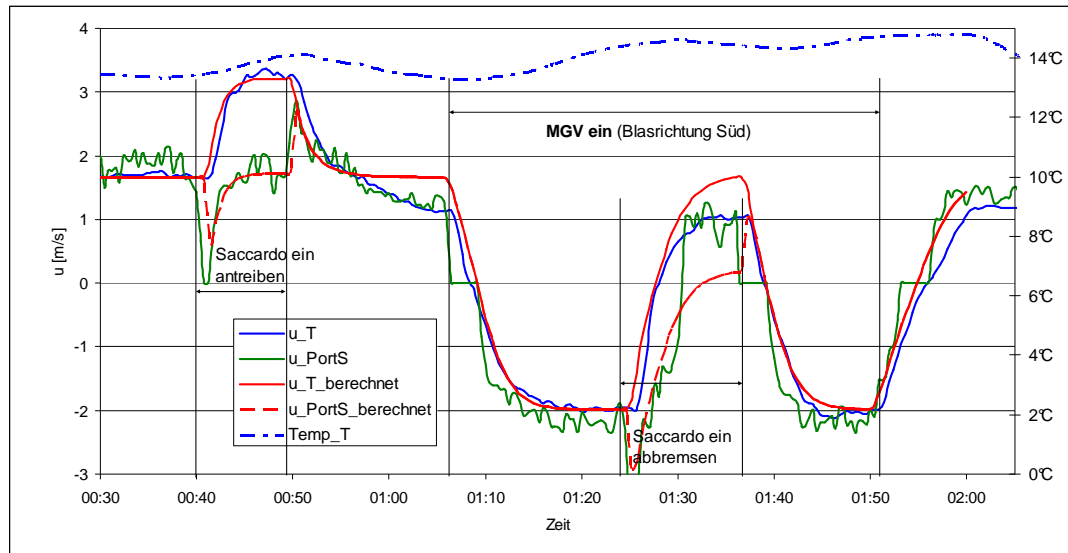


Abbildung 4.17 Messung und Nachrechnung 20.05.2009 Saccardo-Düse  
 u: Luftströmungsgeschwindigkeit [m/s]  
 T: Lufttemperatur [°C]  
 \_PortS: vor dem Südportal  
 \_T: im Tunnelinnern

Die Nachrechnung bestätigt grundsätzlich die Richtigkeit des 1-D-Modells. Die ermittelten Parameter sind:

Strahlquerschnitt: = Düsenquerschnitt (Annahme)  
 Impulsumsetzungskoeffizient  $k_{MX}$ : 0.8

Bei der Nachrechnung der Messung vom 20.05.2009 ergeben sich Diskrepanzen für den Fall ‚Abbremsen und Umkehren der Strömung im Tunnel‘:

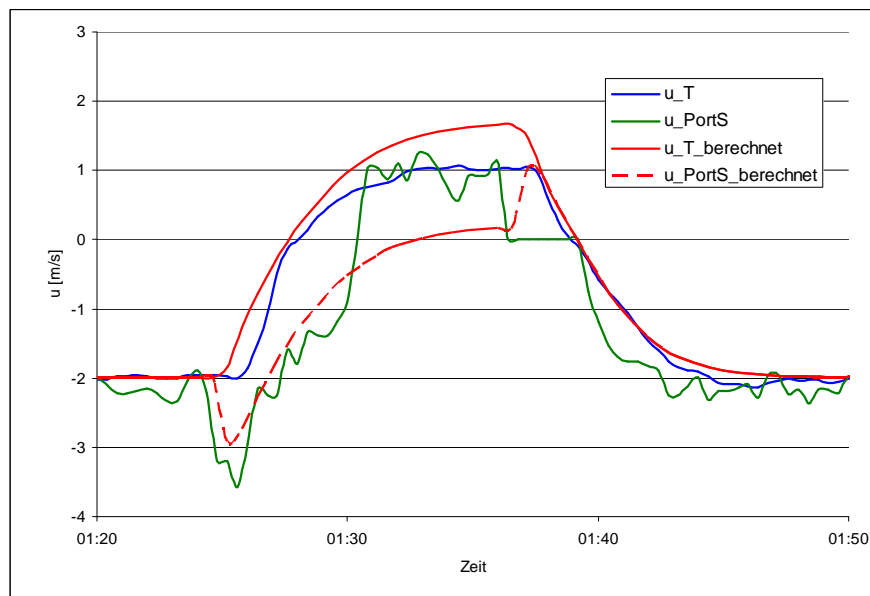


Abbildung 4.18 Messung und Nachrechnung 20.05.2009, Abbremsen und Umkehren Saccardo-Düse (Legende siehe Abbildung 4.17)

Das Abbremsen und Umkehren der Strömung kann qualitativ für alle Verfahren verglichen werden:

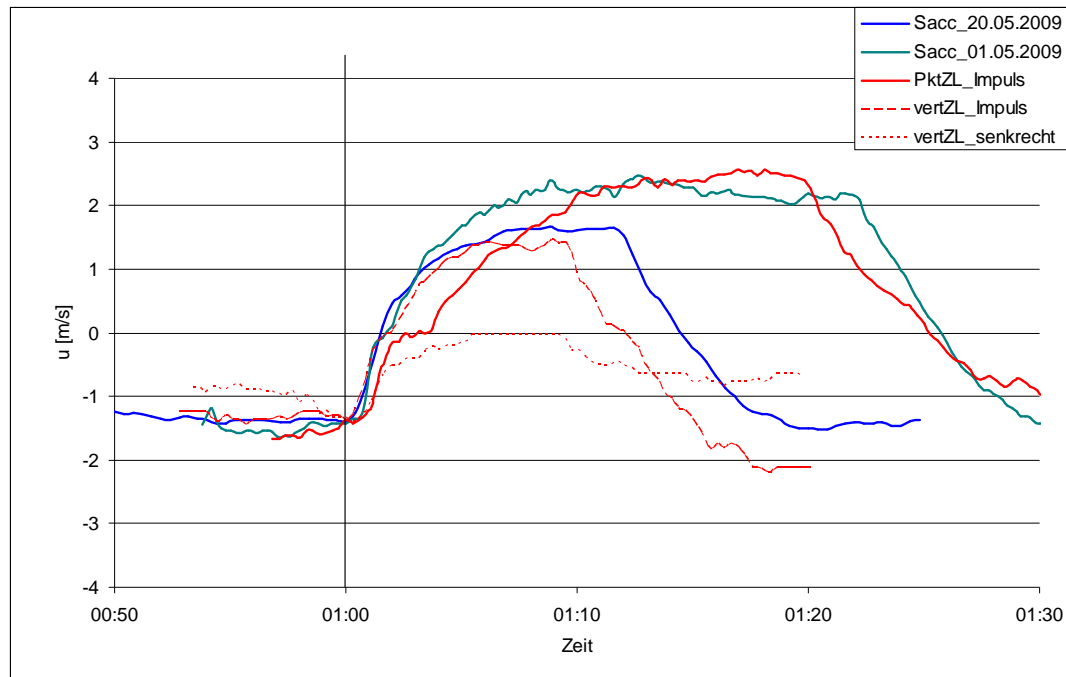


Abbildung 4.19 Abbremsen und Umkehren, Vergleich der Messungen

Sacc: Saccardo-Düse

PktZL: Punkteinblasung Zuluft

vertZL: Verteilte Einblasung Zuluft

Bei den Luftströmungsgeschwindigkeiten interessiert der Wert ausserhalb des Bereichs der Einblasung. Darum ist hier bei den Verfahren mit verteilter Einblasung die Luftströmungsgeschwindigkeit Nord dargestellt, bei den Verfahren mit Punkteinblasung der Mittelwert der Luftströmungsgeschwindigkeiten Nord und Süd, welche ja theoretisch gleich sind.

Die Werte sind in Abbildung 4.19 einheitlich auf die Grundströmung 1.4 m/s bezogen. Für die Werte bei höherer Grundströmung 2 m/s (verteilter Zuluft senkrecht, Punkteinblasung mit Impuls/offene Klappe, Saccardo 20.05.2009) ist die Darstellung physikalisch nicht ganz korrekt, die erreichten Werte in Gegenblasrichtung wären geringfügig höher als dargestellt. Trotzdem ist diese Darstellung für einen qualitativen Vergleich sinnvoll.

Folgende Aussagen können gemacht werden:

- Erwartungsgemäss ist die Wirksamkeit von Saccardo-Düsen am besten, und diejenige von senkrecht eingeblasener verteilter Zuluft am schlechtesten. Die verteilte Zuluft mit Impuls liegt dazwischen.
- Die Wirkung der Saccardo-Düse ist nicht messbar besser als mit ‚offener‘ Klappe. Die Strahlgeometrie bei offener Klappe stellt sich offenbar so ein, dass eine Düsenwirkung erreicht wird. Wegen dem geringeren Druckverlust wird bei gegebenem Ventilator ein höherer Volumenstrom als mit der (strömungsoptimierten) Saccardo-Düse erreicht.

## 5 Simulationsrechnungen

### 5.1 1D-Simulationen

#### 5.1.1 Allgemeine Parametervariation

Mit den Formeln gemäss Kap. 2.3 wurden eindimensionale Simulationsrechnungen zur Darstellung des Einflusses der massgebenden Parameter durchgeführt. Diese sind im Kap. 12 dargestellt.

#### 5.1.2 Lage der Einblasstelle

Die Wirkung einer Einblasung im Hinblick auf die Beeinflussung der Längsströmung ist von der Lage der Einblasstelle in Bezug auf den Abschnitt, in welchem die geforderte Geschwindigkeit erreicht werden soll, abhängig:

- Eine Einblasung stromaufwärts treibt die Strömung zusätzlich an
- Eine Einblasung stromabwärts bremst, d.h. wirkt dem eingebrachten Impuls entgegen
- Für die Saccardo-Düse gilt also: ‚Stossen‘ ist wirksamer als ‚ziehen‘

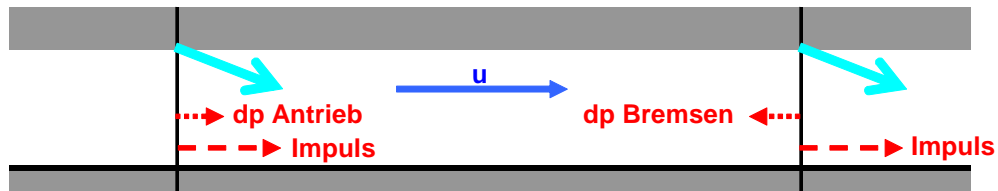


Abbildung 5.1 Einfluss der Lage der Einblasstelle

Dies ist der wesentlichste Unterschied zwischen einer Saccardo-Düse und einem Strahlventilator, welcher nur Impuls einbringt.

Dies wird mit den nachstehenden 1D-Simulationen beispielhaft dargestellt für einen Tunnel mit einer Länge von 8250 m, einer Querschnittsfläche von 50 m<sup>2</sup>, durchgehend mit stehenden Personenwagen und 10% Lastwagen auf 2 Fahrspuren gefüllt.

Die Parameter der Saccardo-Düse sind bei dieser Simulation konstant. Ein Volumenstrom von 180 m<sup>3</sup>/s wird mit einer Geschwindigkeit von 35 m/s unter einem Winkel von 15° eingeblasen. Nur die Position der Einblasstelle wird variiert, und mit einer Einblasung mit den gleichen Parametern, aber einem Einblaswinkel von 90° verglichen.

#### 5.1.3 Antrieb bei durchgehender Längslüftung

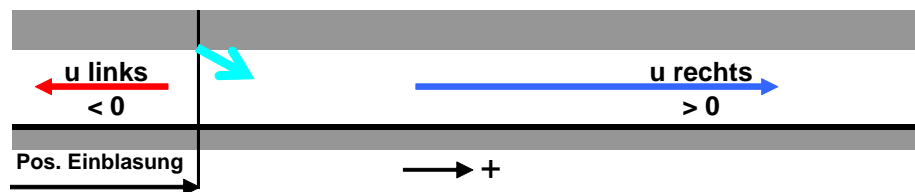


Abbildung 5.2 Tunnelschema Längslüftung mit Lage der Einblasstelle

Bei Antrieb einer Längsströmung (gemäss Abbildung 1.1) ergeben sich je nach Position der Einblasstelle folgende Verhältnisse:

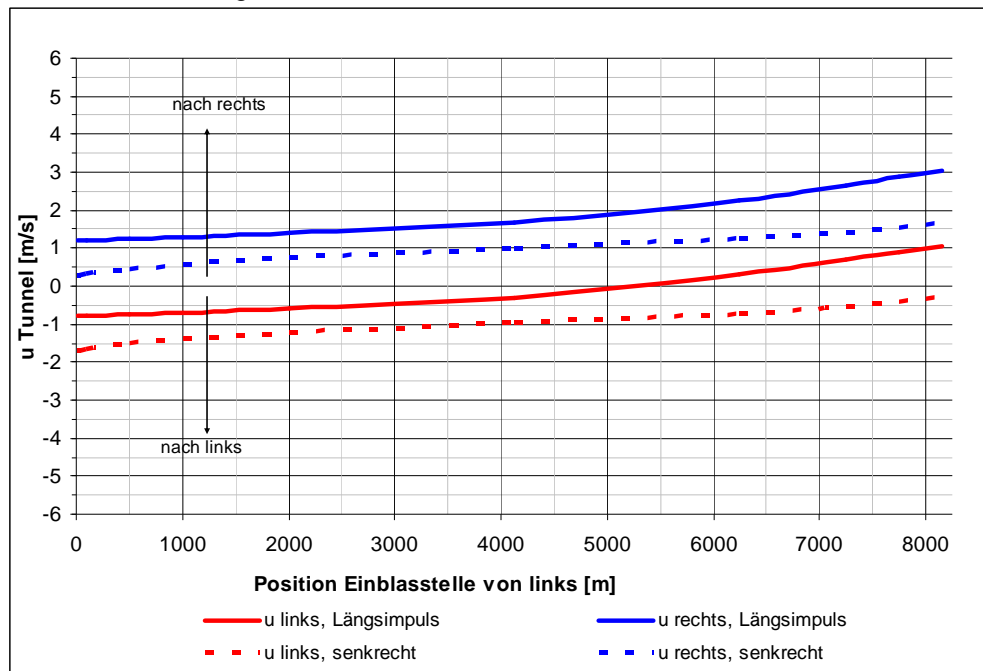


Abbildung 5.3 Antreiben einer Längsströmung in Abhängigkeit der Einblasstelle

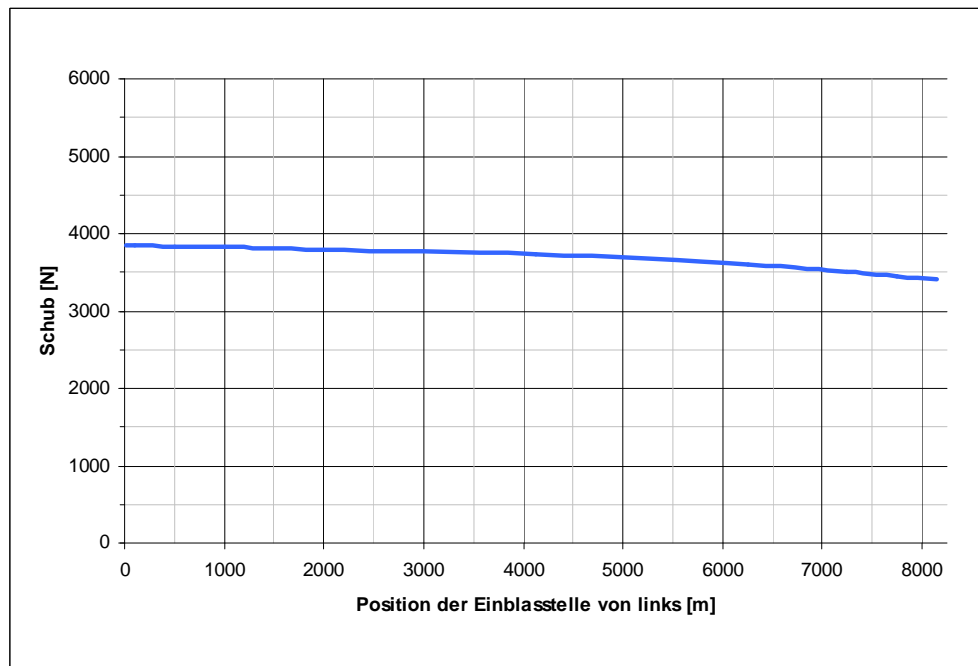


Abbildung 5.4 Schub der Saccardo-Düse in Abhängigkeit der Einblasstelle

Für die Längslüftung des Tunnels (ohne Gegendruck), d.h. wenn eine möglichst hohe Luftströmungsgeschwindigkeit im Tunnel angestrebt wird, soll die Einblasung möglichst am linken Tunnelportal erfolgen.

### 5.1.4 Abbremsen bei durchgehender Längslüftung

Mit einem zusätzlichen Gegendruck von 200 Pa am rechten Portal würde sich eine ungewollte Längsströmung nach links einstellen. Für diesen Fall dient die Saccardo-Düse zum Abbremsen dieser Strömung (gemäss Abbildung 1.2). Dann ergibt sich folgende Situation:

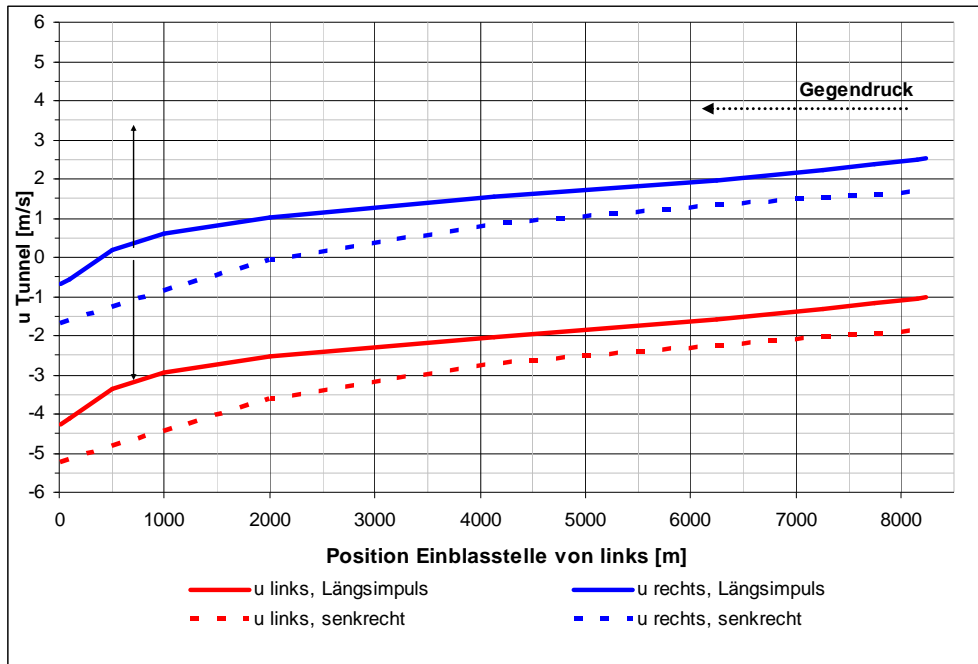


Abbildung 5.5 Abbremsen/Strömungsblockade in Abhängigkeit der Einblasstelle, mit Gegendruck

Auch hier wird das Ziel, nämlich das Abbremsen der vorhandenen Längsströmung im Tunnel auf niedrige Geschwindigkeiten, mit der Einblasung möglichst am linken Tunnelportal erzielt.

### 5.1.5 Lage der Einblasstelle in Kombination mit Absaugung

Mit dem gleichen Modell und Parametern der Einblasung wie bei der Längslüftung, aber zusätzlich einer Absaugung von 200 m<sup>3</sup>/s in Tunnelmitte, ergeben sich folgende Bedingungen.

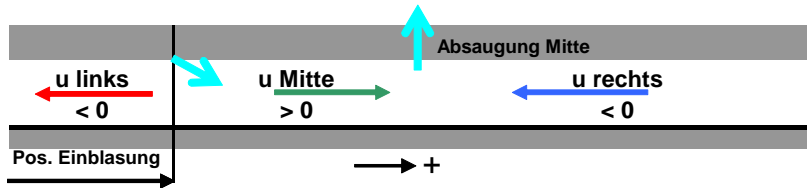


Abbildung 5.6 Tunnelschema mit Einblasstelle links der Absaugung

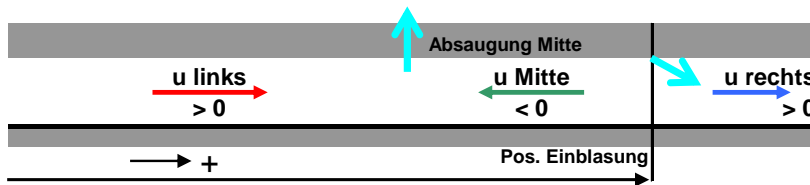


Abbildung 5.7 Tunnelschema mit Einblasstelle rechts der Absaugung

Am (theoretischen) Beispiel eines Richtungsverkehrstunnels mit Absaugung soll hier links der Absaugstelle eine möglichst hohe Luftströmungsgeschwindigkeit zur Absaugung hin erreicht werden, d.h. *u Mitte* in Abbildung 5.6 und *u links* in Abbildung 5.7 soll mit den gegebenen Parametern der Einblasung möglichst gross sein.

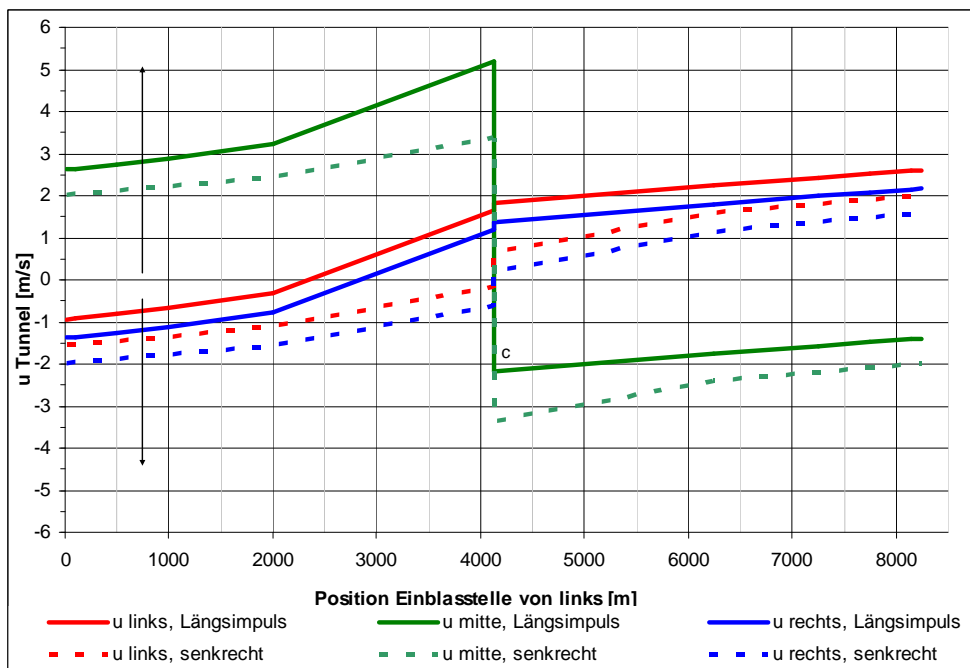


Abbildung 5.8 Absaugung in Tunnelmitte mit Antrieb durch Zuluft, ohne Gegendruck

Ohne Einblasung würde sich eine symmetrische Zuströmung von 2 m/s von beiden Seiten zur Absaugstelle in Tunnelmitte (4125 m) einstellen. Je näher sich die Einblasstelle vor der Absaugung befindet, desto höher wird die erreichbare Geschwindigkeit *u Mitte* zur Absaugung hin.

Im Bereich rechts der Absaugstelle wird *u links* betrachtet. In einem Bereich der Einblasung zwischen Absaugstelle und ca. 5000 m ist der Einfluss der Einblasung sogar negativ, d.h. es werden kleinere Geschwindigkeiten zur Absaugung hin als ohne Einblasung erreicht.

Bei Variantenuntersuchungen für den Seelisbergtunnel [17] wurde dieser Effekt bereits berechnet. Je nach Position der Absaugung ist die Saccardo-Düse oder die verteilte Zu- und Abluft wirksamer (d.h. energieeffizienter). Wenn der Brand in unmittelbarer Nähe bei den punktuellen Zuluftinblasungen liegt, oder bei wenigen Fahrzeugen im Tunnel, ist die gerichtete Zuluft effizienter als die verteilte Zu- und Abluft. In den Fällen, wo der Brand weit entfernt von den gegebenen Zuluftinblasungen liegt und viele Fahrzeuge gestaut sind, ist die verteilte Zu- und Abluft effizienter, da sie näher am Brandort eingesetzt werden kann.

## 5.2 CFD-Simulationen

### 5.2.1 Grundlagen

Mit einer zwei- (2D) und dreidimensionalen (3D) Berechnung der Strömungsprofile können die lokal auftretenden Geschwindigkeiten beurteilt werden. Diese interessieren aus folgenden Gründen:

- Lokal hohe Geschwindigkeiten an der Tunneldecke, Wänden und Fahrbahn bedeuten grosse Verluste
- Lokal hohe Geschwindigkeiten können Verkehrsteilnehmer, insbesondere Motorräder, negativ beeinflussen.

Zudem kann auch das instationäre Verhalten der Geschwindigkeitsverteilungen und weiterer Grössen berechnet werden.

Die 2D- und 3D- Simulationen wurden mit dem Programm „ANSYS CFX“ [24] durchgeführt. Dieses Programm ist ein weit verbreitetes, kommerzielles CFD-Programm, mit welchem verschiedenste strömungsmechanische Probleme simuliert und gelöst werden können. Es beinhaltet einen Solver sowie einen Pre- und Post-Prozessor. „ANSYS CFX“ erlaubt die Modellierung von sowohl stationären als auch von instationären Strömungen (zeitlich variabel). Im Weiteren können unter anderem laminare und turbulente Strömungen, Wärmeübertragungsphänomene, Auftrieb durch Dichteunterschiede, Mehrphasenströmungen und Verbrennungsprozesse modelliert und simuliert werden.

## 5.2.2 2D-Simulationen

2D-Simulationen wurden durchgeführt, um gegenüber 3-D Simulationen Zeit und Rechenaufwand zu sparen. Die 2D-Simulationen sind im Kap. 13 detailliert dokumentiert, mit folgenden Erkenntnissen:

- Der Unterschied des Wirkungsgrads  $\eta$  zwischen 2D und 1D Berechnungen ist sehr klein. Das heisst, dass die Wandreibungsverluste in der Umgebung der Einblasung im Vergleich zu den Verlusten im übrigen Teil des Tunnels sehr gering sind.
- Für den Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“ ist die statische Druckerhöhung, welche in den 2D Berechnungen mit dem Saccardo System erzielt wird, geringer als die der 1D Berechnungen. Erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Einblasung führen zu Verlusten, welche mit den 1D Berechnungen nicht berücksichtigt werden.
- Für den Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“ sind die mittlere Strömungsgeschwindigkeiten deutlich kleiner als die Ergebnisse der 1D Berechnungen.
- Auch für den Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung“ ist die statische Druckerhöhung geringer als bei den 1D Berechnungen. Der Unterschied zwischen 2D und 1D Berechnungen ist aber in diesem Fall geringer als bei den anderen Fällen.

## 5.2.3 3D-Simulationen

Die 3D-Simulationen sind im Kap. 14 detailliert dokumentiert.

3D-Simulationen ermöglichen es komplexere Strömungsstrukturen darzustellen als 2D-Simulationen. Im Zusammenhang mit dem vorliegenden Forschungsprojekt ist hierbei im Speziellen interessant, wie sich mehrere Saccardo-Düsen im Zusammenspiel verhalten und welche 3D Effekte (3 dimensionale Wirbelstrukturen) sich einstellen. Diese 3D Effekte sind besonders wichtig für diejenigen Fälle, in welchen der Strahl umgelenkt wird. Durch die Umlenkung können sich starke sekundäre Wirbelstrukturen ausbilden, welche dann lokal zu hohen Geschwindigkeiten führen.

Die im Rahmen des Forschungsprojekts ausgeführten Berechnungen bilden den Fall von 3 nebeneinander positionierten Düsen ab, welche sich im einen Fall nahe dem Einfahrtsportal, im anderen Fall nahe dem Ausfahrtsportal befinden. Damit werden die beiden Einbausituationen abgebildet, was einem unterschiedlichen Widerstand vor und nach der Einblasung entspricht. Untersucht wurden die drei Fälle „Antrieb der Längsströmung“, „Abbremsen“ und „Blockieren“, d.h. der Übergangspunkt zwischen Abbremsen und Antrieb

Für den Fall „Abbremsen“ wurde zu Vergleichszwecken ein System mit Strahlventilatoren betrachtet, welches über denselben Einblaswinkel wie die Saccardo-Düsen verfügt, im Gegensatz dazu aber einen Lufteinlass besitzt, durch welchen die eingeblasene Luft angesaugt wird. In der Praxis sind solche Systeme mit schräger Einblasung auch als „Banana-Jets“ bekannt.

Ausgewertet werden in allen Fällen die Luftgeschwindigkeiten in Verkehrsrichtung und die Geschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung, jeweils in einer vertikalen Ebene in der Tunnelmitte und in der horizontalen Eben in 1.5 m Höhe über der Fahrbahn. Somit ist es möglich festzustellen, ob und allenfalls wo hohe Luftgeschwindigkeiten herrschen, welche für die Tunnelbenutzer, insbesondere Lastwagen mit grosser Angriffsfläche oder Motorradfahrer, gefährlich sein könnten.

Für den Fall des „Antriebs der Längsströmung“ bleibt der Strahlkern der Düsen über eine Distanz von ca. 15 m bis 20 m bestehen, bleibt jedoch nahe der Tunneldecke. Für den Fall der Düsen nahe dem Ausfahrtsportal bleibt der Strahl länger bestehen (durch den kleineren Widerstand, welcher den Strahl beeinflusst) und führt somit auch zu leicht höheren Geschwindigkeiten in Fahrtrichtung in einer Höhe von 1.5 m über der Fahrbahn. Die Quergeschwindigkeiten sind in beiden Fällen kleiner als 4 m/s, was keiner Gefährdung der Verkehrsteilnehmer entspricht.

In Gegenwart einer Strömung entgegen der Einblasrichtung der Düsen („Abbremsen“) wird der Strahl auf wenigen Metern umgelenkt, was dazu führt, dass sich in 1.5 Metern Höhe über der Fahrbahn Regionen mit deutlich höherer Längsgeschwindigkeit ausbilden. Hohe Geschwindigkeiten treten einerseits dort auf, wo der Strahl diese Ebene durchbricht, andererseits in Hauptströmungsrichtung gesehen hinter diesen Punkten, wo sich sekundäre Strukturen ausbilden. In der Richtung quer zur Fahrtrichtung treten ebenfalls höhere Geschwindigkeiten auf, als für den Fall „Antrieb der Längsströmung“. Lokal werden Geschwindigkeiten von bis zu 8 m/s erreicht, vor allem in den Bereichen, wo der Strahl seitlich umgelenkt wird.

Das Blockieren der Strömung ergibt eine Situation ähnlich zum Fall „Antrieb der Längsströmung“, da der Strahl weitgehend ungestört einbläst und die Strömung erst nach der Impulsübertragung umgelenkt wird. Durch den grösseren Gegendruck wird der Strahl stärker abgebremst, weshalb sich in der Ebene 1.5 m über der Fahrbahn kleinere Geschwindigkeiten einstellen. Auch in Querrichtung ergeben sich deswegen kleinere Geschwindigkeiten. Es müssten sich aber in grösserer Höhe wiederum etwas grössere Geschwindigkeiten einstellen.

Um die Gefährdung der Tunnelbenutzer durch Saccardo-Düsen abschätzen zu können wurde die ähnliche Situation mit Strahlventilatoren mit schrägen Schalldämpfern („Banana-Jets“) berechnet. Diese Berechnungen zeigen ein grundsätzlich ähnliches Resultat, das heisst die auftretenden Geschwindigkeiten sind für beide Varianten zur Strömungsbeeinflussung ähnlich. Es kann daraus also geschlossen werden, dass Saccardo-Düsen keinen stärkeren Einfluss auf Verkehrsteilnehmer haben als Banana-Jets, wobei bei diesen die Ansaugung von Luft zu einer etwas stabileren und symmetrischeren Strömungssituation führt, was aber nur klein- oder mittelskalige Effekte sind.

## 6 Vergleich der Verfahren

### 6.1 Übersicht

Ein qualitativer, grober Vergleich der Verfahren ist in folgender Tabelle dargestellt:

	Mit Impuls				Ohne Impuls			
	Strahl-ventilatoren	Punktuelle Zuluft Impuls	verteilte Zuluft Impuls	Abluft (konzentrierte Absaugung)	Punktuelle Zuluft senkrecht	verteilte Zuluft senkrecht	Luft-Vorhang	Mechanischer Vorhang
Wirksamkeit Beschleunigen	+	+	+	0	0	0	-	-
Wirksamkeit Bremsen	+	+	+	0	0	0	0	+
Regelbarkeit	0	0	0	+	+	+	-	-
Redundanz	+	0	-	0	0	0	0	+
Einfache Planung	+	0	0	+	0	0	-	0
Betriebserfahrung	+	+	0	+	0	+	-	-
Investition Gewölbe-QS	+	-	-	-	-	-	-	0
Investition Rechteck-QS	-	+	-	-	+	-	-	0
Unterhalt	-	+	0	0	+	0	0	-
<b>Gesamtbeurteilung</b>	<b>+</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>--</b>	<b>-</b>

Tabelle 6.1 Grober Vergleich aller Verfahren zur Beeinflussung der Längsströmung

Für typische Anwendungen sind lediglich die beiden Verfahren mit punktueller Impulseinbringung, d.h. Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen, geeignet. Andere Verfahren bieten sich nur an, wo sie ohne grösseren Mehraufwand mit bereits bestehenden Lüftungsanlagen angewendet werden können. Dies trifft insbesondere auf Querlüftungsanlagen (verteilte Zu- und Abluft) bei bestehenden Tunneln mit mehreren Lüftungsabschnitten und grossen Luftmengen zu.

## 6.2 Vergleich von Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen

### 6.2.1 Anwendung

Der Unterschied zwischen einer Saccardo-Düse und einem Strahlventilator in der Wirkung auf die Längsströmung im Tunnel ist das Einbringen eines zusätzlichen Massenstroms in den Tunnel bei einer Einblasung. Dies ist in Kap. 5.1 dargestellt.

Der Wirkungsgrad einer Saccardo-Düse wird, neben der Schubumsetzung im Tunnel (welche derjenigen eines Strahlventilators vergleichbar ist), durch die Druckverluste der Zuluftzentrale bestimmt.

Im Idealfall einer direkten Ansaugung von aussen durch einen in der Tunneldecke untergebrachten Zuluftventilator entspricht die Saccardo-Düse, welche sich direkt am Portal befindet, physikalisch einem Strahlventilator mit Strahlumlenkung. In Abbildung 5.3, Abbildung 5.5 und Abbildung 5.8 würde die erreichbare Geschwindigkeit mit Strahlventilatoren im gesamten Tunnel dem Wert ‚u rechts, Längsimpuls‘ am linken Tunnelportal entsprechen, und ‚u links = u rechts‘. Zu berücksichtigen ist dabei, dass ein Strahlventilator am Tunnelportal, bei Ansaugung aus dem Freien und Einblasung ins Tunnelinnere, eine bessere Wirkung erzielt als ein Strahlventilator im Tunnel.

Wie im Kap. 3.3 dargestellt, liegt der ideale Winkel zwischen Strahl und Tunnellängsachse zwischen  $2^\circ$  (mit stehenden Lastwagen im Tunnel) und  $6^\circ$  (im leeren Tunnel). Während Strahlventilatoren als einfachste technische Lösung meist eine horizontale Strahlachse haben, sind bei Saccardodüsen je nach Einbausituation nur Winkel über  $10^\circ$  machbar.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Saccardo-Düsen und Strahlventilatoren ergibt sich aus der Anordnung unter Berücksichtigung der Redundanzen. Saccardo-Düsen werden in einzelnen Zentralen mit hohem baulichen Aufwand angeordnet, wobei im Idealfall der gesamte benötigte Schub an einem Ort aufgebracht wird. Strahlventilatoren dagegen können über der gesamten Tunnellänge verteilt werden, wobei die Gruppen in der Praxis zur Begrenzung der Kabellängen im Bereich der Zentralen angeordnet werden.

Für die Impulsumsetzung ist zwischen den Gruppen ein Abstand notwendig, der durch die Wurfweite des Strahls in der Grössenordnung von 50 – 80 m, bestimmt wird. In der Schweizer Richtlinie [1] werden deshalb zwischen Strahlventilator-Gruppen Abstände von 100 m gefordert. Dies gilt auch für Saccardo-Düsen.

Aus Redundanzgründen ist der Ausfall einer Saccardo-Düse bzw. einer Strahlventilatorgruppe zu berücksichtigen. Der Ausfall kann sich ergeben wegen:

- Nichtverfügbarkeit wegen Unterhalts- oder Reparaturarbeiten
- Störung der Stromversorgung
- Störung der Steuerung
- Mechanische Beschädigung (z. Bsp. durch Lastwagen mit Überhöhe)
- Beschädigung durch Brandeinwirkung
- Fehlende Einsetzbarkeit in Brandnähe, weil möglichst nicht in eine Rauchsicht einblasen werden sollte

Dies führt dazu, dass zwei Saccardo-Düsen geplant werden müssen, wobei eine die Anforderungen der die Auslegung erfüllen muss, entsprechend einer Redundanz von 100 %. Dies führt praktisch zu einer Verdoppelung der Investitionskosten. Bei Strahlventilatoren dagegen genügt eine zusätzliche Gruppe. Dieser Mehraufwand ist im Vergleich zu den gesamten Investitionskosten gering.

Im folgenden Beispiel wird ein Vergleich von Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen anhand von 1D-Vergleichsrechnungen für die Anwendung Richtungsverkehr ohne Stau dargestellt. Im Tunnel muss eine Luftströmungsgeschwindigkeit von 3 m/s erreicht werden, dabei wird ein Gegendruck von 10 Pa und ein zur Hälfte mit Fahrzeugen gefüllter Tunnel angenommen. Die Berechnungen sind für drei verschiedene Tunnellängen, nämlich 1 km, 3 km und 10 km durchgeführt.

Für die Saccardodüsen wurden die beiden Fälle mit Einblasung 100 m nach dem Einfahrtsportal („stossen“) und 100 m vor dem Ausfahrtsportal („ziehen“) betrachtet, wobei die Luftströmungsgeschwindigkeit von 3 m/s jeweils im Tunnelinnern massgebend ist. Die Saccardo-Düsen haben einen Winkel von 15° zur Tunnel längsachse. Für die Leistungsbe-  
 rechnung wurde jeweils zusätzlich zum Verlust der Düse ein Zentralendruckverlust von 300 Pa angenommen.

Die Strahlventilatoren sind auf mehrere Gruppen im Bereich der beiden Portale aufgeteilt, wobei Strahlventilatoren vom Typ 630 mit 320 N Standschub in 2er Gruppen verwendet werden.

Tunnellänge [km]	Strahlventilatoren		Saccardo-Düse nach Einfahrt			Saccardo-Düse vor Ausfahrt		
	Anzahl [-]	Leistung [kW]	Düsenfläche [m <sup>2</sup> ]	Strahl-geschwindigkeit [m <sup>3</sup> /s]	Leistung [kW]	Düsenfläche [m <sup>2</sup> ]	Strahl-geschwindigkeit [m <sup>3</sup> /s]	Leistung [kW]
1	10	101	5	22	108	5	28	194
3	21	210	7.5	25	230	7.5	33	441
10	58	590	15	28	601	15	44*	1813*

Tabelle 6.2 Vergleich der Auslegung der Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen

\*Bei einem 10 km langen Tunnel könnte die Anforderung mit der Saccardo-Düse vor der Ausfahrt nur mit sehr hohen Ausblasgeschwindigkeiten erreicht werden. Eine aus Redun-  
 danzgründen geforderte Saccardo-Düse müsste also praktischerweise weiter im Tunnel-  
 innern untergebracht werden.

### 6.2.2 Instationäres Verhalten

Dargestellt wird der zeitliche Verlauf nach dem Einschalten der Ventilatoren mit Nennlast für die 3 Fälle Strahlventilatoren (verteilt), Saccardo-Düse rechts und Saccardo-Düse links, bis die Längsströmung von 3 m/s (von links nach rechts) erreicht wird.

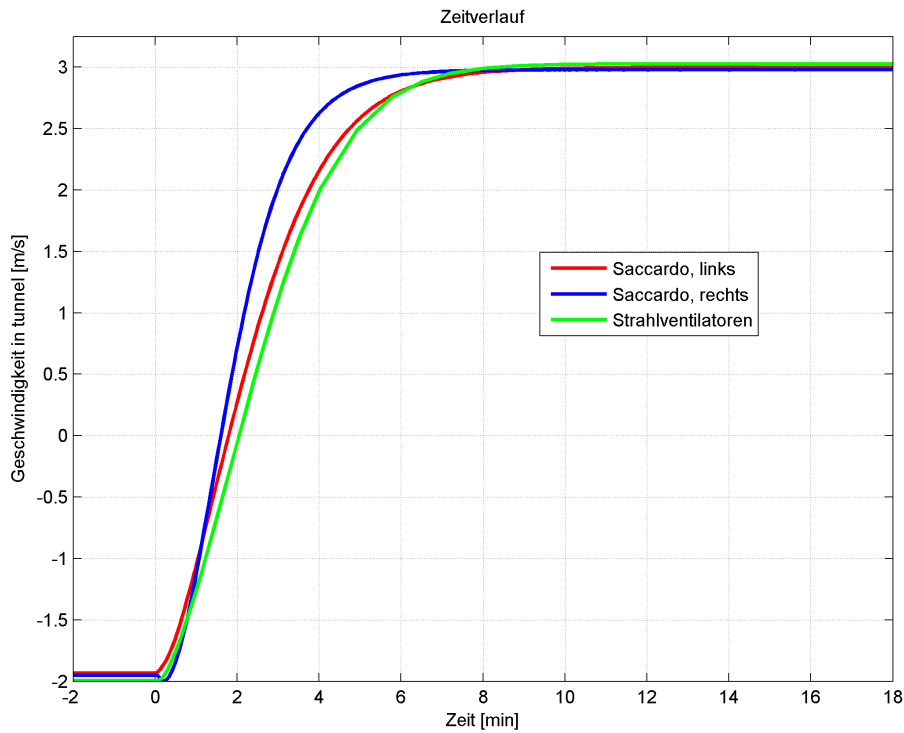


Abbildung 6.1 Instationäres Verhalten nach dem Einschalten, 1 km Tunnel

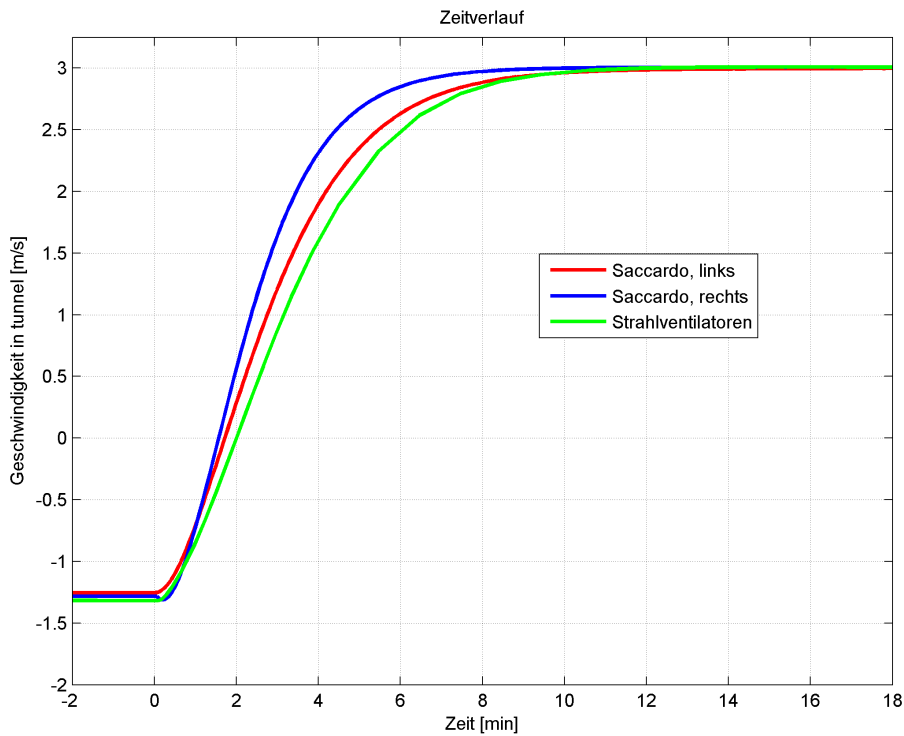


Abbildung 6.2 Instationäres Verhalten nach dem Einschalten, 3 km Tunnel



### 6.2.3 Druckaufbau

Dargestellt ist der Druckverlauf in der Tunnelröhre im stationären Zustand.

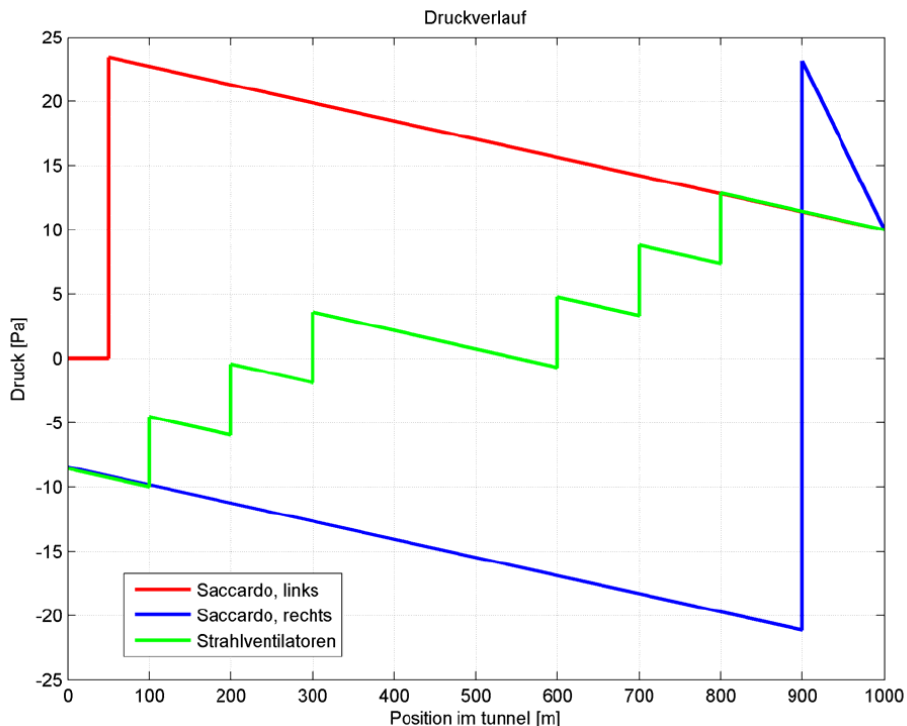


Abbildung 6.4 Druckverlauf, 1 km Tunnel

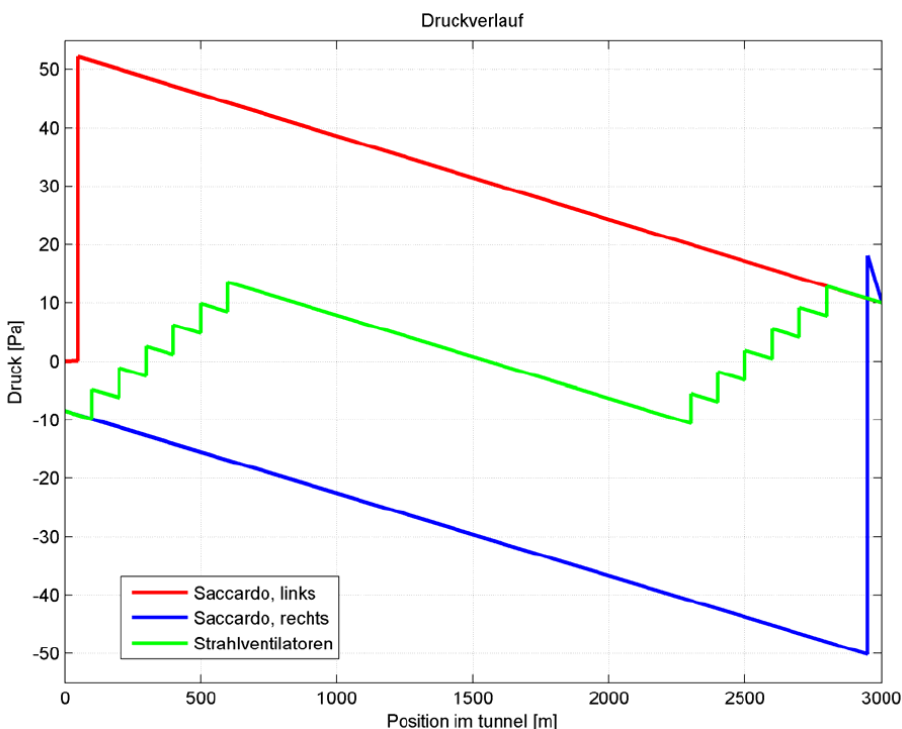


Abbildung 6.5 Druckverlauf, 3 km Tunnel

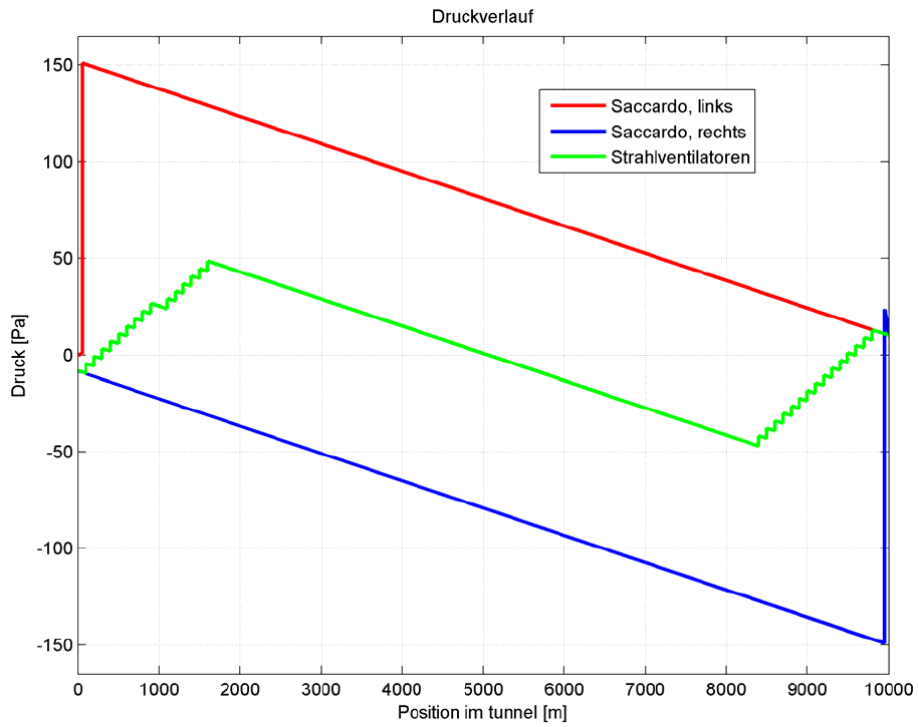


Abbildung 6.6 Druckverlauf, 10 km Tunnel

Bei längeren Tunneln treten sehr hohe Drücke auf, insbesondere bei der Anwendung von Saccardo-Düsen. Dadurch ergeben sich entsprechende Anforderungen an den Druckaufbau in der Gegenröhre, um Druckdifferenzen zwischen zwei Röhren zu beschränken. Zu hohe Druckdifferenzen können die Öffnung von Fluchttüren zwischen den Röhren beeinträchtigen.

## 7 Regelung

### 7.1 Problemstellung

Für die Brandlüftung in Tunneln mit Stau oder Gegenverkehr muss die Luftströmungsgeschwindigkeit im Fahrraum innerhalb eines engen Bereichs eingestellt werden. Dafür muss der Betrieb der Lüftungsanlage bei allen Verfahren mit Impuls geregelt werden. Dies ist mit einem hohen mess- und steuerungstechnischen Aufwand verbunden, wird aber heute als Stand der Technik beherrscht.

Das Ziel der Regelung ist, den gewünschten Strömungszustand im Fahrraum schnellstmöglich zu erreichen. Neben dem Ausgleich von quasistationären Randbedingungen müssen auch instationäre Störungen ausgeregelt werden. Von den in Kap. 1.1 aufgelisteten Kräften, welche auf die Luftströmung im Tunnel wirken, betrifft dies insbesondere Schwankungen des Verkehrs. Je länger der Tunnel, desto länger wird die Luftströmung nach dem Brandalarm noch von fahrenden Fahrzeugen beeinflusst. Demgegenüber sind mögliche Schwankungen des Winddrucks und des Brandauftriebs langsamer.

Die Regelung der Längsströmung im Fahrraum ist heute Stand der Technik. In der Praxis treten aber immer wieder Probleme auf, insbesondere da es in der Schweiz für Tunnellüftungen keine Qualitäts- und Prüfvorgaben gibt.

### 7.2 Anwendung

#### 7.2.1 Leit- und Stellwert

Als Leitwert der Regelung dient die Luftströmungsmessung im Fahrraum. Dadurch ergeben sich erhöhte Anforderungen an diese Luftströmungsmessungen. Der für die Regelung massgebende Wert ist aus 3 unabhängigen Messwerten zu bilden, welche einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden müssen.

Alle Rohwerte müssen mittels Kalibrierfaktoren so umgerechnet werden, dass alle kalibrierten Werte innerhalb einer Bandbreite den gleichen Massenstrom im Tunnel ergeben. Die Kalibrierfaktoren sind für jede Luftströmungsrichtung mit einer Netzmessung nach ISO 5801 zu bestimmen.

Stellwert ist die Drehzahl der Zuluft- oder Strahlventilatoren (bei Frequenzumrichter-Antrieb) bzw. die Anzahl und Blasrichtung laufender Strahlventilatoren.

#### 7.2.2 Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen

Bei den ersten Anlagen, bei welchen eine geregelte Beeinflussung der Luftströmung im Fahrraum implementiert wurde, wird die Anzahl zu schaltender Strahlventilatoren anhand der Parameter Brandort und Luftströmungsgeschwindigkeit zugewiesen. Wegen der Berücksichtigung der gemessenen Luftströmungsgeschwindigkeit kann im Prinzip von einer Regelung gesprochen werden. Der Regelzyklus beträgt in der Praxis ca. 30 s.

Instationäre Verkehrszustände konnten damit nicht ausgeglichen werden. Deshalb muss man bei der Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen jeweils einige Minuten nach einem Brandalarm warten bis der Verkehr stillsteht, bevor die Regelung freigegeben wird.

Beispiele für die Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen in der Schweiz sind A53 Balmenrainntunnel (Längslüftung), A28 Gotschnatunnel, A4 Flüeler Tunnel (mit Absaugung).

### 7.2.3 Einsatz von stufenlosen Reglern

Mit dem Einsatz von stufenlosen Reglern können auch Verkehrseinflüsse ausgeglichen werden. Im Brandfall kann die Regelung somit sofort starten. Bei grossen Strahlventilatoren müssen für die Regelung Frequenzumrichter eingesetzt werden.

Ein Vergleich zwischen Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen und stufenloser Regelung ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Als Beispiel wurde eine Absaugung gewählt, bei welcher aufgrund von Asymmetrie und äusseren Drücken die Luft an der Absaugstelle vorbeiströmen würde. Ziel der Kontrolle der Längsströmung ist eine symmetrische Zuströmung von beiden Seiten zum Absaugort, d.h. (berechnete) Luftströmungsgeschwindigkeit am Absaugort = 0 m/s. Bei der Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen erfolgt eine Verzögerungszeit von 3 Min. nach dem Brandalarm, um mögliche Verkehrseinflüsse auf die Luftströmung auszuschliessen.

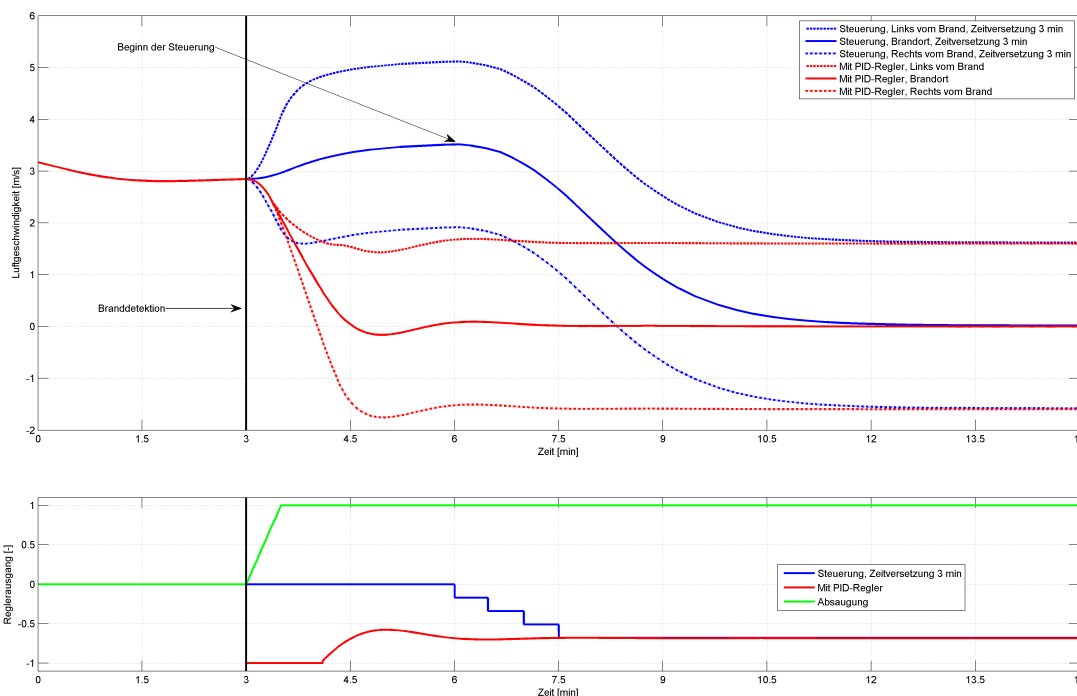


Abbildung 7.1 Vergleich zwischen Regelung und Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen

In diesem Beispiel wird das Ziel nach 2 Min. ab Branddetektion erreicht, wenn ein Regler unmittelbar eingesetzt wird. Mit der Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen geht es ca. 9 Min. (inklusive der Verzögerung von 3 Min.). Diese Werte entsprechen den praktischen Erfahrungen.

Der Einsatz von stufenlosen Reglern, welche Bestandteile von üblichen SPS-Programmen sind, war bei den ersten Versuchen zur Kontrolle der Luftströmung in Strassentunneln gescheitert. Deshalb wurde zunächst auf die Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen gemäss Kap. 7.2.2 ausgewichen. Erst nach der Behebung von Ausführungsproblemen und einer engen Betreuung der Steuerungsbauer durch den Lüftungsingenieur konnten die Regler angewendet werden.

Im Cross-City Tunnel in Sydney (Australien) wurde zum ersten Mal die Luftströmung in einem komplexen Netzwerk mit einem System von gekoppelten Reglern unter laufendem Verkehr kontrolliert. Beispiele für die Anwendung von stufenlosen Reglern in der Schweiz für die Kontrolle der Luftströmung im Brandfall sind A13 Isla Bella Tunnel, A2 Kirchenwaldtunnel / A8 Lopper (mit Absaugung), A3 Nordtangente Basel (Längslüftung)

## 7.2.4 Gütekriterien

Für die Regelung werden heute üblicherweise PID-Regler verwendet. Die Parameter des Reglers müssen mit einer dynamischen Simulation bestimmt und mit Versuchen im Tunnel optimiert werden. Für die Beurteilung und Abnahme sollten Gütekriterien im Rahmen von Richtlinien definiert werden:

### 1. Der Soll-Zustand soll schnell erreicht werden.

Ein Sollwert der Luftströmungsgeschwindigkeit  $u_{\text{soll}}$  soll innerhalb einer Bandbreite von einer definierten Abweichung  $\Delta u$  innerhalb einer vorgegebenen Zeit  $t_{\text{max}}$  erreicht werden. Dabei sind keine zusätzlichen dynamischen Störungen zu berücksichtigen.

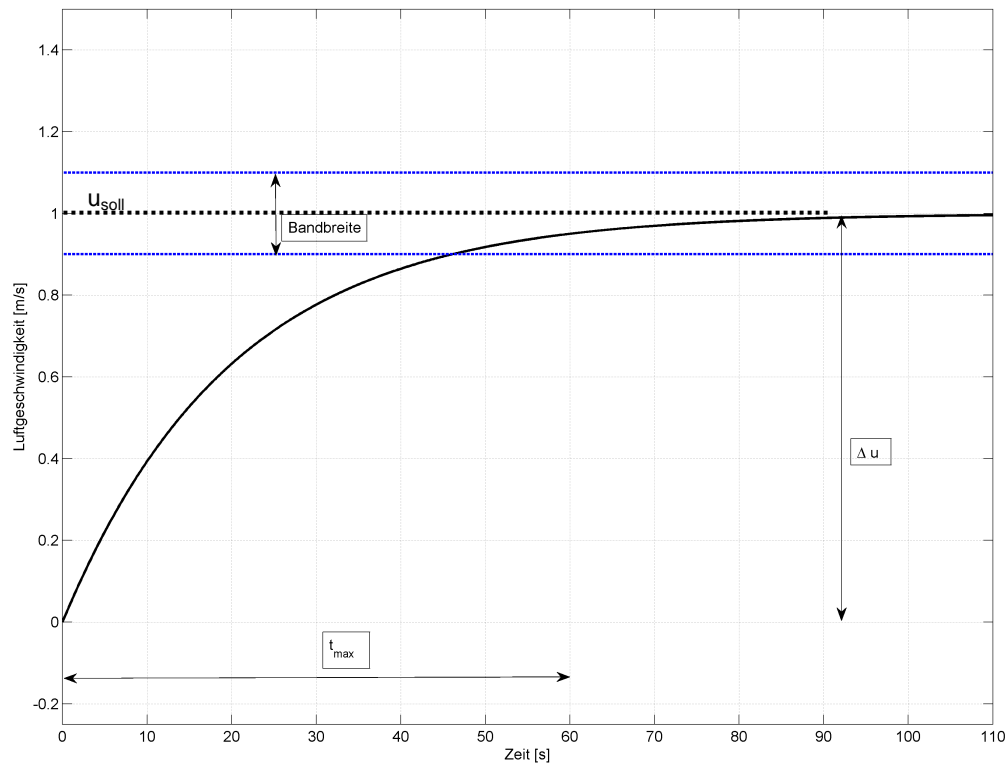


Abbildung 7.2 Erreichen des Sollwerts der Luftströmungsgeschwindigkeit

## 2. Störungen sollen schnell ausgeglet werden.

Als massgebende Störung wird eine Kraft definiert, welche bei ausgeschalteter Regelung innerhalb einer Zeit  $t_{\text{step}}$  auf eine Abweichung  $\Delta u$  vom Sollwert  $u_{\text{soll}}$  führen würde. Diese Störung kann auf beide Seite wirken.

Die Längsströmung muss bei Auftreten einer solchen massgebenden Störung bei laufendem Regler innerhalb der definierten Zeit  $t_{\text{step}}$  wieder die Sollgeschwindigkeit  $u_{\text{soll}}$  erreichen.

Dabei darf kein Überschwingen auftreten, d.h. die maximal zulässige Abweichung von der Sollgeschwindigkeit  $u_{\text{soll}}$  muss auf beide Seiten innerhalb der Bandbreite bleiben.

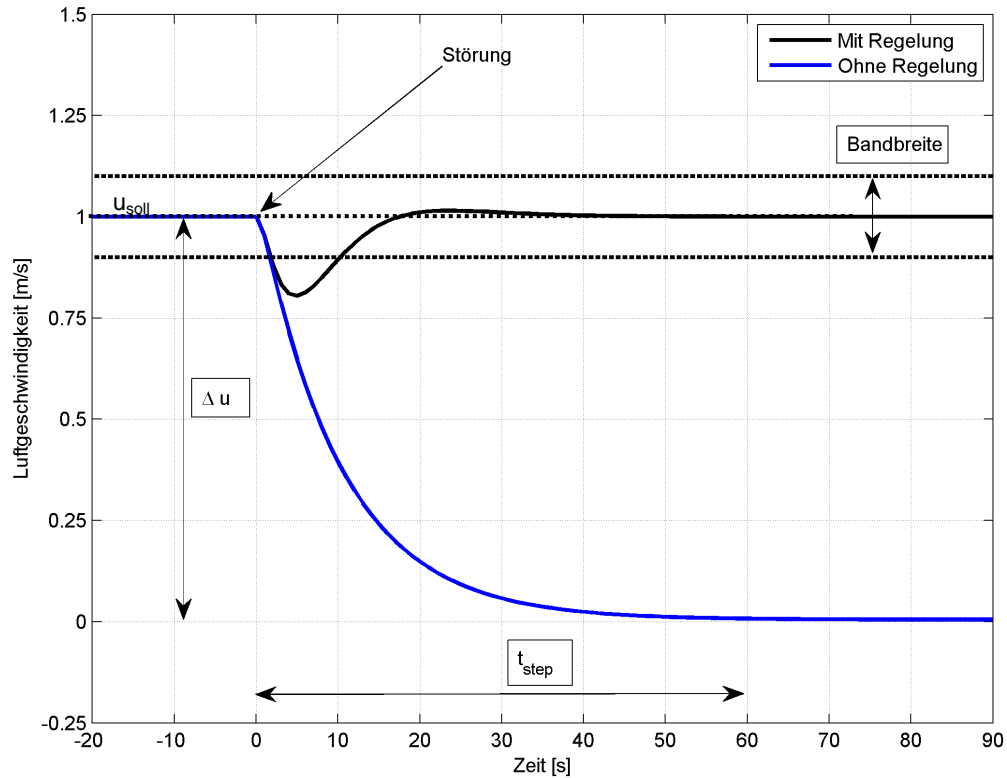


Abbildung 7.3 Ausregeln einer Störung

Optimierungspotential besteht einerseits in einer Verbesserung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Luftströmungsmessung im Tunnel unter Verkehr, andererseits in einer schnelleren Reaktion der Regelung. Dafür ist einerseits ein höher entwickeltes Regelverfahren notwendig, andererseits muss auch eine genügende Leistungsreserve der Lüftungsanlage, welche über die Auslegung für den stationären Zustand hinausgeht, bereitgestellt werden.

## 8 Planungsempfehlung

### 8.1 Querlüftungsanlagen

In bestehenden Tunneln mit vorhandenen Querlüftungsanlagen in mehreren unabhängigen Lüftungssektoren kann mit geringem Aufwand, im besten Fall nur mit einer Anpassung der Steuerungs-Software, die erforderliche Längsströmung im Brandfall erreicht werden. Dies bietet sich somit als schnell realisierbare Lösung im Rahmen von Sofortmassnahmen an.

### 8.2 Strahlventilatoren

Für die Beeinflussung der Längsströmung in Strassentunneln werden üblicherweise Strahlventilatoren eingesetzt. Der Wirkungsgrad ist bei Strahlventilatoren gegenüber Saccardo-Düsen besser wegen dem flacheren Strahlwinkel und den wegfallenden Zentralenverlusten. In Tunneln mit Längslüftung und Gewölbequerschnitt sind für die Strahlventilatoren keinerlei bauliche Anpassungen erforderlich. Dadurch ergeben sich die geringsten Investitionskosten.

Strahlventilatoren bieten zudem den Vorteil, dass sie in der Regel in grösserer Zahl vorhanden sind, so dass ein Ausfall einer Strahlventilatorgruppe weniger ins Gewicht fällt. Dadurch können Anforderungen an die Redundanz mit geringem Aufwand erfüllt werden.

Die erhöhte Korrosionsanfälligkeit der Strahlventilatoren im Fahrraum muss begrenzt werden, indem hohe Qualitätsanforderungen an den Korrosionsschutz gestellt und auch durchgesetzt werden. Tunnelsperrungen für Wartung und Reparatur im Fahrraum müssen beim Einsatz von Strahlventilatoren in Kauf genommen werden können.

Die Auslegung von Strahlventilatoren erfolgt heute standardmässig mit der Formel gemäss Kap. 2.2, Diese gilt für einfache Fälle des Antriebs einer Luftströmung. In der Praxis sind folgende Vorbehalte zu berücksichtigen:

- Das Rechenmodell für die Strahlventilatorauslegung stimmt nicht genau für den Fall des Abbremsens einer Längsströmung, weil sich andere Impulsumsetzungskoeffizienten als beim Antrieb einer Strömung ergeben.
- Dreidimensionale Effekte, z. Bsp. Hindernisse im Strahl, oder Wirbelbildung bei grossen Tunnelquerschnitten mit einseitiger Positionierung der Strahlventilatoren, müssen gesondert betrachtet werden.
- Die verbesserte Schubumsetzung von Strahlventilatoren mit zur Tunnelachse geneigter Einblasung wird mit den 1D-Rechenmodellen nur ungenügend dargestellt.
- Verluste bei Parallelbetrieb von Strahlventilatoren in Gruppen werden unzureichend berücksichtigt
- Die dynamischen Strömungszustände beim Anfahren, Abbremsen etc. werden nicht berücksichtigt.

Denkbar ist der Einbau von Strahlventilatoren in Räumen ausserhalb des Fahrraums, bei welchen nur der luftdurchströmte innere Teil der Korrosion ausgesetzt ist. Damit könnten einige Vorteile der Saccardo-Düsen übernommen werden, allerdings mit dem Nachteil eines steileren Strahlwinkels.

Um die Anforderungen an die Beeinflussung der Längsströmung in Gegenverkehrstunneln und bei Stau in Richtungsverkehrstunneln zu erreichen, müssen die Strahlventilatoren geregelt werden. Dafür sind entweder viele kleine Strahlventilatoren einzusetzen, entsprechend einer grossen Anzahl Schaltstufen, oder die Strahlventilatoren sind mit Frequenzumrichtern anzusteuern.

### 8.3 Zuluft einblasung mit Impuls / Saccardo-Düsen

Saccardo-Düsen können in Sonderfällen vorteilhaft sein:

- In Tunneln mit erhöhten Anforderungen an die Verfügbarkeit, insbesondere wenn Sperrungen für Wartungs- oder Reparaturarbeiten im Fahrraum nicht möglich sind.
- Bei der Sanierung bestehender Tunnel mit vorhandenen Lüftungszentralen und Zuluftventilatoren.
- In Tunneln mit Rechteckquerschnitt, falls die Kosten für einen höheren Fahrraum-Querschnitt oder zumindest für Strahlventilator-Nischen höher sind als die Kosten für Lüftungszentralen zur Unterbringung von Zuluftventilatoren.
- In Tunneln mit ausserordentlich korrosiver Atmosphäre. In einer Betrachtung über die gesamte Lebensdauer sind die Mehrkosten für die Lüftungszentrale denjenigen Kosten gegenüberzustellen, die sich durch die mehrmalige Erneuerung von korrodierten Strahlventilatoren ergeben würden.

Für die Gestaltung und Dimensionierung des Saccardo Systems sind die folgenden Parameter massgebend:

- Effektive Einblasgeschwindigkeit
- Effektiver Strahlquerschnitt bzw. Einblasöffnung
- Einblaswinkel
- Impulsumsetzungskoeffizient  $k_{MX}$

Wie in Kap. 3.3 beschrieben, wurde bei Strahlventilatoren ein optimaler Einblaswinkel (Winkel zwischen Strahl und Tunnellängsachse) von ca. 2 – 6° berechnet, je nach Fahrzeugen im Strahlbereich. Bei Saccardo-Düsen erfordert ein kleinerer Winkel eine grössere Baulänge und somit höhere Baukosten. In der Praxis wird ein Einblaswinkel von ca. 10 – 20° gewählt.

Sowohl die Wirkung als auch die Effizienz einer Saccardo-Düse nehmen mit zunehmendem Volumenstrom zu [6]. Die Einblasgeschwindigkeit ist begrenzt durch eine wirtschaftliche Ventilatorleistung (diese steigt in dritter Potenz zur Geschwindigkeit). Weiter ist die Einblasgeschwindigkeit limitiert durch die maximale Strömungsgeschwindigkeit, die bei der Einblasstelle auf Fahrzeuge und Personen einwirkt.

Durch die begrenzte Einbauhöhe über dem Lichtraumprofil ergibt sich in der Regel eine rechteckige Düsengeometrie. Von Yoshizawa [6] wurde mit Modellversuchen ein optimales Verhältnis von Breite zu Höhe von 5 : 1 bestimmt.

Ein Impulsumsetzungskoeffizient  $k_{MX} = 1$  bedeutet eine vollständige, verlustfreie Übertragung des Strahlimpulses auf die Tunnelströmung. Bei einer Einblasung senkrecht auf die Tunnellängsachse ist der Impulsumsetzungskoeffizient  $k_{MX} = 0$ . Für den Strömungszustand ‚Abbremsen‘ ist der Impulsumsetzungskoeffizient  $k_{MX} > 1$ . (siehe Abbildung 13.21 und Abbildung 13.27)

Bei der Planung von Saccardo-Düsen sind folgende Vorgaben zu beachten:

- Um ein vergleichbares Redundanzniveau wie bei Strahlventilatoren zu erreichen, müssen die Düsen in beiden Blasrichtungen doppelt ausgeführt werden (Redundanz 2 x 100 %). Dies führt zu entsprechend höheren Kosten.
- Grosse Geschwindigkeiten sind zu vermeiden, dafür eher hohe Volumenströme durch grosse Flächen einzublasen. Das Optimum der Einblasgeschwindigkeit liegt je nach Ventilatorcharakteristik im Bereich von 20 – 30 m/s.
- Die Impulsumsetzungskoeffizienten  $k_{MX}$  sind vom Strömungszustand (Beschleunigen, Abbremsen) abhängig. Sie sind entweder sehr konservativ anzunehmen, was zu einer unnötigen Überdimensionierung der Anlagen führen kann, oder mittels CFD-Simulationen oder Modellversuchen zu bestimmen.
- Bei Tunneln mit hohem LKW-Anteil und Staugefahr ist eine Reduktion der Impulsumsetzung durch Fahrzeuge, welche den Strahl blockieren, zu berücksichtigen.
- Mittelfristig sind standardisierte Geometrien anzustreben, bei welchen einheitliche Auslegungsfaktoren angewendet werden können, analog zu Strahlventilatoren.

## 8.4 Regelung der Längsströmung im Brandfall

Um eine hohe Qualität der Ausführung der Lüftungsteuerung sicherzustellen ist eine intensive und direkte Zusammenarbeit zwischen Steuerungsbauer, Lüftungsplaner, Betreiber und Bauherr erforderlich.

Mit den zurzeit verwendeten PID-Reglern dauert es oft zu lange bevor die Soll-Werte erreicht werden. Geeignete alternative Regelungsmethoden sollten mittels theoretischen Studien ermittelt werden. Geschwindigkeit, Schwingungsverhalten und Robustheit sind wesentlichen Faktoren. Die gewählte Regelung muss unter den effektiven Bedingungen im Tunnel hinsichtlich Regelgüte (Regelgeschwindigkeit) und speziell hinsichtlich Stabilität der Regelung im weiten Feld der Einflussfaktoren, getestet werden.

## 9 Quellenverzeichnis

- [1] Richtlinie Lüftung der Strassentunnel ASTRA 13.001, V2.01, Ausgabe 2008
- [2] Richtlinie Tunnelausrüstung Belüftung, RVS 09.02.31, Ausgabe 01.08.2008
- [3] Saccardo M., „Improved Method and Apparatus for Ventilating Tunnels“, Patent number GB 189802026 (A), 1898
- [4] Ventilations-Anlage nach System Saccardo für den Gotthard-Tunnel in Göschenen Schweizerische Bauzeitung, 17.06.1899
- [5] Ventilationsanlage für den Gotthardtunnel in Göschenen, Hofer & Co, Zürich, 1899
- [6] Isao Yoshizawa e.a., Characteristics of Blowing and Exhaust Nozzles used in a Longitudinal Ventilation System, 7th Intl. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Brighton, 1991
- [7] Rudolf Neikes, „Experimentelle Untersuchung turbulenter Strömungen in Rohrverzweigungen“, Dissertation, RWTH Aachen, 1989
- [8] Erich Truckenbrodt, Fluidmechanik I, Springer, 1980
- [9] D. S. Miller, Internal Flow Systems, BHRA, 1990
- [10] L. Guyonnaud, C. Sollic, M. Dufresne de Virel and C. Rey, Design of Air Curtains used for Area Confinement in Tunnels, Experiments in Fluids, 28, pp. 377-384, 2000
- [11] G. Grasmück, Applicability of Air Curtains as Air Stoppings and Flow Regulators in Mine Ventilation, CIM Bulletin 62, pp. 1175-1185, November 1969
- [12] F. C. Hayes and W. F. Stoecker, Heat transfer characteristics of the air curtain, ASHRAE Trans. 75 part 2, pp 153-167, 1969
- [13] T. Lajos und L. Preszler, Untersuchung von Türluftschleieranlagen. Heizung, Lüftung, Klimatechnik, Haustechnik, Teil 1: 26, pp. 171-176, Teil 2: 26: 226-235, 1975
- [14] Pospisil, P., Ilg, M., Marti, M. Brandt, R., „Messungen an der Tunnellüftungsanlage der Tunnels Balmenrain und Uznaaberg, Hauptstrasse T8/A8“, HBI Report 87-95-10, November 2003
- [15] V. Betta, F. Cascetta, M. Musto, G. Rotondo.: Numerical Study of the optimisation of the pitch angle of an alternative jet fan in a longitudinal tunnel ventilation system; Tunnelling and Underground Space Technology, Elsevier Ltd., No. 24, 2009.
- [16] J. Tomkins, J. Celentano and E. Colgan, M25 Holmesdale tunnel - setting a new standard for safety, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering, Vol. 162, 2009
- [17] P. Pospisil, P. Altenburger; Seelisbergtunnel, Zuluft einblasung zur Kontrolle der Längsströmung im Tunnel, Bericht HBI 72-22-03, 12.03.2008
- [18] R. Pischinger (TU Graz); Verfahren zur Beeinflussung der Tunnellängsströmung einer befahrbaren Tunnelröhre mit Querlüftung zur Verbesserung der Rauchgasabsaugung, Patent AT 411 919 B, Anmeldung 07.06.2002, Gültigkeit 15.12.2003
- [19] A. Brandl, H. Steinrück; Berechnung der Strömung durch eine Frischluftimpuls-klappe, Diplomarbeit E322, TU Wien, 2007
- [20] M. Tabarra, R.D. Matthews, B.J. Kenrick, The revival of Saccardo ejectors – history, fundamentals, and applications, 'Vehicle tunnels' BHR Group, 2000

- [21] D. Öttl, P. Sturm; Strömungstechnische Untersuchungen textiler Vorhänge im Katschbergtunnel (Tauernautobahn), TU Graz, 2001
- [22] D. Öttl, P. Sturm; Strömungstechnische Untersuchungen textiler Vorhänge im Gleinalmtunnel (Pyhrnautobahn), TU Graz, 2002
- [23] R. Christ, W. Klemenjak, S. Prantl; Psychologische Evaluierung von Tunnel Safety and Protection (TSP), Kuratorium für Verkehrssicherheit, Wien 2002
- [24] ANSYS Inc.; „ANSYS CFX, Release 11.0, Manual“

Weitergehende Literatur ohne direkten Bezug im Dokument

- [25] E. Wiesmann : Künstliche Lüftung im Stollen- und Tunnelbau sowie von Tunnels im Betrieb, Dissertation ETH Zürich, 1919
- [26] Chow, W. K.: On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 3, (271÷275), 1998.
- [27] Abanto, J.; Reggio, M.; Barrero D.; Petro, E.: Prediction of fire and smoke propagation in an underwater tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, Elsevier Ltd., 2006.
- [28] Report of the Task Forces for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in Mont Blanc Vehicular Tunnel, France, 1999.
- [29] Leitner, A.: The fire catastrophe in the Tauern Tunnel: experience and conclusion for the Austrian guidelines, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16 (217÷223), 2001.
- [30] Kim, J.Y.; Yoon, S.W.; Yoo, J.O.; Seo, T.B.; Rie, D.H.: A Study on the Smoke Control Characteristic of Longitudinally Ventilated Tunnel Fire Using PIV (Particle Image Velocimetry), Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 21, Issues 3-4, 2006.
- [31] Vaquelin, O.; Telle, D.; Definition and experimental evaluation of the smoke “confinement velocity” in tunnel fires, Fire Safety Journal 40, (320÷330), 2005.
- [32] Yan, Z.; Zhu, H.; Yang, Q.; Large-scaled Fire Testing for Long-sized Road Tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2006.
- [33] Lönnermark, A.; Ingason, H.; Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in Tunnels, Fire Safety Journal, Vol. 40 (506÷527), 2005.
- [34] Luchian, S.F.; The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, 2nd International Symposium Tunnel Safety & Security (ISTSS), (49÷55), Madrid, 2006.
- [35] Vidmar, P.; Petelin, S.; Analysis of heat transfer and fluid movement in case of fire in a road tunnel, International Thermal Science Seminar, Bled, Slovenia, 2004.
- [36] Li, S.M. Jojo; Chow, W. K.; Numerical studies of performance evaluation of tunnel ventilation safety systems, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, (435÷452), 2003.
- [37] Casale, E.; Biollay, H.; A fully-controlled ventilation response during a tunnel fire, International Tunnel Management, Vol. 4, Issue 3, (26÷30), 2001./2002.
- [38] Bradbury, W.M.S.; Mont Blanc tunnel fire; alternative ventilation configuration simulations, International Tunnel Management, Vol. 5, No 2, (26÷31), 2002.
- [39] Modic, J.; Fire simulation in road tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, (525÷530), 2003.

- [40] Carvel, R.O.; Fire size in tunnels, PhD thesis, Heriot-Watt University, Edinburgh, 2004.
- [41] Hartman, P.; Huijben, H.; Tunnel Ventilation and Safety in Escape Routes, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 22, Issues 3-4, 2006.
- [42] Jacques, E.; Controlling fire and smoke movements in road tunnels by means of ventilation: state of the art, Mine Ventilation, Taylor & Francis Group, ISBN 90-5809-633-5, (211÷217), London, 2004.
- [43] Blendermann, W., On a Probabilistic Approach to the Influence of Wind on the Longitudinal Ventilation of Road Tunnels. Proc. 2nd I.S.A.V.V.T., BHRA Fluid Engineering, Cambridge, England, 1976, Paper B1.
- [44] Cross, H., Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors", Bulletin, No. 286, Engineering Experiment Station, University of Illinois, 1936.
- [45] Dayman, B., Small-scale Aerodynamic Testing for Highway Tunnels. Proc. 4th I.S.A.V.V.T., BHRA Fluid Engineering, York, England, 1982, pp. 483-504.
- [46] Hartman, H.L., Pressure Changes at Split and Junctions in Mine Ventilation Circuits. Trans. AIME, 1960, 217, pp. 163-170.
- [47] Jacques, E., Mbuyi Kamba, G. and Patigny, J., Improving the Numerical Simulation of the Mine Ventilation by Adjustment of the Network Resistances. 2nd Conference on Mine Aerology, Hornicky Ustav CSAV, Ostrava, Czechoslovakia, 1991, pp. 16-28.
- [48] Jacques, E. and Patigny, J., Recherche des Branches Instables dans un Réseau d'Aérage. (Identification of Unstable Branches in a Ventilation Network). XV International Conference, Karlovy Vary, Czechoslovakia, 1973, pp. 33-42. (in French).
- [49] Jacques, E.J., Generalization of Cross' Iterative Method for computing Ventilation Networks. Proc. 1st Intern. Mine Vent. Congress, Hemp R. & Lancaster F.H., ed., Mine Ventilation Society of South Africa, Johannesburg, 1976, pp. 1-3.
- [50] Kumar, S. and Cox, G., Mathematical Modelling of Fires in Road Tunnels. Proc. 6th I.S.A.V.V.T., BHRA Fluid Engineering, Durham, England, 1988, pp. 61-76.
- [51] Sanford, R.L., Natural Ventilation. In Mine Ventilation and Air Conditioning, Hartman H.L., ed., John Wiley & Sons, New York, 1982, pp. 239-253.
- [52] te Velde, K., A Computer Simulation for Longitudinal Ventilation of a Road Tunnel with Incoming and Outgoing Slip Roads. Proc. 6th I.S.A.V.V.T., BHRA Fluid Engineering, Durham, England, 1988, pp. 179-201.
- [53] Vermeulen, P.E.J., A Wind Tunnel Study of the Influence of Wind on the Ventilation of Road Tunnels. Proc. 3rd I.S.A.V.V.T., BHRA Fluid Engineering, Sheffield, England, 1979, pp. 399-414.
- [54] Wang, Y.J., Ventilation Network Theory. In Mine Ventilation and Air Conditioning, Hartman H.L., ed., John Wiley & Sons, New York, 1982, pp. 483-516.
- [55] Cory, W.T.W., Matthews, R.D., Tabarra, M., and Kenrick, B., 1997, "The effects of jet plume configuration on the installation efficiency of jet fans," Proceedings of BHR Group, 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, ed., J.R. Gillard, Mechanical Engineering Publications Ltd., London, UK, pp. 57- 76.
- [56] Jacques, E., 1991, "Numerical simulation of complex road tunnels," Proceedings of BHR Group, 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, ed., A. Haerter, Elsevier Science Publishers Ltd, London, UK, pp. 467-486.

- [57] Kempf, J., 1965, "Einfluss der Wandeffekte auf die Treibstrahlwirkung eines Strahlgebläses, Ein Beitrag zur Aerodynamik der Tunnellüftung" Schweizerische Bauzeitung, Vol. 83/4, pp. 47-52.
- [58] Rohne, E., 1979, "The friction losses on walls caused by the jet flows of booster fans," Proceedings of the 3th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHRA, Cranfield, UK, pp. 57-70.
- [59] Rohne E., 1991, "Friction losses of a single jet due to its contact with a vaulted ceiling," 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, ed., A. Haerter, Elsevier Science Publishers Ltd, London, UK, pp. 679-687.
- [60] Rohne, E., The Friction Losses on Walls Caused by a Row of Four Parallel Jet Flows. Proc. 6th I.S.A.V.V.T., BHRA Fluid Engineering, Durham, England, 1988, pp. 151-164
- [61] Tabarra, M., Bennett, E., C., Matthews, R.D., Armstrong, J., and Smith, T.W., 1994, "Eccentricity effects on jet fan performance in longitudinally ventilated rectangular tunnels," Fans for hazardous applications, IMechE Seminar Publication, London, UK, pp. 11-16.
- [62] Armstrong, J., Bennett, E.C., and Matthews, R., D., 1994, "Three-dimensional flows in a circular section tunnel due to jet fans," Proceedings of BHR Group Ltd, 8th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, ed., I.J. Cockram, Mechanical Engineering Publications Ltd., London, UK, pp. 743-756.
- [63] S. Legrand, Application, Behaviour and Maximum Use for Dynamic Air Curtains, Int. Conf. on Tunnel Fires and Escape from Tunnels, Lyon, France, 1999
- [64] M. Altinakar and A. Weatherhill, Use of an Inclined Air Curtain for Preventing Smoke Propagation in a Tunnel during Fire Emergency, 4th Intl. Conf. on Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid, 2001
- [65] A. Drotz, B. Greiveldinger and M.L. Sawley, Numerical Flow Simulation of an Air Curtain for Road Tunnel Fire Security
- [66] J. Partyka, Analytical Design of an Air Curtain, Intl. Journal of Modelling and Simulation, Vol. 15, No. 1, 1995
- [67] S. Gupta, Etude expérimentale du comportement dynamique et des performances de rideaux d'air en vue de la conception de systèmes de confinement cellulaire, Diss., Université de Nantes, 2005
- [68] J. W. Powlesland, Air Curtains in Controlled Energy Flows, Tunnels and Tunneling, pp. 52-58, 1974
- [69] G. Pruckmayer, H. Steinrück, A. Brandl; Dimensioning of a fresh-air-impulse-damper, 4th international Conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz 2008
- [70] H. Aigner, Produktprospekt „FireCurtain“, Aigner Tunnel Technology GmbH, Günskirchen

# 10 Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 24. September 2010

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA SBT / ASTRA2007/002\_OBF

Projekttitle: Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall

Enddatum: 30.06.2010

#### Texte:

Zusammenfassung der  
Projektresultate:

Verschiedene Verfahren, um die Längsströmung in einem Strassentunnel zu kontrollieren, werden untersucht. Dazu gehören, neben Strahlventilatoren, die Verwendung von (Halb-)Querlüftungsanlagen, die konzentrierte Einblasung in den Tunnel (z.B. Saccardo-Düsen), Absaugung aus dem Tunnel, Luftvorhänge und mechanische Vorhänge.

Die unterschiedlichen Verfahren werden qualitativ beschrieben und einander gegenübergestellt, mit Darstellung der physikalischen Grundlagen, der rechnerischen Beschreibung und mit Anwendungsbeispielen aus der Praxis.

Ein qualitativer Vergleich wurde durchgeführt bezüglich:

- Wirkung und Effizienz
- Realisierbarkeit (bei neuen und bestehenden Tunneln)
- Baulicher Aufwand (Lüftungszentralen, Kanäle, Nischen etc.)
- Aufwand für die Anlagen (Lüftungsaggregate, Stromversorgung, Messgeräte, Steuerung)
- Kosten (Investition, Betrieb und Unterhalt)
- Zuverlässigkeit
- Betriebserfahrungen aus der Praxis

Als am besten geeignetes Verfahren wurden Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen identifiziert. Während für Strahlventilatoren umfangreiche theoretische Untersuchungen und Erfahrungen aus der Praxis bestehen, ist die Anwendung von Saccardo-Düsen in der Schweiz in den Hintergrund getreten.

Deshalb wurde ein Schwerpunkt auf die Untersuchung von Saccardo-Düsen gelegt. Mittels 2D- und 3D-Simulationen wurde der Einfluss von lokalen Strömungseffekten untersucht. Damit konnten Korrekturfaktoren für die (bekannten) eindimensionalen Auslegungsrechnungen ermittelt werden.

In einem bestehenden Strassentunnel wurden Messungen mit einer Saccardo-Düse durchgeführt. Damit wurden die Simulationen weitgehend bestätigt. Zudem konnten praktische Erkenntnisse für eine mögliche Umsetzung bei Umbauprojekten gewonnen werden.

Zielerreichung: Die definierten Forschungsziele wurden erreicht. Zudem wurde auf die Wünsche der Begleitkommission eingegangen.

Folgerungen und Empfehlungen: In Bezug auf die Methoden der Beeinflussung der Längsströmung wurden die folgenden wesentlichen Erkenntnisse gewonnen:

- Zur Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall sind Prinzipien mit gezieltem

ARAMIS SBT: projekttab\_ASTRA2007-002\_OBF\_ohne\_PL\_f\_Bericht\_2010-09-30.doc

Seite 1 / 3



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

Impuls in Richtung der Tunnelängsachse am besten geeignet, konkret Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen.

- Strahlventilatoren sind heute als Stand der Technik etabliert und haben in den meisten Fällen Vorteile in Bezug auf Effizienz und Investitionskosten.
- Saccardo-Düsen können in Sonderfällen vorteilhafter sein, insbesondere in Umbauprojekten, falls kein Platz für Strahlventilatoren vorhanden ist und wenn bestehende Lüftungszentralen mit Zuluftventilatoren genutzt werden können.
- Saccardo-Düsen haben gegenüber Strahlventilatoren Vorteile in Bezug auf Korrosions- und Brandbeständigkeit, sowie bezüglich Zugänglichkeit für Unterhalts- und Reparaturarbeiten.
- Für die Auslegung von Strahlventilatoren und Saccardo-Düsen sind die bekannten 1D-Verfahren geeignet. Lokale Effekte werden dabei durch den Impulsumsetzungskoeffizienten  $k_{MX}$  berücksichtigt. Dieser ist ein Mass für die Effizienz der Schubumsetzung vom Luftstrahl auf die Strömung im Tunnel. In der ASTRA-Richtlinie 13.001 wird der Impulsumsetzungskoeffizient für Strahlventilatoren als Einbauwirkungsgrad bezeichnet.
- Der Impulsumsetzungskoeffizient hängt sowohl für Strahlventilatoren als auch für Saccardo-Düsen von der Geometrie und erheblich vom Strömungszustand ab. Zu unterscheiden sind die folgenden Situationen:
  - o Abbremsen einer Strömung mit Impuls gegen die Strömungsrichtung
  - o Antrieb einer Strömung mit Impuls in Strömungsrichtung, mit Rückströmung, d.h. Strömung in beide Richtungen
  - o Antrieb einer Strömung mit Impuls in Strömungsrichtung, ohne Rückströmung d.h. Strömung in eine Richtung (in den meisten Fällen ist dies der Zielzustand der Auslegung)
 Dabei ist auch der dynamische Wechsel zwischen verschiedenen Strömungszuständen zu berücksichtigen.
- Für die detaillierte Ermittlung der Impulsumsetzungskoeffizienten sind Simulationsrechnungen und/oder Messungen nötig. Bei standardisierten geometrischen Anordnungen, insbesondere bei Strahlventilatoren, können in der Regel bekannte Werte übernommen werden.
- Bei Tunneln mit hohem LKW-Anteil und Staugefahr ist eine weitere Reduktion der Impulsumsetzung durch Fahrzeuge, welche den Strahl blockieren, zu berücksichtigen.
- Verfahren zur Beeinflussung der Luftströmung mit gezieltem Impuls in Richtung der Tunnelängsachse müssen geregelt werden bei Richtungsverkehr mit Stau und bei Gegenverkehr.
- Ein Beeinflussen der Luftströmung ohne Notwendigkeit der Regelung ist mittels Ein- und Ausblasung mit hohen Luftmengen und mehreren Lüftungsabschnitten möglich. Dies ist der Fall bei einigen langen Strassentunneln mit Querlüftungsanlagen. Bei neuen oder kürzeren Tunneln würde dies aber zu unnötig hohen Investitionskosten führen und ist deshalb nicht wirtschaftlich.

Bezüglich Regelungstechnik konnte folgendes festgestellt werden:

- Die Regelung der Längsströmung mit PID-Reglern ist heute Stand der Technik. Allerdings gibt es in der Praxis oft Mängel bei der Umsetzung wegen fehlenden Qualitäts- und Prüfvorgaben.
- Für die Regelung ist die Bereitstellung eines Leitwertes mit einer absolut zuverlässigen, genauen Luftströmungsmessung im Fahrraum essentiell.
- Ein Verbesserungspotential der Regelung besteht darin, eine schnellere Reaktion anzustreben. Dafür ist einerseits ein höher entwickeltes Regelverfahren notwendig, andererseits müsste auch eine genügende Leistungsreserve der Lüftungsanlage, welche über die Auslegung für den stationären Zustand hinausgeht, bereitgestellt werden.

#### Publikationen:

„Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall“, VSS bzw. HBI-Bericht, 2010

Investigation about methods to control airflow in road tunnels, Ilg L. and Pospisil P., 5th International Conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz University of Technology (Austria) 21-22 April 2010

Tunnelventilation, Rune Brandt, NFV-seminarium, Seminarium om Säkerheten i våra Nordiske vägtunnlar, Stockholm, 20-21 Oktober 2010.

Developments in ventilation systems – Modern ventilation systems, Rune Brandt, Conference on Tunnel Design and Construction, Zürich, 25-28 October 2010

On the efficiency of Saccardo nozzles – theory, modelling and full-scale field experiments, Rune Brandt, Antonio Di Miele, Ludwig Ilg, 14<sup>th</sup> International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Dundee, 11-13 May 2011









1261	ASTRA 2004/018		Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen <i>Etude de pilote pour l'évaluation d'une machine mobile à vrai grandeur qui permet de simuler le trafic sur les routes dans une manière accélérée</i> <i>Pilot-study for the evaluation of a mobile full-scale accelerated pavement testing equipment</i>	2009
1262	VSS 2003/503		Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche <i>Caractéristiques de bruit de couches de roulement en comparaison avec des couches d'asphalte coulé (Gussasphalt) avec surface construite</i> <i>Comparison of noise characteristics of wearing courses with mastic asphalt (Gussasphalt) with designed surface</i>	2009
1264	SVI 2004/004		Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung <i>Politique de transport: la prise de décision dans la planification des transports</i> <i>Transport-policy decision-making in transport planning</i>	2009
1265	VSS 2005/701		Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung) <i>Relation entre les propriétés diélectriques des revêtements routiers et leur condition</i> <i>A relationship between the dielectric properties of asphalt pavements and the present condition of the road</i>	2009
1267	VSS 2007/902		MDA in SVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik <i>Utilisation des standards d'échange de données basés modélisation pour la télématique des transports routiers à l'exemple des données de trafic</i> <i>Use of modal driven data transfer standards in the road transport telematic exemplified by traffic data</i>	2009
1268	ASTRA 2005/007		PM10-Emissionsfaktoren von Abriebpartikeln des Strassenverkehrs (APART) <i>PM10 emission factors of abrasion particles from road traffic</i> <i>Facteurs d'émission des particules d'abrasion dues au trafic routiers</i>	2009
1269	VSS 2005/201		Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen <i>Evaluation of road restraint systems in central reserves of motorways</i> <i>évaluation de dispositifs de retenue de véhicule sur le terre-plein central des autoroutes</i>	2009
1270	VSS 2005/502		Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung <i>Interaction route - stabilité des versants: Monitoring et calcul à rebours</i> <i>Road-landslide interactions: Monitoring and inverse stability analysis</i>	2009
1271	VSS 2004/201		Unterhalt von Lärmschirmen <i>Entretien des écrans antibruit</i> <i>Maintenance of noise reducing devices</i>	2009



1272	VSS 2007/304		Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen <i>Aménagement des feux de signalisation pour les personnes a mobilité réduite ou âgées</i> <i>Traffic control systems - Handicapped and older people at signalized intersections</i>	2010
1277	SVI 2007/005		Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie <i>Niveaux de service multimodales de la circulation routière - études préliminaires</i> <i>Multimodal level of service of road traffic - preliminary study</i>	2010
1282	VSS 2004/715		Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen <i>Coûts supplémentaires engendrés par l'exécution anticipée ou retardée des mesures d'entretien</i> <i>Additional costs caused by bringing forward or delaying of standard interventions for road maintenance</i>	2010

## 12 Anhang - 1D-Berechnungen Saccardo-Düse

Mit einem eindimensionalen Modell wird der Einfluss der wichtigsten Parameter vereinfacht berechnet und dargestellt. Abbildung 12.1 zeigt eine Übersicht des Tunnelmodells mit den relevanten physikalischen Grössen.

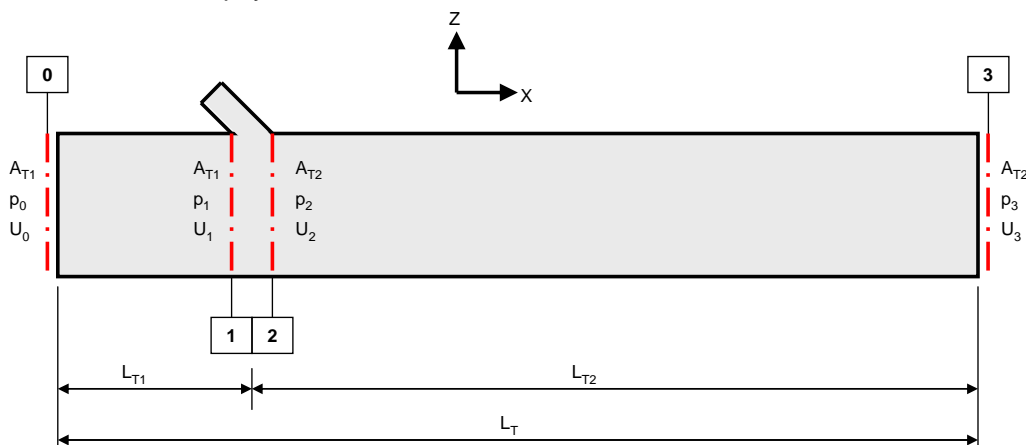


Abbildung 12.1 Tunnelschema mit Parametern der 1D-Berechnungen

Die Einblasstelle teilt den Tunnel in zwei Abschnitte (0-1 und 2-3). Eine konstante Dichte  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$  wird angenommen. Da die Querschnittsflächen  $A_{T1}$  und  $A_{T2}$  gleich gross sind, d.h.  $A_{T1} = A_{T2} = A_T$ , sind dann infolge der Kontinuität  $U_0 = U_1 = u_{T1}$  und  $U_2 = U_3 = u_{T2}$ .

Der Tunnel ist als glatte Röhre, ohne Einbauten, ohne Verkehr modelliert. Gegendrucke sind nicht berücksichtigt, d.h. untersucht wird nur das antreiben einer Längsströmung, kein Abbremsen. Der Impulsumsetzungskoeffizient des Treibstrahls aus der Saccardo-Düse  $k_{MX}$  wird = 1 angenommen.

In Tabelle 12.1 sind die geometrischen Grössen und die Parameter aufgeführt, welche für die 1D Berechnungen verwendet werden.

Geometrie		
Fahrraumhöhe	$h_T$	5.0 m
Fahrraumbreite	$b_T$	9.0 m
Tunnelquerschnitt	$A_T (b_T \cdot h_T)$	45.0 m <sup>2</sup>
Distanz zwischen Portal und Düse	$L_{T1}$	100.0 m
Tunnellänge	$L$	0.5 bis 10.0 km
Strahlquerschnittshöhe	$h_D$	0.0 bis 1.5 m
Strahlquerschnittsbreite	$b_D$	9.0 m
Strahlquerschnitt	$A_D (b_D \cdot h_D)$	0.0 bis 13.5 m <sup>2</sup>
Winkel	$\varphi$	0 bis 90 °
Flächenverhältnis	$\alpha (A_D/A_T)$	0.0 bis 0.3

Tabelle 12.1 Geometrie und Parameter für die 1D Berechnungen

Das Geschwindigkeitsverhältnis  $\omega$  wird in Abhängigkeit des Strahlquerschnitts  $A_D$ , des Winkels  $\varphi$  und des Strömungswiderstands (d.h. Tunnellänge) bestimmt. Durch Annahme der zu erreichenden Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum  $u_{T2}$  von 3 m/s wird aus  $\omega$  die Düsengeschwindigkeit  $U_D$  berechnet.

Die 1D Berechnungen bestätigen die im Kapitel 2.3.2 dargestellten Aussagen.

Aus den dargestellten Ergebnissen ist Folgendes ersichtlich:

- Bei Zunahme des Winkels wird das Geschwindigkeitsverhältnis  $\omega$  und dadurch, unter den gegebenen Randbedingungen, die Einblasgeschwindigkeit  $U_D$  grösser.
- Auch bei Zunahme der Tunnelänge (Erhöhung des Strömungswiderstands) erhöht sich das Geschwindigkeitsverhältnis  $\omega$  und dadurch die Einblasgeschwindigkeit  $U_D$ .
- Beim Verkleinern der Strahlquerschnittshöhe bzw. des Strahlquerschnitts wird ebenfalls das Geschwindigkeitsverhältnis  $\omega$  und dadurch die Einblasgeschwindigkeit  $U_D$  grösser.
- Beim Verkleinern des Winkels  $\varphi$  strebt  $\cos(\varphi)$  gegen 1.0. Das heisst, dass die Kraft, welche durch die Einblasung in X-Richtung übertragen wird, am grössten ist.
- Beim Vergrössern der Strahlquerschnittshöhen, bzw. des Strahlquerschnitts, wird der Wirkungsgrad grösser. Im linken Tunnelabschnitt stellt sich bei Zunahme der Tunnelänge rechts (Erhöhung des Strömungswiderstands) eine Strömung in Richtung des linken Portals ein.

Wie bereits aus der Literatur bekannt und mit Modellversuchen ermittelt, werden die höchsten Wirkungsgrade bei kleinen Einblaswinkeln und grossen Strahlquerschnittsflächen erreicht.

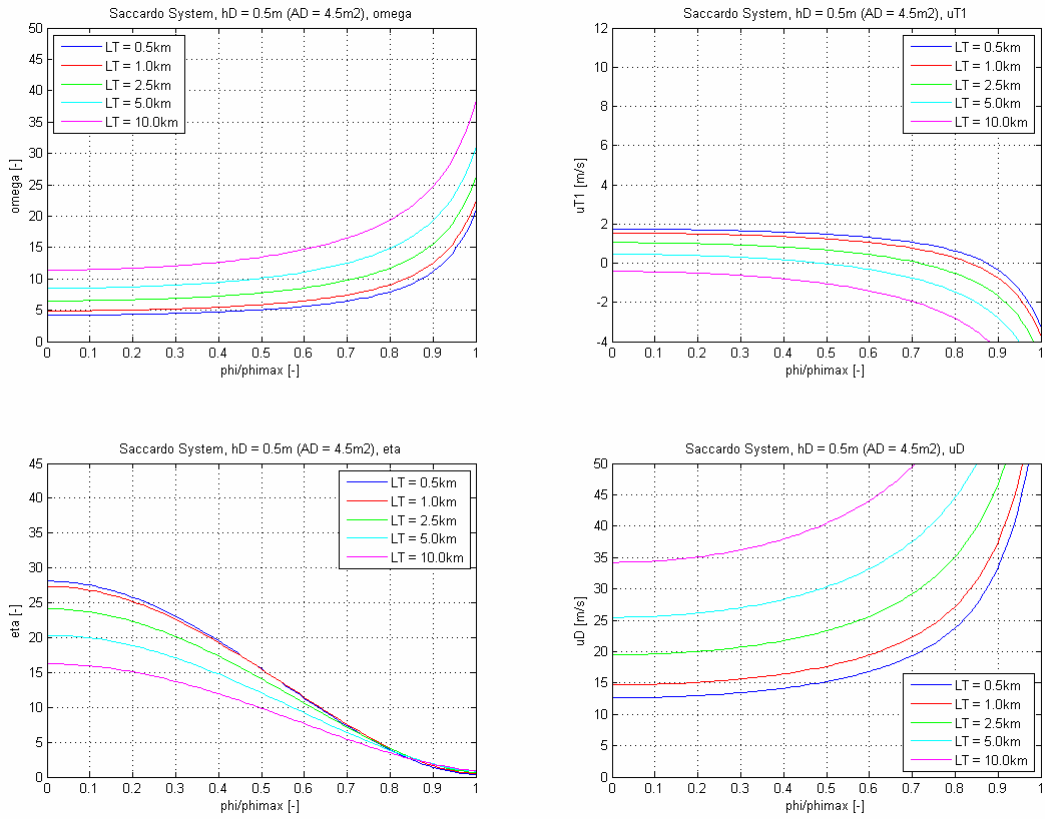


Abbildung 12.2  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 4.5$  m<sup>2</sup>

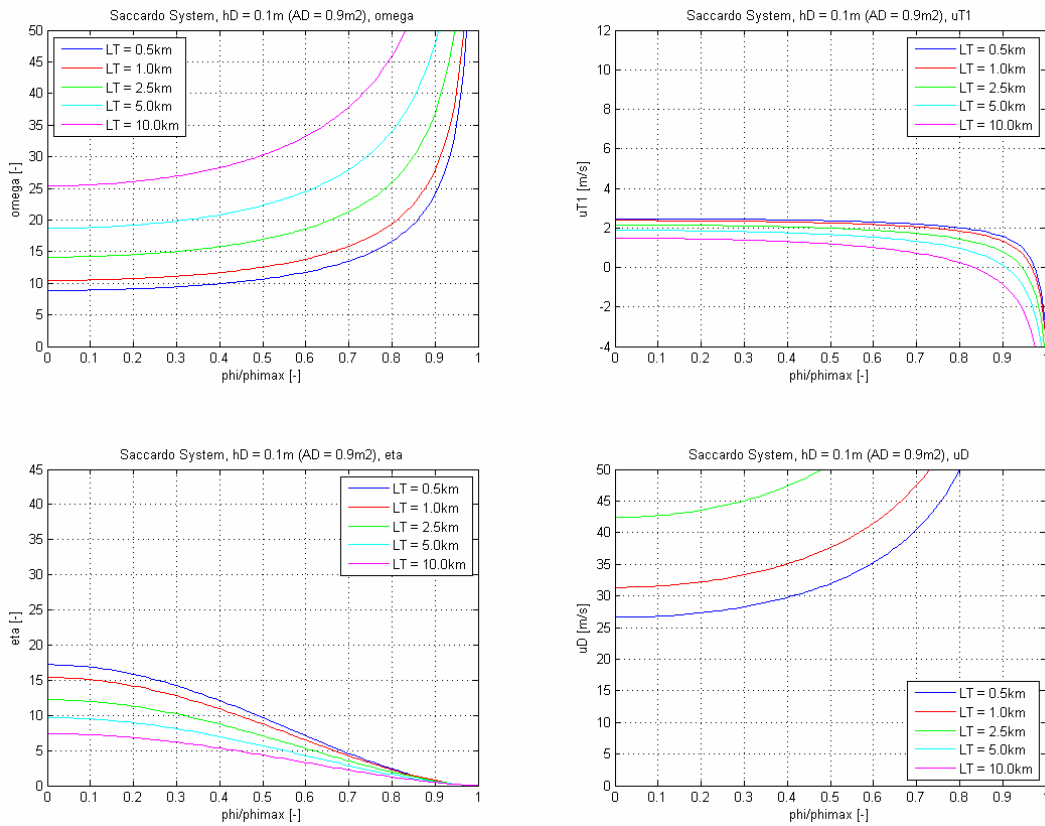


Abbildung 12.3  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup>

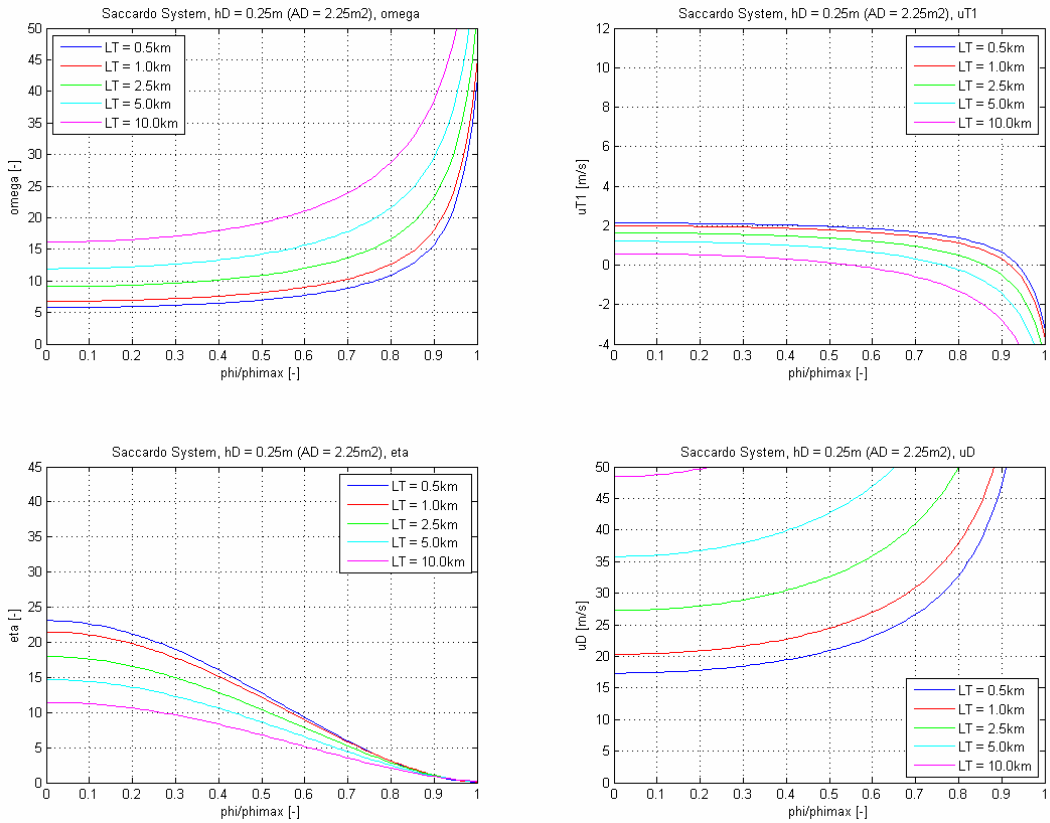


Abbildung 12.4  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 2.25$  m<sup>2</sup>

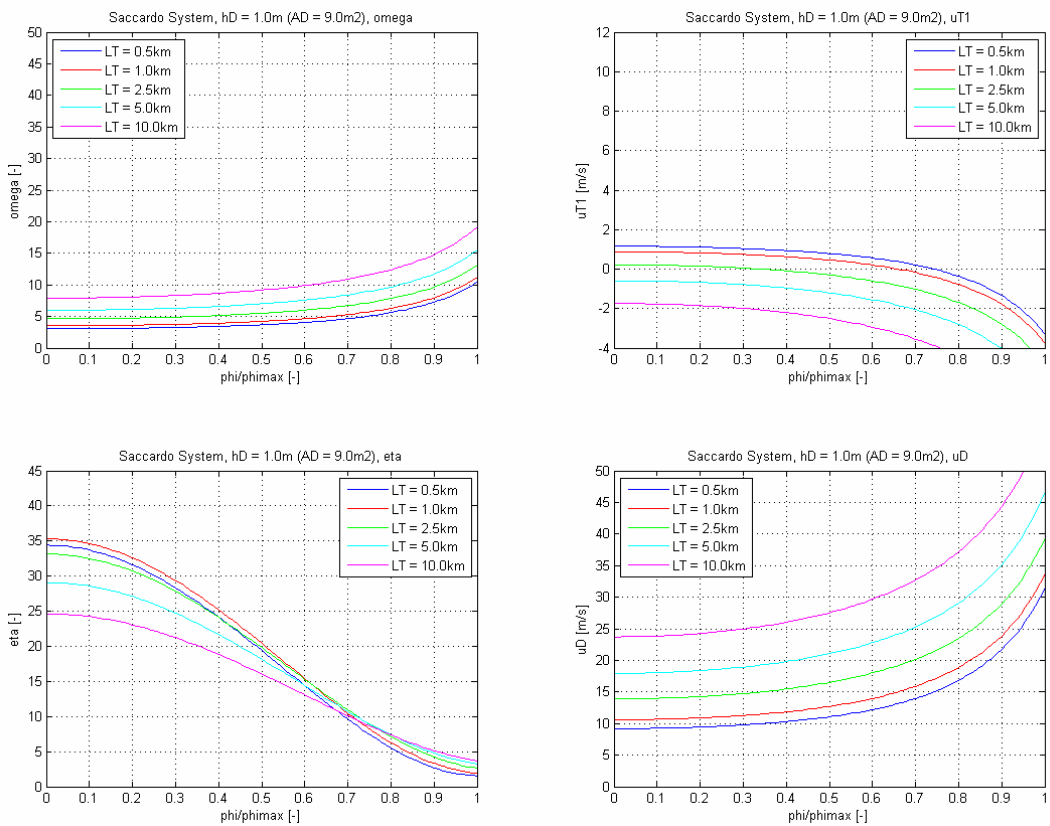


Abbildung 12.5  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 9.0$  m<sup>2</sup>



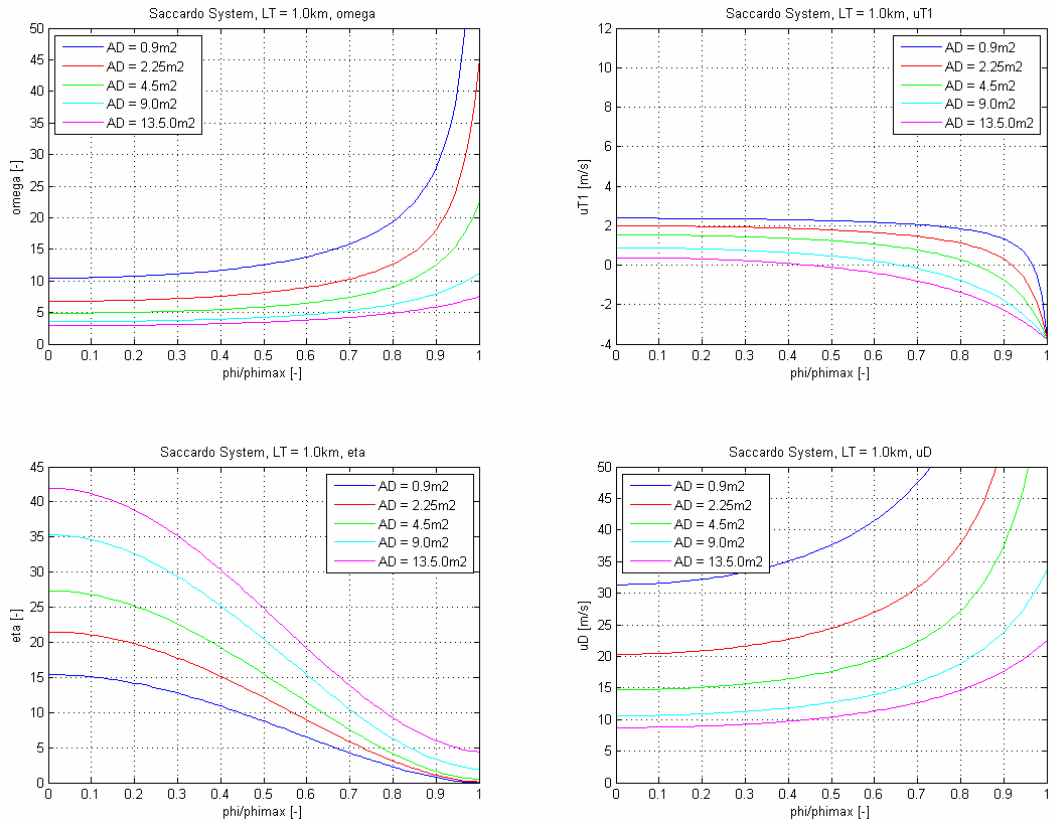


Abbildung 12.8  $\phi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 1.0 \text{ km}$ ,  $A_D = 0.9 \text{ m}^2$  bis  $13.5 \text{ m}^2$

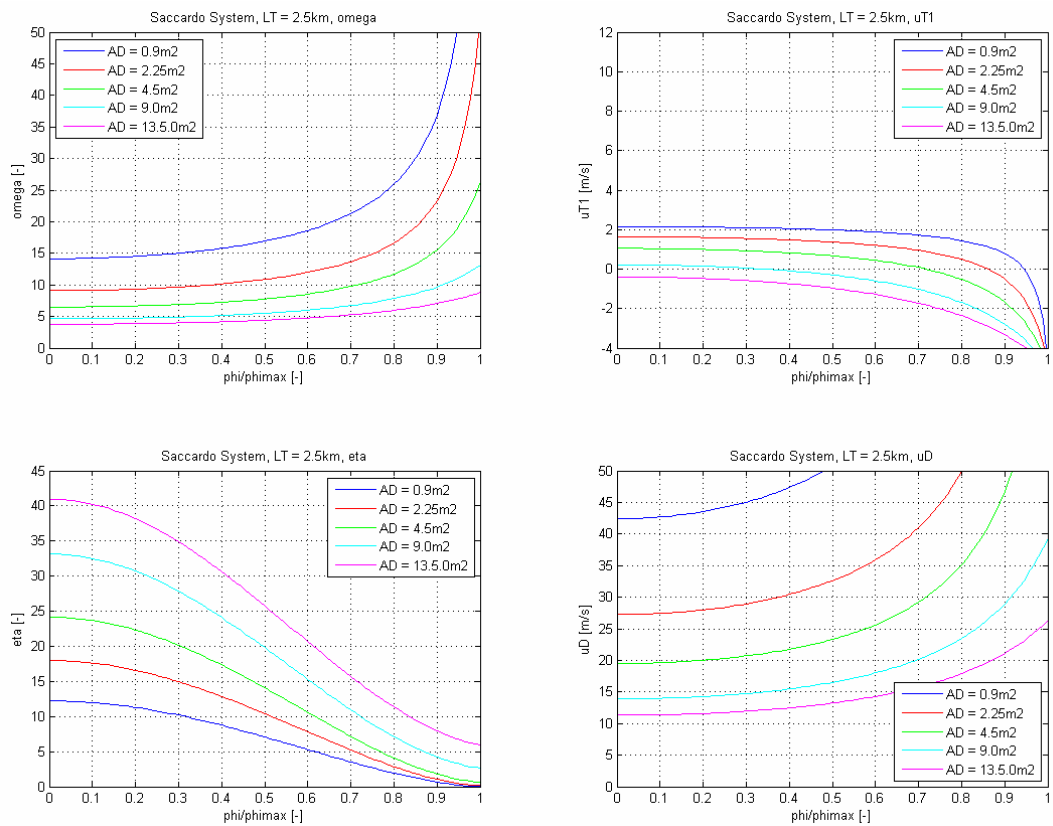


Abbildung 12.9  $\phi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 2.5 \text{ km}$ ,  $A_D = 0.9 \text{ m}^2$  bis  $13.5 \text{ m}^2$

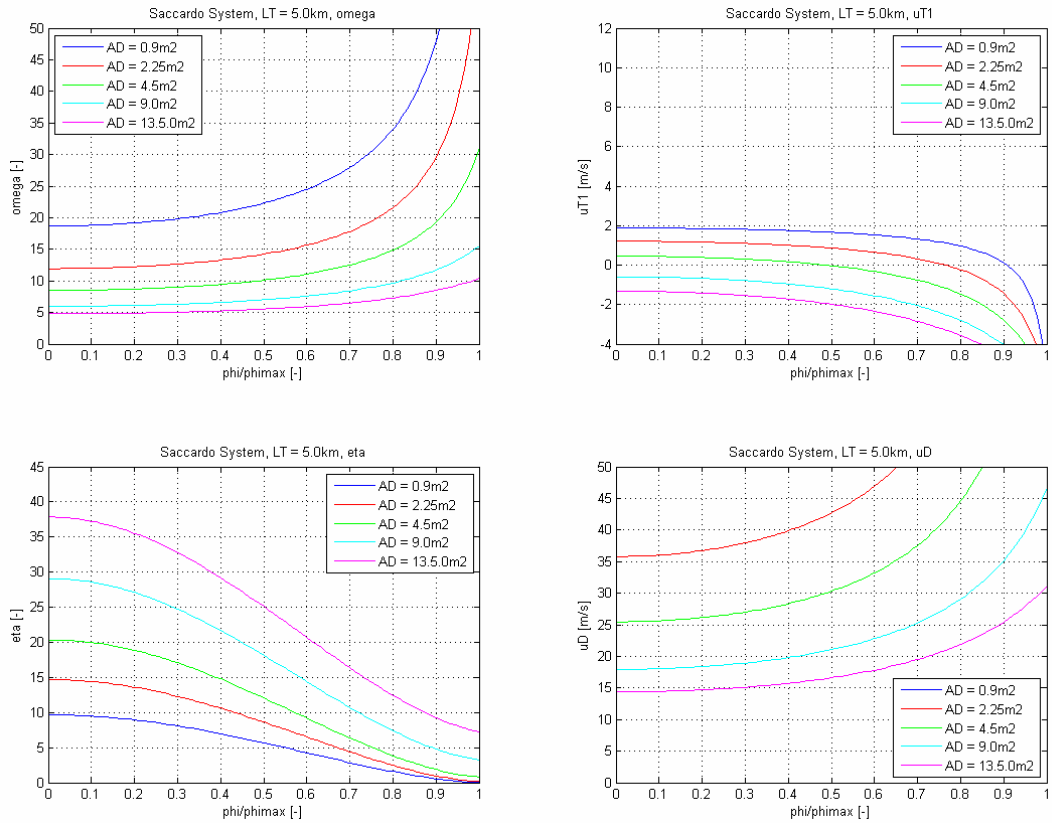


Abbildung 12.10  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 5.0$  km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup>

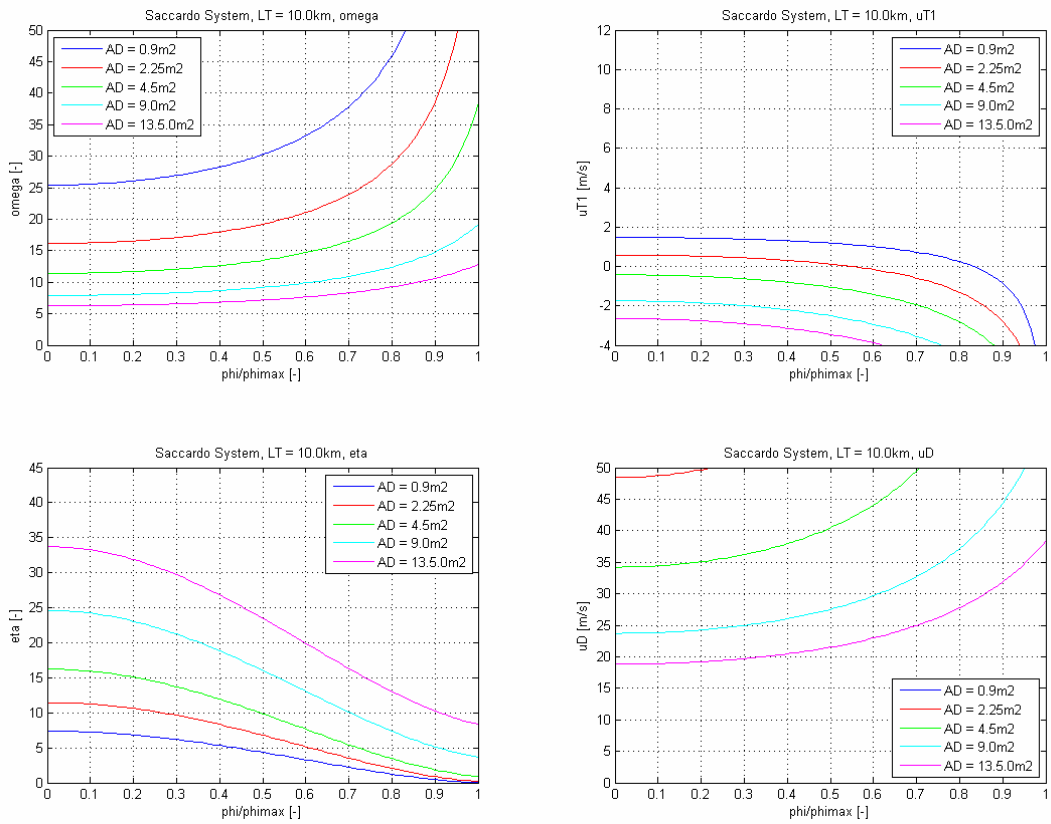


Abbildung 12.11  $\varphi = 0^\circ$  bis  $90^\circ$ ,  $L_T = 10.0$  km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup>

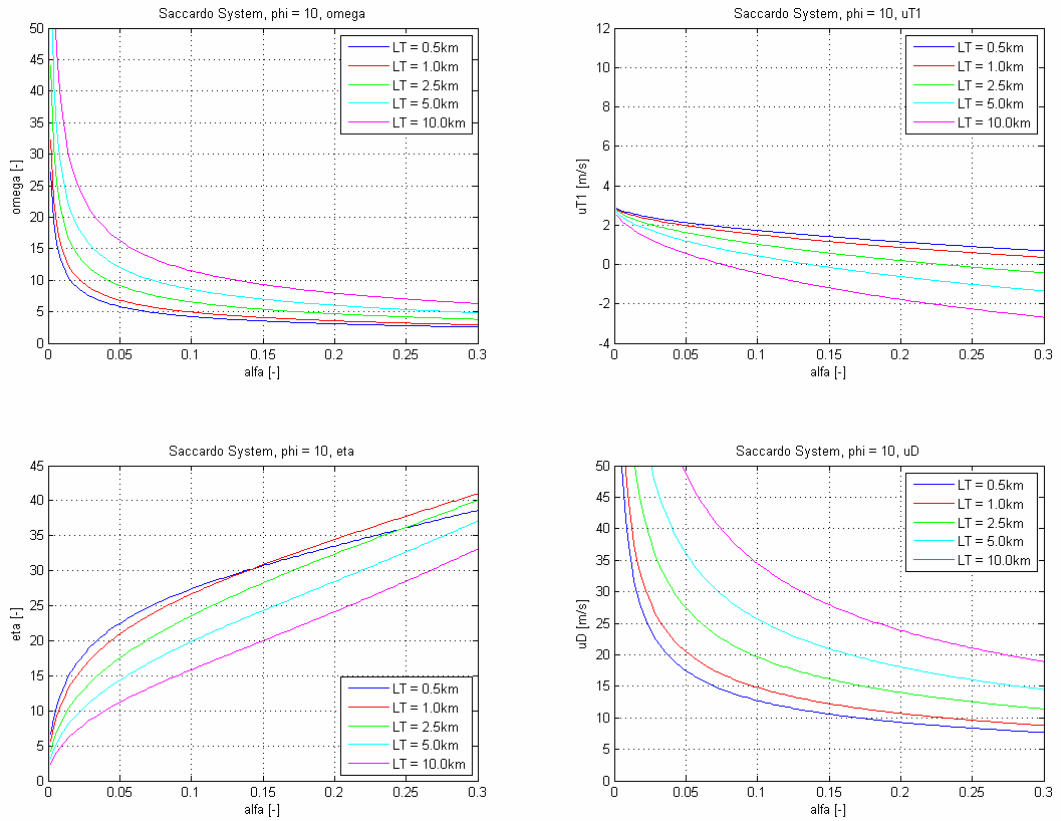


Abbildung 12.12  $\phi = 10^\circ$ ,  $L_T = 0.5 \text{ km}$  bis  $10.0 \text{ km}$ ,  $A_D = 0.9 \text{ m}^2$  bis  $13.5 \text{ m}^2$

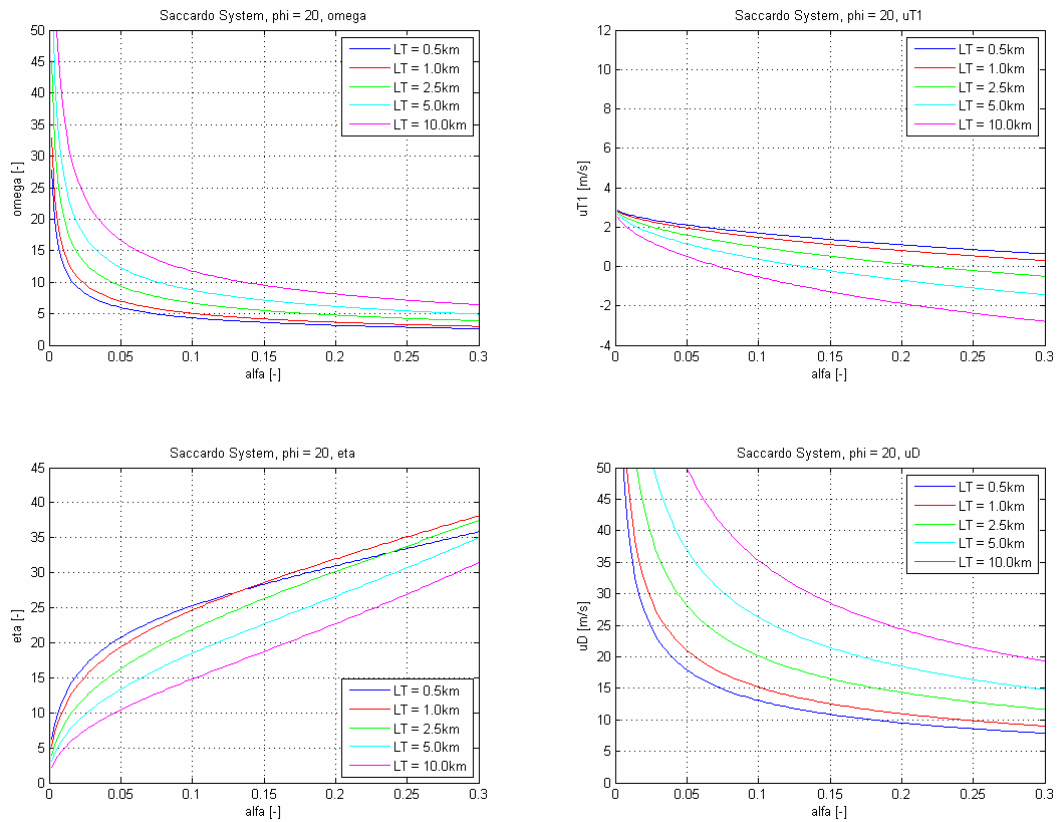


Abbildung 12.13  $\phi = 20^\circ$ ,  $L_T = 0.5 \text{ km}$  bis  $10.0 \text{ km}$ ,  $A_D = 0.9 \text{ m}^2$  bis  $13.5 \text{ m}^2$

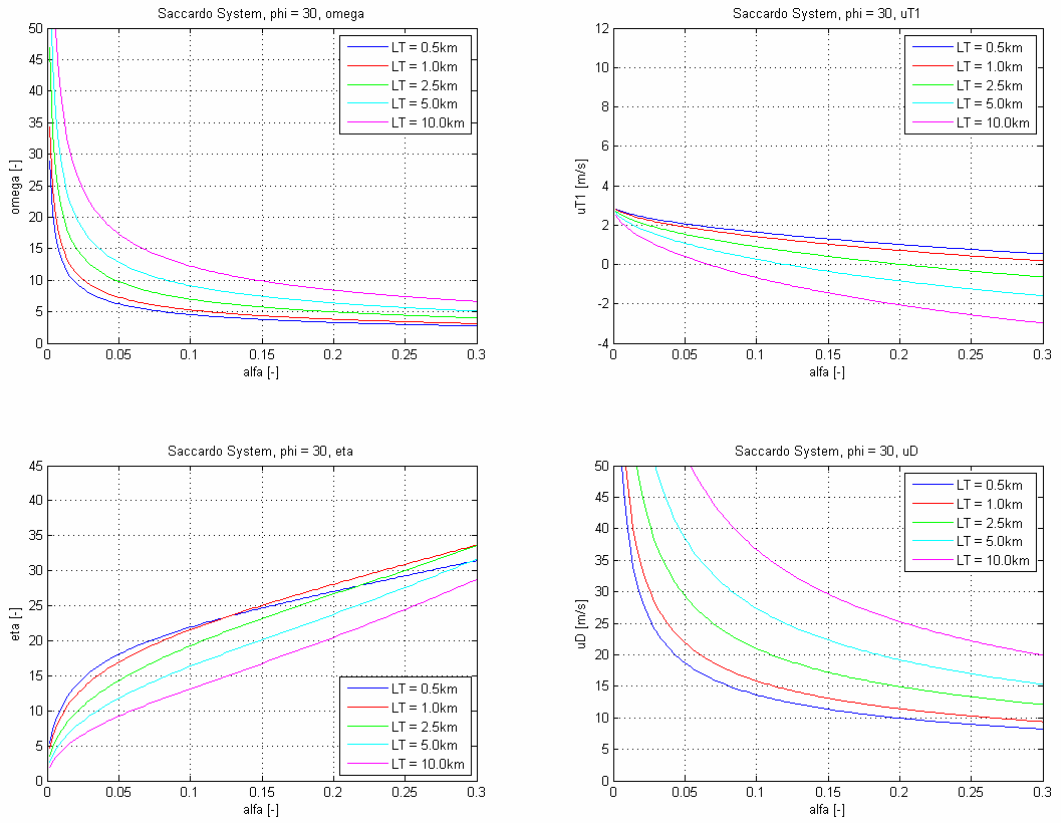


Abbildung 12.14  $\phi = 30^\circ$ ,  $L_T = 0.5$  km bis 10.0 km,  $A_D = 0.9$  m<sup>2</sup> bis 13.5 m<sup>2</sup>

## 13 Anhang - 2D-Berechnungen

### 13.1 Analyse des Saccardo Systems und Vergleich mit 1D Berechnungen

#### 13.1.1 CFD-Geometrie

Das CFD-Modell mit den relevanten Angaben wird in Abbildung 13.1 gezeigt. Es wird eine Tunnellänge von 250 m modelliert. Die restliche Länge des Tunnels wird mit entsprechenden Randbedingungen berücksichtigt (siehe Kapitel 13.1.4).

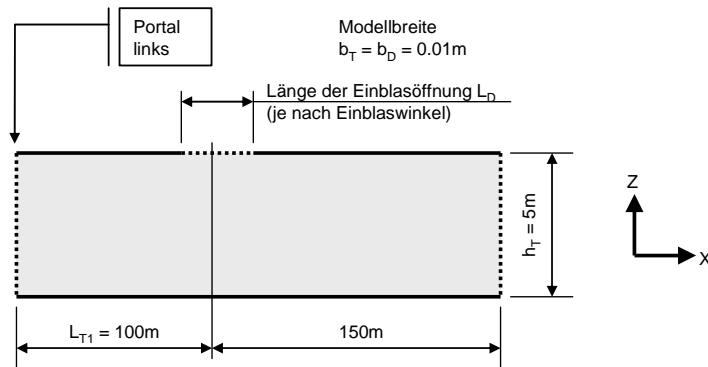


Abbildung 13.1: Geometrie des CFD-Modells mit den relevanten Angaben für die Analyse des Saccardo Systems

Die Einblasöffnung (bzw. die Länge der Einblasöffnung  $L_D$ ) wird für die unterschiedlichen Simulationen in Abhängigkeit des Einblaswinkels  $\varphi$  und der festgelegten Strahlhöhe ( $h_D = 1.0\text{ m}$ ) angepasst. In Tabelle 13.1 sind die geometrischen Randbedingungen des CFD-Modells aufgeführt.



Zur Berücksichtigung der Wandreibung wird in Anlehnung an die Richtlinie [1] eine Wandrauhigkeit von 3 mm angenommen. Die Verluste bei Eintritt der Luft in den Tunnel bzw. bei Austritt werden mit  $\zeta_{Ein} = 0,6$  und mit  $\zeta_{Aus} = 1.0$  berücksichtigt. Die Berechnungsdomäne beinhaltet nicht den ganzen Tunnel. Der Verlust, welcher durch den nicht modellierten Tunnelbereich hervorgerufen wird, wird in den Simulationen mit einem Widerstandsbeiwert  $\lambda = 0.015$  berücksichtigt.

Für alle Rechenfälle wird das RANS-basierte Turbulenzmodell k-ε eingesetzt (RANS = Reynolds averaged Navier Stokes) [24].

### 13.1.4 Randbedingungen

Die Randbedingungen des CFD-Modells werden in Abbildung 13.2 gezeigt und in Tabelle 13.2 zusammengefasst.

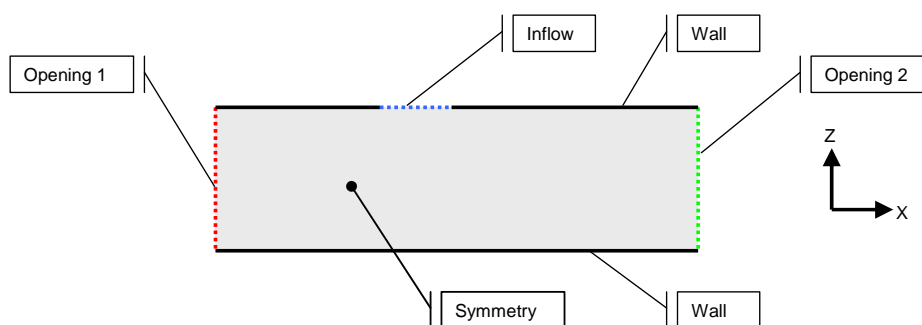


Abbildung 13.2: Festlegung der Randbedingungen für die Analyse des Saccardo Systems

Randbedingung	Eigenschaften	
Inflow	Geschwindigkeitsrandbedingung	- Geschw.-Komponenten $u$ und $v$ in Abhängigkeit des Einblaswinkels und der Einblasgeschwindigkeit $U_D$ (ändert je nach Simulationsfall) - Geschw.-Komponente $w = 0$ m/s
Opening 1	Druckrandbedingung	- Statischer Druck $p_{stat} = 0$ Pa - Verlustbeiwert $\zeta_1$ (ändert je nach Simulationsfall)
Opening 2	Druckrandbedingung	- Statischer Druck $p_{stat} = 0$ Pa - Verlustbeiwert $\zeta_2$ (ändert je nach Simulationsfall)
Wall	Wandrandbedingung	- Rauigkeit 3 mm

Tabelle 13.2: Festlegung der Randbedingungen für die Analyse des Saccardo Systems

Für die Randbedingungen Opening 1 und Opening 2 wird der statische Druck  $p_{stat}$  ausserhalb des Tunnels (bzw. ausserhalb der Berechnungsdomäne) vorgegeben. Der statische Druck auf die Randbedingungsfläche wird gemäss [24] je nach Strömungsrichtung wie folgt berechnet:

- Ausströmende Luft:  $p_{stat} + \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2$  (Gl. 13.1)

- Einströmende Luft:  $p_{stat} - \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2$  (Gl. 13.2)

Der Verlustbeiwert  $\zeta_1$  der Randbedingung Opening 1 wird für Ausströmende Luft mit  $\zeta_1 = 1.0$  und für Einströmende Luft mit  $\zeta_1 = 0.6$  angenommen. Der Verlustbeiwert  $\zeta_2$  wird je nach Simulationsfall abhängig von der Tunnellänge angesetzt (vgl. Tabelle 13.3).

### 13.1.5 Rechenfälle

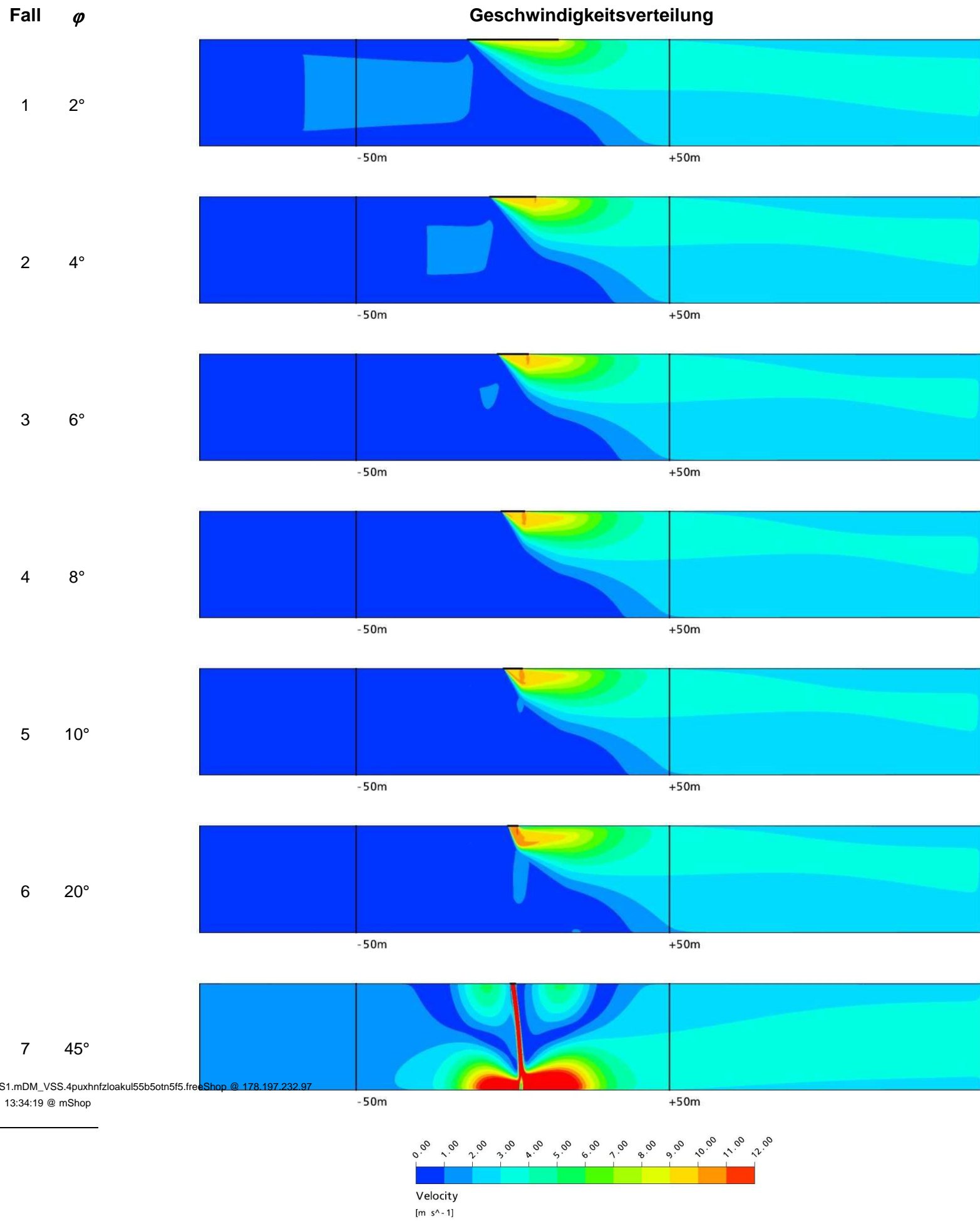
In der Tabelle 13.3 sind die Simulationsfälle mit den relevanten Angaben aufgeführt. Alle Berechnungsfälle sind stationär durchgeführt worden.

Rechenfall	$\varphi$ [°]	$U_D$ [m/s]	$\zeta_1$ [-]	$\zeta_2$ [-]
1	2	9.718	0.600	2.125
2	4	9.728	0.600	2.125
3	6	9.744	0.600	2.125
4	8	9.767	0.600	2.125
5	10	9.800	0.600	2.125
6	20	10.040	0.600	2.125
7	45	23.120	1.000	15.625

Tabelle 13.3: Zusammenstellung der Rechenfälle für die Analyse des Saccardo Systems

### 13.1.6 Ergebnisse, Auswertung

In Abbildung 13.3 wird die Geschwindigkeitsverteilung im 250 m langen simulierten Tunnelabschnitt gezeigt. Die gezeigten Bilder sind in der Höhe verzerrt worden, damit die ganze Länge des simulierten Gebiets (250 m) abgebildet werden konnte. Die Ergebnisse der Rechenfälle 1 bis 6 (siehe Abbildung 13.3) zeigen den Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“ und die Ergebnisse des Rechenfalls 7 den Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung“.



Download durch: VSS1.mDM\_VSS.4puxhmfzloakul55b5otn5f5.freeShop @ 178.197.232.97  
Zeitpunkt: 16.09.2011 13:34:19 @ mShop

Abbildung 13.3: Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) bei unterschiedlichen Einblasungswinkeln



Die Abbildung 13.5 zeigt die Strömungsvektoren in einem Bereich von etwa 70 m um die Einblasstelle. Für die Rechenfälle 1 bis 6 (Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung) wird das Strömungsbild in Richtung der Einblasungsrichtung gezeigt. Dagegen wird für den Rechenfall 7 (Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung) das Strömungsbild auf beiden Seiten der Einblasstelle abgebildet.

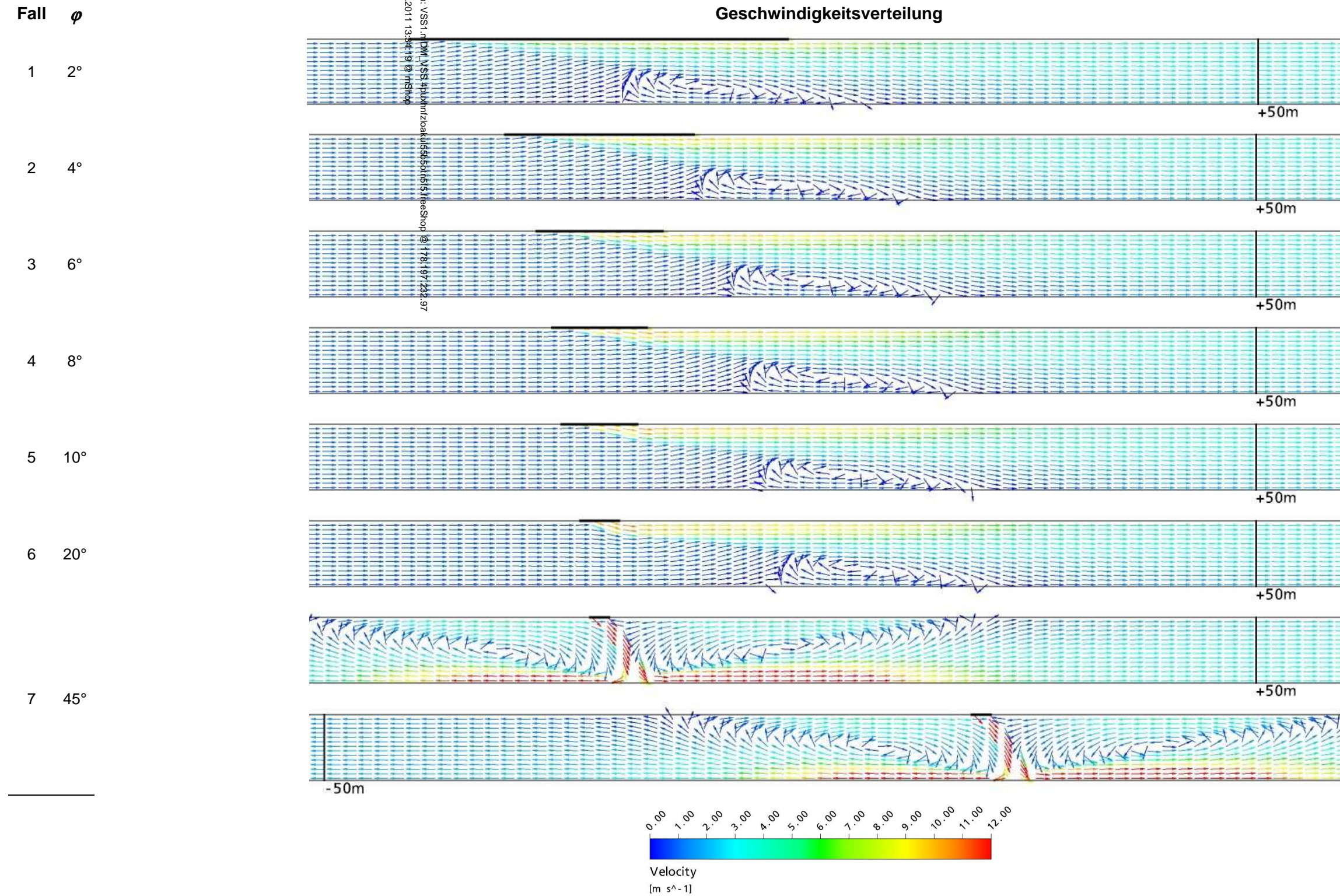


Abbildung 13.5: Geschwindigkeitsvektoren im Bereich der Einblasung bei unterschiedlichen Einblasungswinkeln

Aus den dargestellten Ergebnissen in Abbildung 13.3 bis Abbildung 13.5 ist folgendes ersichtlich:

- Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung (Rechenfälle 1 bis 6)

Kurz unterhalb der Einblasstelle wird die Luft in Richtung des rechten Portals umgelenkt. Die eingeblasene Luft verliert somit wegen der durchgehenden Längsströmung im Tunnel die anfängliche Richtung. Die Umlenkung bewirkt, dass kurz nach der Einblasstelle der Luftstrahl im oberen Bereich des Tunnels horizontal strömt (vgl. Abbildung 13.5).

Mit Zunahme des Einblaswinkels nimmt die Geschwindigkeit der eingeblasenen Luft zu (siehe Tabelle 13.3) und somit auch des Luftstrahls. Bei höheren Geschwindigkeiten ist die Wurfweite eines Luftstrahls grösser, was zu einer längeren Strecke für den Aufbau des Druckes zur Folge hat. In Abbildung 13.4 ist ersichtlich, dass bei zunehmendem Einblaswinkel eine längere Strecke für den Druckaufbau notwendig ist.

Im Bereich der Einblasung im unteren Teil des Tunnels entsteht ein Wirbel (siehe Abbildung 13.5). Dieser wird durch den Geschwindigkeitsunterschied zwischen eingeblasener Luft und Längsströmung im Tunnel hervorgerufen (Scherschicht). Der Wirbel wird mit zunehmendem Einblaswinkel in Richtung des rechten Portals verschoben.

- Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung (Rechenfall 7)

Im Vergleich zu den Rechenfällen 1 bis 6 behält der eingeblasene Luftstrahl im Rechenfall 7 den Winkel von  $45^\circ$  bis zum Boden des Tunnels, da die Längsströmung im Tunnel auf der Höhe der Einblasstelle in zwei Richtungen geteilt wird (vgl. Abbildung 13.5).

Die höheren Einblasgeschwindigkeiten im Vergleich zu den Rechenfällen 1 bis 6 sind notwendig, um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit von etwa 3 m/s am rechten Rand der Simulationsdomäne zu erreichen. Dies führt zu einem höheren Druckaufbau im Rechenfall 7 als in den Rechenfällen 1 bis 6 (vgl. Abbildung 13.4).

Durch die Einblasung von Luft in einem Winkel von  $45^\circ$  entsteht rechts und links von der Einblasstelle je ein Wirbel.

### 13.1.7 Vergleich mit 1D Berechnungen

Die Abbildung 13.6 zeigt den Vergleich zwischen den 2D und den 1D Berechnungen. Auf der X-Achse aller Diagramme in Abbildung 13.6 ist der dimensionslose Winkel  $\varphi/\varphi_{max}$  aufgeführt, mit  $\varphi_{max} = 90^\circ$ . Auf der y-Achse im Diagramm oben links ist das Geschwindigkeitsverhältnis  $\omega$ , im Diagramm unten links der Wirkungsgrad  $\eta$ , im Diagramm oben rechts die Strömungsgeschwindigkeiten  $u_{T1}$  sowie  $u_{T2}$  und im Diagramm unten rechts die Einblasgeschwindigkeit  $U_D$  dargestellt.

Die in Abbildung 13.6 dargestellten Kurven sind die Ergebnisse der 1D Berechnungen gemäss Anhang Kap. 12.

Die in Abbildung 13.6 dargestellten Datenpunkte zeigen die Ergebnisse der 2D Berechnungen (CFD). Aus den CFD-Simulationen sind die entsprechenden Grössen wie folgt bestimmt worden:

$$u_{T1} = \frac{1}{A_{T1}} \cdot \int_{A_{T1}} u \, dA \tag{Gl. 13.3}$$

$$u_{T2} = \frac{1}{A_{T2}} \cdot \int_{A_{T2}} u \, dA \tag{Gl. 13.4}$$

$$U_D = \frac{1}{A_D} \cdot \sum U_i \cdot A_i \tag{Gl. 13.5}$$

$$\omega = \frac{U_D}{u_{T2}} \tag{Gl. 13.6}$$

$$\eta = \frac{P_T}{P_D} = \frac{\Delta p_{01} \cdot \dot{V}_1 + \Delta p_{1D} \cdot \dot{V}_1 + \Delta p_{D2} \cdot \dot{V}_2 + \Delta p_{23} \cdot \dot{V}_2}{A_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_D^3} \tag{Gl. 13.7}$$

In (Gl. 13.7) entspricht  $\Delta p_{01}$  und  $\Delta p_{23}$  dem Druckverlust ausserhalb der Berechnungsdomäne. Diese Druckverluste werden mit den Zeta-Werten bestimmt, welche für die Simulationen definiert worden sind. Die Druckverluste  $\Delta p_{1D}$  und  $\Delta p_{D2}$  entsprechen hingegen den Verlusten, welche durch die Wandreibung in der Berechnungsdomäne hervorgerufen werden. Diese Druckverluste sind aus den Wandschubspannungen bestimmt worden (Teil der CFD-Ergebnisse).

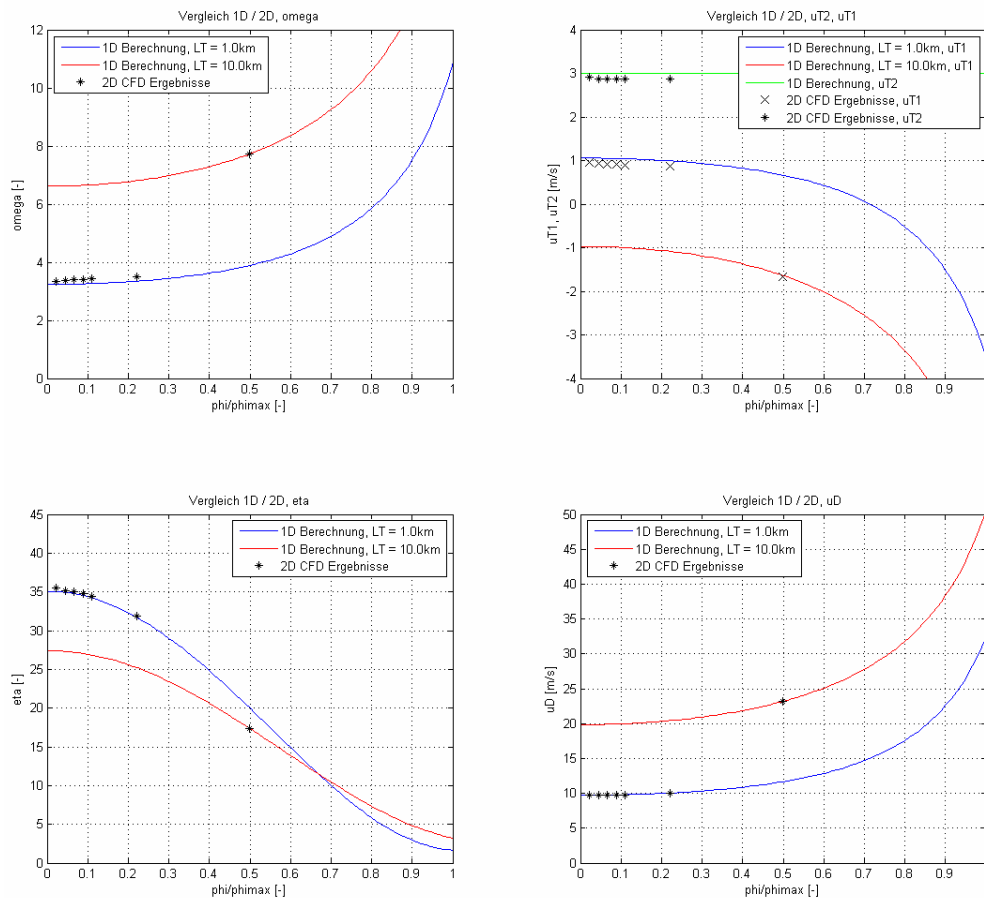


Abbildung 13.6: Vergleich zwischen 2D und 1D Berechnungen

Fall		Unterschied 1D / 2D in % (Bezug: 1D Ergebnisse)					
Nr.	phi [°]	UD	uT1	uT2	$\omega$	$\eta$	$\Delta p_D$
1	2	-0.30%	-9.17%	-3.15%	2.95%	1.21%	-15.79%
2	4	0.00%	-11.97%	-4.12%	4.30%	0.63%	-17.57%
3	6	0.04%	-12.89%	-4.50%	4.75%	0.55%	-18.25%
4	8	0.04%	-13.26%	-4.61%	4.87%	0.58%	-18.44%
5	10	0.04%	-13.41%	-4.57%	4.84%	0.62%	-18.38%
6	20	0.05%	-12.45%	-4.14%	4.37%	0.63%	-17.53%
7	45	-0.04%	1.56%	-0.12%	0.08%	0.06%	-1.47%

Tabelle 13.4: Vergleich zwischen 2D und 1D Berechnungen

Aus dem Vergleich zwischen 2D und den 1D Berechnungen (siehe Abbildung 13.6 und Tabelle 13.4) ist folgendes ersichtlich:

- Der Unterschied des Wirkungsgrads  $\eta$  zwischen 2D und 1D Berechnungen ist sehr klein. Das heisst, dass die Wandreibungsverluste in der Umgebung der Einblasung im Vergleich zu den Verlusten im übrigen Teil des Tunnels sehr gering sind.
- Für den Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“ (Rechenfälle 1 bis 6) ist die statische Druckerhöhung, welche in den 2D Berechnungen mit dem Saccardo System erzielt wird, geringer als die der 1D Berechnungen. In den 2D Berechnungen wird der Impuls in x-Richtung, welcher von der Einblasung erzeugt wird, nicht vollumfänglich der Luftströmung im Tunnel weitergegeben. Erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Einblasung führen zu Verlusten, welche mit den 1D Berechnungen nicht berücksichtigt werden. Für die 2D Berechnungen führen diese Verluste zu einer kleineren statischen Druckerhöhung der Einblasung im Vergleich zu den 1D Berechnungen.
- Für den Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“ (Rechenfälle 1 bis 6) ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeiten  $u_{T1}$  und  $u_{T2}$  deutlich kleiner als die Ergebnisse der 1D Berechnungen. Dabei ist die Strömungsgeschwindigkeit  $u_{T1}$  zwischen etwa 9.0 % bis 13.5 % und die Geschwindigkeit  $u_{T2}$  zwischen etwa 3.0 % bis 4.5 % geringer. Die oben erwähnte geringere statische Druckerhöhung in den 2D Berechnungen führt zu einer niedrigen Strömungsgeschwindigkeit  $u_{T1}$ . Da die Strömungsgeschwindigkeit der Einblasung  $U_D$  vorgegeben wird, führt  $u_{T1}$  zu einer geringeren Strömungsgeschwindigkeit  $u_{T2}$  (Kontinuitätsgleichung).
- Auch für den Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung“ (Rechenfall 7) ist die statische Druckerhöhung geringer als bei den 1D Berechnungen. Der Unterschied zwischen 2D und 1D Berechnungen ist aber in diesem Fall geringer als bei den Fällen mit dem Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“. Der Unterschied der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten  $u_{T1}$  und  $u_{T2}$  zwischen 2D und 1D Berechnungen ist eher klein im Gegensatz zum Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“. In diesem Fall ist die Strömungsgeschwindigkeit  $u_{T2}$  nur von der Strömungsgeschwindigkeit der Einblasung  $U_D$  (bzw. vom eingeblasenen Volumenstrom) abhängig.

### 13.1.8 Folgerungen

Aus den CFD-Simulationen geht hervor, dass die Strömungsbilder für den Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“ ähnlich sind. Die Variation des Einblaswinkels (bis zu  $20^\circ$ ) hat insbesondere einen Einfluss auf die Position des Wirbels am Boden im Bereich der Einblasung und auf die Länge des Druckaufbaus.

Die Konstruktion zur Lufteinblasung von der Decke in einem Winkel von bis zu  $10^\circ$  ist eher schwierig, da für kleine Winkel grosse Deckenöffnungen (Länge der Einblasöffnung  $L_D$ ) notwendig sind. Für die Dimensionierung der Einblasung von Luft über die Decke ist somit von einem Einblaswinkel von über  $10^\circ$  auszugehen. Dies führt im Vergleich zu kleineren Einblaswinkeln zu kleineren Wirkungsgraden. In den betrachteten Fällen ist z.B. der Wirkungsgrad bei einem Einblaswinkel von  $10^\circ$  etwa 3 % kleiner, als der für einen Einblaswinkel von  $2^\circ$ . Um einen kleineren Einblaswinkel als  $10^\circ$  zu erreichen, können auch andere Gestaltungen der Einblasdüse als eine horizontale Deckenöffnung vorgesehen werden (siehe Beispiel in Abbildung 13.7). Die Untersuchung von alternativen Düsengeometrien würde aber der Umfang dieser Studie sprengen und wird hier nicht weiter behandelt.

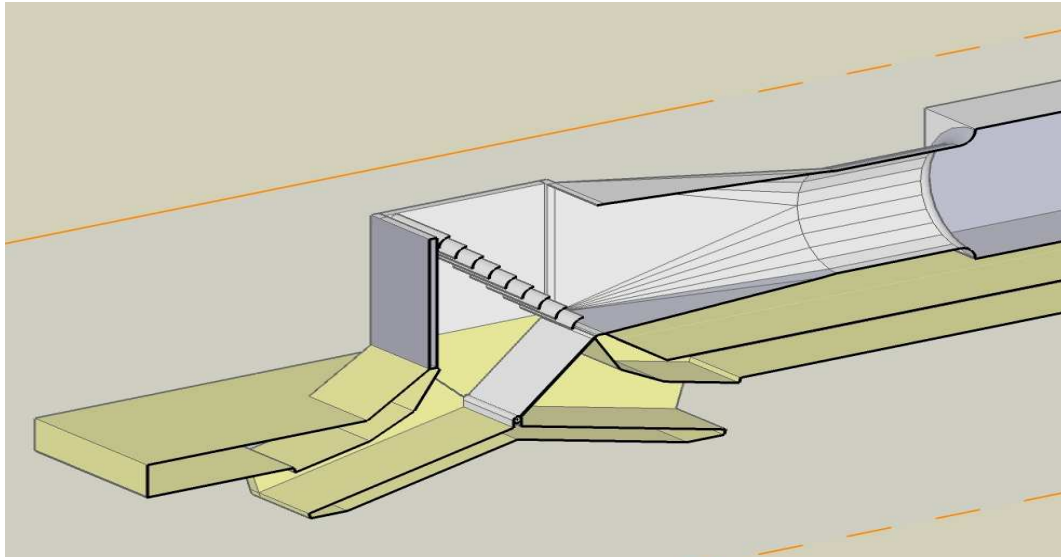


Abbildung 13.7: Alternative Gestaltung der Lufteinblasung (zweiseitig)

Die Ergebnisse und der Vergleich zwischen 2D und 1D Berechnungen zeigen, dass bei den 2D-Simulationen Verluste im Bereich der Einblasung entstehen, welche die Übertragung des Impulses auf die Strömung im Tunnel beeinflussen.

Die genannten Verluste sind bei den 1D Berechnungen (bzw. in der Dimensionierung) zu berücksichtigen. Es ist somit ein „Übertragungsfaktor“ zu bestimmen, welcher die Minderung des eingeleiteten Impulses durch das Saccardo System auf die Tunnelströmung beschreibt. Dieser Faktor ist der Impulsumsetzungskoeffizienten  $k_{MX}$  gemäss Kap. 2.3.1.



### 13.2.2 CFD-Geometrie des Systems mit Strahlventilator

Das CFD-Modell für das System mit Strahlventilator mit den relevanten Angaben wird in Abbildung 13.9 gezeigt. Dieses Modell entspricht weitgehend dem CFD-Modell, welches für das Saccardo System verwendet wird (siehe Kapitel 13.2.1). Das Modell weist nur keine Einblasöffnung im oberen Bereich auf. Anstelle der Einblasöffnung wird ein Strahlventilator mit einer Öffnung von 1.0 m und einer Länge von 5.0 m vorgesehen. Die Öffnung entspricht der Einblasöffnung des Saccardo Systems. Der Strahlventilator wird mit einem unendlich dünnen Gehäuse modelliert. Der Abstand zwischen Gehäuse und Tunnelboden beträgt 4.8 m und die Distanz zwischen Gehäuse und Decke beträgt 0.3 m (siehe Abbildung 13.9). Diese Angaben entsprechen den Anforderungen der Richtlinie „Lüftung der Strassentunnel“ [1]. Es wird eine Tunnellänge von 250 m modelliert. In Tabelle 13.6 sind die geometrischen Randbedingungen des CFD-Modells aufgeführt.

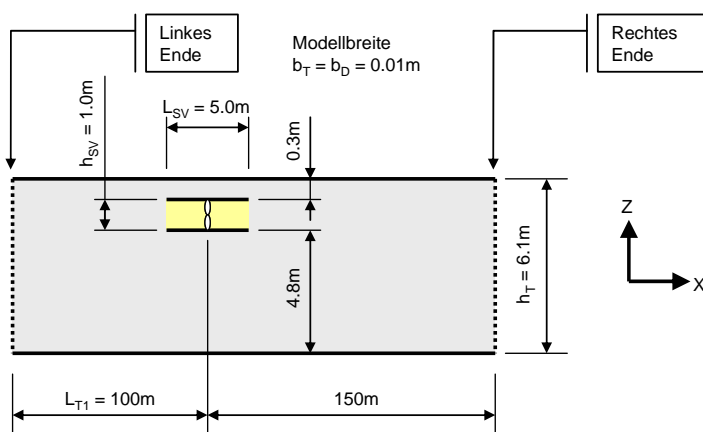


Abbildung 13.9: Geometrie des CFD-Modells mit den relevanten Angaben für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator

Fahrraumhöhe	$h_T$	6.1 m
Fahrraumbreite (bzw. Modellbreite)	$b_T$	0.01 m
Distanz zwischen linkes Ende und Strahlventilator	$L_{T1}$	100.0 m
Tunnellänge	$L$	250 m
Strahlventilatorhöhe	$h_{SV}$	1.0 m
Strahlventilatorbreite (bzw. Modellbreite)	$b_D$	0.01 m
Strahlventilatorlänge	$L_{SV}$	5.0 m
Flächenverhältnis	$\alpha (A_{SV}/A_T)$	0.164

Tabelle 13.6: Geometrische Daten des 2D CFD-Modells für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator

### 13.2.3 CFD-Gitter

Das CFD-Modell für das Saccardo System sowie das für das System mit Strahlventilator besteht aus rund 700'000 Zellen. Auch diese Gitternetze haben in y-Richtung nur 3 Zellen und sind im Bereich der Einblasstelle bzw. des Strahlventilators verfeinert worden.

### 13.2.4 Modellierungsgrundlagen für das Saccardo System und das System mit Strahlventilator

Der Impulsumsetzungskoeffizient für das Saccardo System und das System mit Strahlventilator wird bei unterschiedlichen Strömungszuständen bestimmt. Für das System mit Strahlventilator sind nur die Strömungszustände „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“ und „Abbremsen der Längsströmung“ möglich.

Die Einblasung von Luft in den Fahrraum des Saccardo Systems wird mit einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit an einer Öffnung im oberen Bereich des CFD-Modells definiert (siehe Abbildung 13.8 und Abbildung 13.11). Es wird die Einblasung mit 3 unterschiedlichen Einblaswinkeln simuliert. Für jeden Einblaswinkel werden die unterschiedlichen Strömungszustände simuliert. Die Strömungsgeschwindigkeit an der Einblasstelle  $U_D$  wird so definiert, dass bei gleich bleibendem Strömungszustand die induzierte Kraft in x-Richtung unabhängig vom Einblaswinkel möglichst gleich bleibt.

Die Geometrie des Laufrades des Strahlventilators wird im Modell nicht einbezogen, sondern die Beschleunigung der Luft im Strahlventilator wird mit einer volumetrischen Impulsquelle modelliert. Fluid, welches in ein definiertes Volumen innerhalb des Strahlventilators gelangt, wird in x-Richtung auf eine definierte Strömungsgeschwindigkeit  $U_{SV}$  beschleunigt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird so definiert, dass die induzierte Kraft in x-Richtung den vergleichbaren Fällen des Saccardo Systems möglichst gleich ist. Die Impulsquelle bzw. der zusätzliche Term in der Impulsleichung wird für die Strömungsberechnungen wie folgt definiert:

$$S_{M,x} = \text{const} \cdot (u - U_{SV}) \quad (\text{Gl. 13.8})$$

Das Modell eines Strahlventilators mit einer Impulsquelle wird in Abbildung 13.10 schematisch gezeigt.

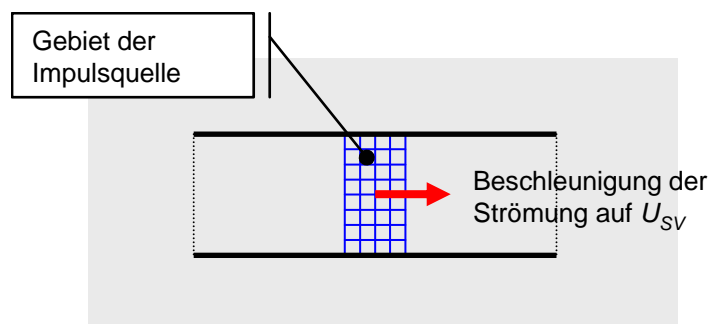


Abbildung 13.10: Modellierung eines Strahlventilators mit einer Impulsquelle (schematisch)

Um die unterschiedlichen Strömungszustände zu simulieren, werden am rechten Rand der Berechnungsdomäne (siehe Abbildung 13.8 und Abbildung 13.9) je nach Fall ein Verlustbeiwert  $\zeta_2$  berücksichtigt. Für die Rechenfälle, in welche den Strömungszustand „Abbremsen der Längsströmung“ simuliert wird, wird zusätzlich ein Überdruck am rechten Rand angenommen.

Alle 2D Simulationen werden isotherm durchgeführt.

Zur Berücksichtigung der Wandreibung wird in Anlehnung an die Richtlinie [1] eine Wandrauigkeit von 3 mm angenommen.

Die Aussenwände des Strahlventilators werden als hydraulisch glatt angenommen. Die Innenwände des Strahlventilators werden reibungslos angenommen, damit die Strömungsgeschwindigkeiten am Austritt des Strahlventilators über die ganze Austrittsfläche möglichst einheitlich sind.

Für alle Rechenfälle wird das RANS-basierte Turbulenzmodell  $k-\epsilon$  eingesetzt (RANS = Reynolds averaged Navier Stokes) [24].

### 13.2.5 Randbedingungen des Saccardo Systems

Die Randbedingungen des CFD-Modells für das Saccardo System werden in Abbildung 13.11 gezeigt und in Tabelle 13.7 zusammengefasst.

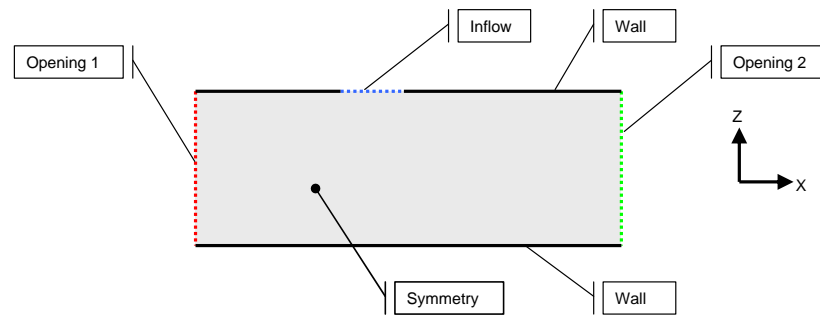


Abbildung 13.11: Festlegung der Randbedingungen für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems

Randbedingung	Eigenschaften	
Inflow	Geschwindigkeitsrandbedingung	- Geschw.-Komponenten $u$ und $v$ in Abhängigkeit des Einblaswinkels und der Einblasgeschwindigkeit $U_D$ (ändert je nach Simulationsfall) - Geschw.-Komponente $w = 0$ m/s
Opening 1	Druckrandbedingung	- Statischer Druck $p_{stat} = 0$ Pa
Opening 2	Druckrandbedingung	- Statischer Druck $p_{stat}$ (ändert je nach Simulationsfall) - Verlustbeiwert $\zeta_2$ (ändert je nach Simulationsfall)
Wall	Wandrandbedingung	- Rauigkeit 3 mm

Tabelle 13.7: Festlegung der Randbedingungen für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems

### 13.2.6 Randbedingungen des Systems mit Strahlventilator

Die Randbedingungen des CFD-Modells für das System mit Strahlventilator werden in Abbildung 13.12 gezeigt und in Tabelle 13.8 zusammengefasst.

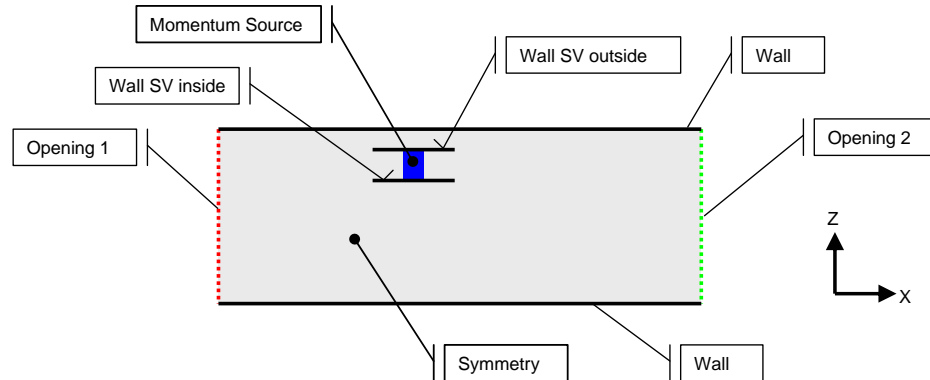


Abbildung 13.12: Festlegung der Randbedingungen für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator

Randbedingung	Eigenschaften	
Momentum Source	Impulsquelle	- Quelle in x-Richtung (siehe Kap. 13.2.4) - Quelle in y-Richtung = 0 - Quelle in z-Richtung = 0
Opening 1	Druckrandbedingung	- Statischer Druck $p_{stat} = 0 \text{ Pa}$
Opening 2	Druckrandbedingung	- Statischer Druck $p_{stat}$ (ändert je nach Simulationsfall) - Verlustbeiwert $\zeta_2$ (ändert je nach Simulationsfall)
Wall	Wandrandbedingung	- Rauigkeit 3 mm
Wall SV inside	Wandrandbedingung	- Ohne Reibung (slip wall)
Wall SV outside	Wandrandbedingung	- Hydraulisch glatt

Tabelle 13.8: Festlegung der Randbedingungen für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator

### 13.2.7 Rechenfälle

In der Tabelle 13.9 und Tabelle 13.10 sind die Simulationsfälle für das Saccardo System bzw. das System mit Strahlventilator mit den relevanten Angaben aufgeführt.

Alle Simulationsfälle sind stationär durchgeführt worden, nur der Rechenfall 18 (siehe Tabelle 13.10) ist instationär berechnet worden. Mit dem genannten Fall wird der Strömungszustand „Abbremsen der Längsströmung“ wiedergegeben, welcher mit dem System mit Strahlventilator simuliert wird. Das Auftreffen der ausgeblasenen Luft des Strahlventilators auf die entgegenkommende Luft aus dem rechten Rand erzeugt eine Instabilität in der Strömung im Bereich des Strahlventilatorsstrahls (siehe Kap. 13.2.8).

Rechenfall	$\varphi$ [°]	$U_D$ [m/s]	$\zeta_2$ [-]	$p_{stat}$ (am rechten Rand) [Pa]
8	15	20.15	3.38	0
9	15	34.93	13.50	0
10	15	23.05	13.50	200
11	30	21.39	3.38	0
12	30	36.84	13.50	0
13	30	24.08	13.50	200
14	45	23.86	3.38	0
15	45	40.60	13.50	0
16	45	26.05	13.50	200

Tabelle 13.9: Zusammenstellung der Rechenfälle für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems

Rechenfall	$U_{sv}$ [m/s]	$\zeta_2$ [-]	$p_{stat}$ (am rechten Rand) [Pa]
17	18.74	3.38	0
18	25.13	13.50	200

Tabelle 13.10: Zusammenstellung der Rechenfälle für die Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator

### 13.2.8 Ergebnisse, Auswertung

Die Abbildung 13.13 bis Abbildung 13.15 zeigen die Strömungsvektoren im Bereich der Einblasstelle für die Simulationen mit dem Saccardo System. In der Abbildung 13.16 sind dagegen die Strömungsvektoren im Bereich des Strahlventilators für die Simulationen mit dem System mit Strahlventilator dargestellt.

Im Kap. 13.2.9 sind weitere Bilder mit der Verteilung des statischen Drucks und der Geschwindigkeitsverteilung im modellierten Bereich für die Simulationen mit dem Saccardo System und dem System mit Strahlventilator zusammengefasst.



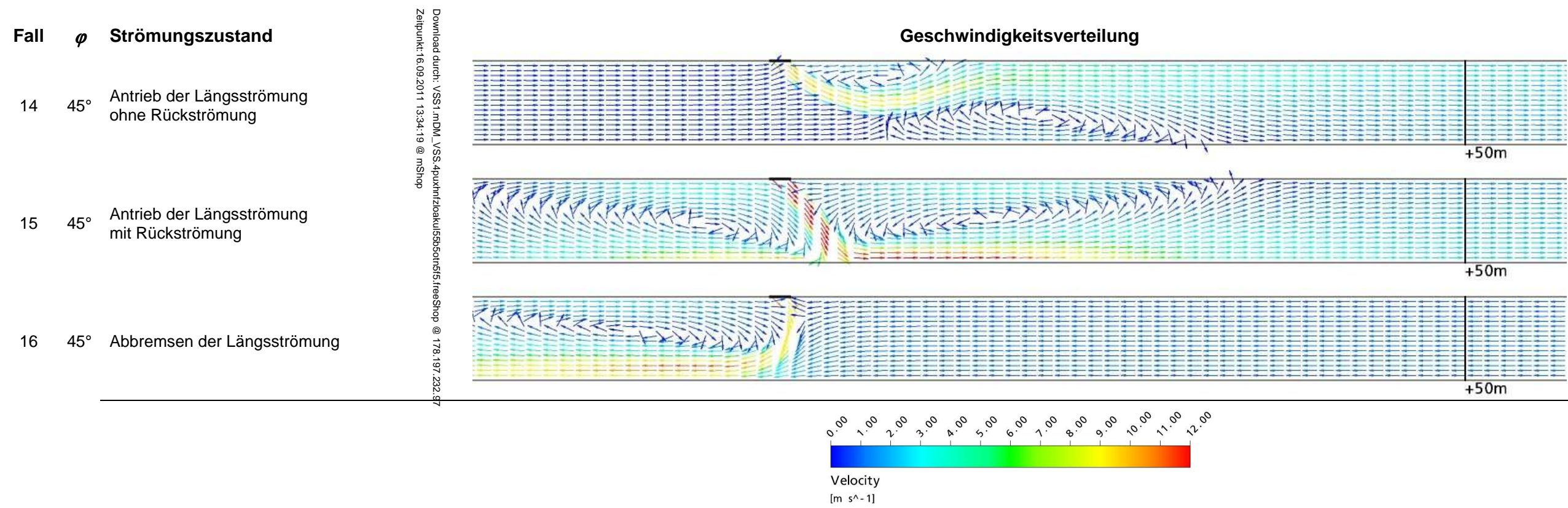


Abbildung 13.15: Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) im Bereich der Einblasung bei einem konstanten Einblaswinkel von 45°



### 13.2.9 Bilder der Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems und des Systems mit Strahlventilator

Die gezeigten Bilder in diesem Kapitel sind in der Höhe vergrößert worden, damit die ganze Länge des simulierten Gebiets (250 m) abgebildet werden konnte.

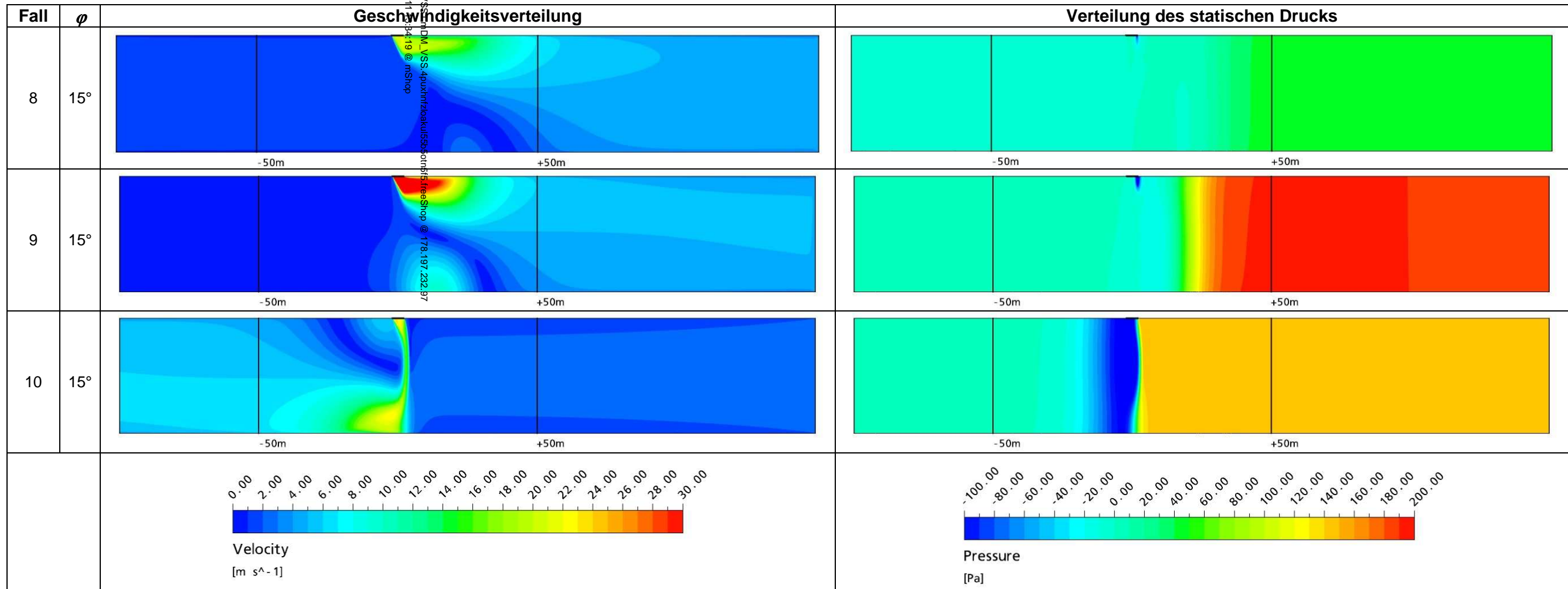


Abbildung 13.17: Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) und Druckverteilung bei einem konstanten Einblasungswinkel von 15°

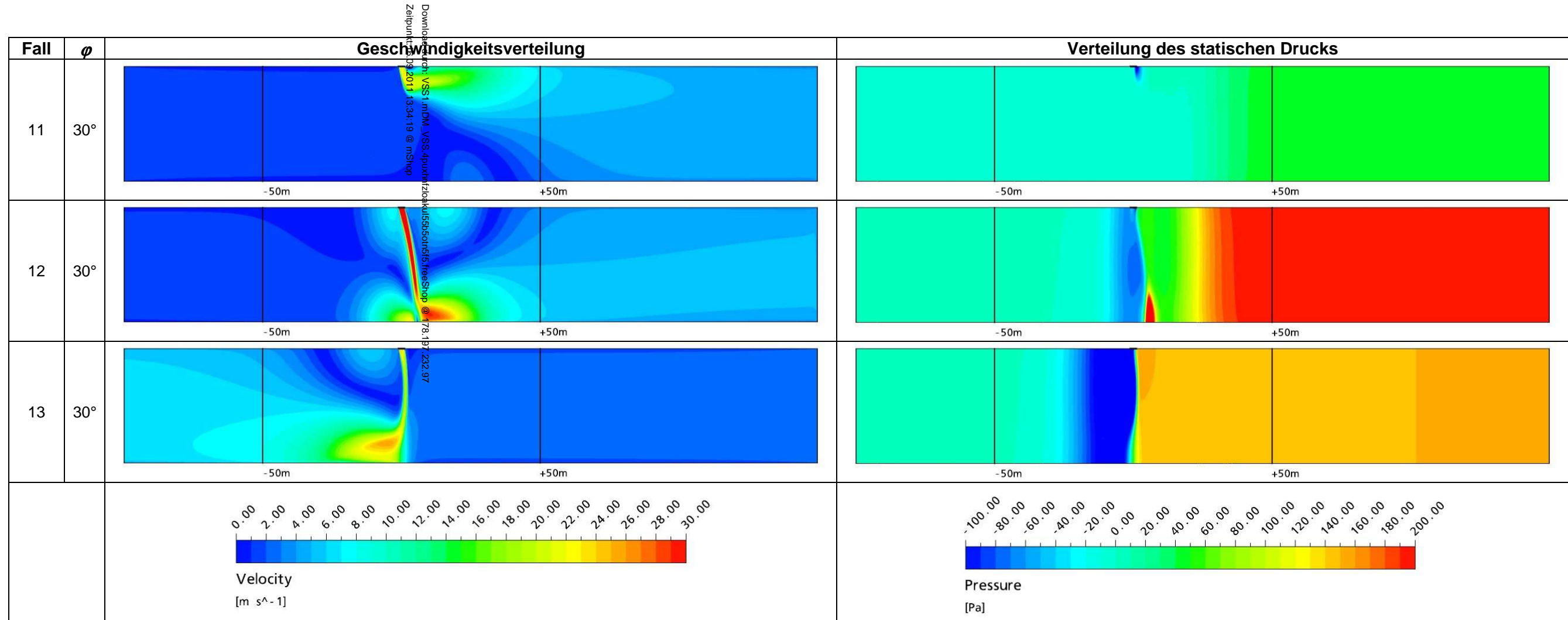


Abbildung 13.18: Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) und Druckverteilung bei einem konstanten Einblasungswinkel von 30°

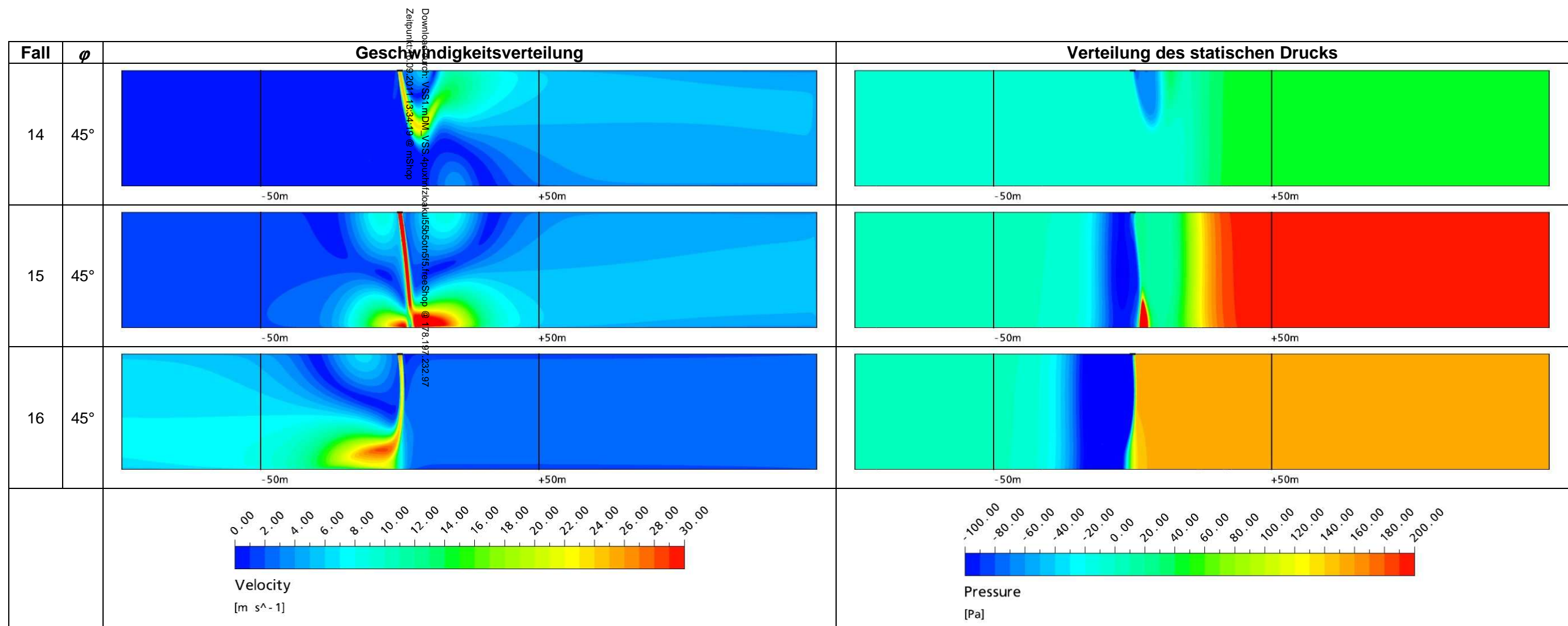


Abbildung 13.19: Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) und Druckverteilung bei einem konstanten Einblasungswinkel von 45°

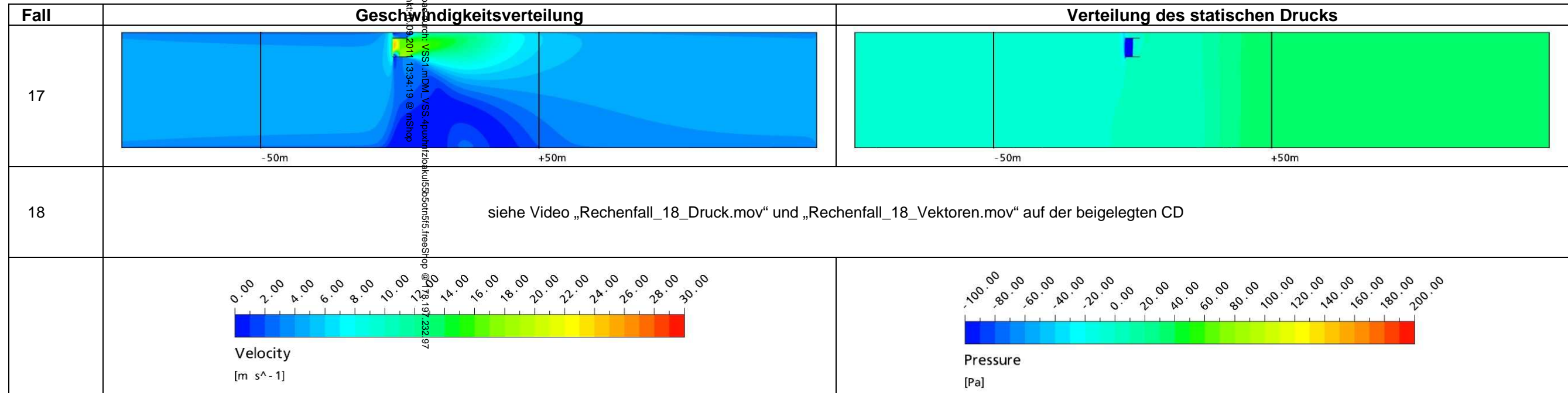


Abbildung 13.20: Geschwindigkeitsverteilung (Betrag) und Druckverteilung im System mit Strahlventilator

Aus den Ergebnissen der CFD-Simulationen resultieren die in Abbildung 13.21 und Tabelle 13.11 dargestellten Impulsumsetzungskoeffizienten. In Abbildung 13.21 werden die Impulsumsetzungskoeffizienten des Saccardo Systems in Abhängigkeit des Einblaswinkels für verschiedene Strömungszustände gezeigt. Die genannten Werte sind durch Polynome approximiert worden. In der Tabelle 13.11 sind zudem die Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator aufgeführt.

Die Berechnung des Impulsumsetzungskoeffizienten ist gemäss Kap. 2.3.4 durchgeführt worden. Für den Rechenfall 18 (System mit Strahlventilator, instationär) ist der Mittelwert über eine Periode berechnet worden.

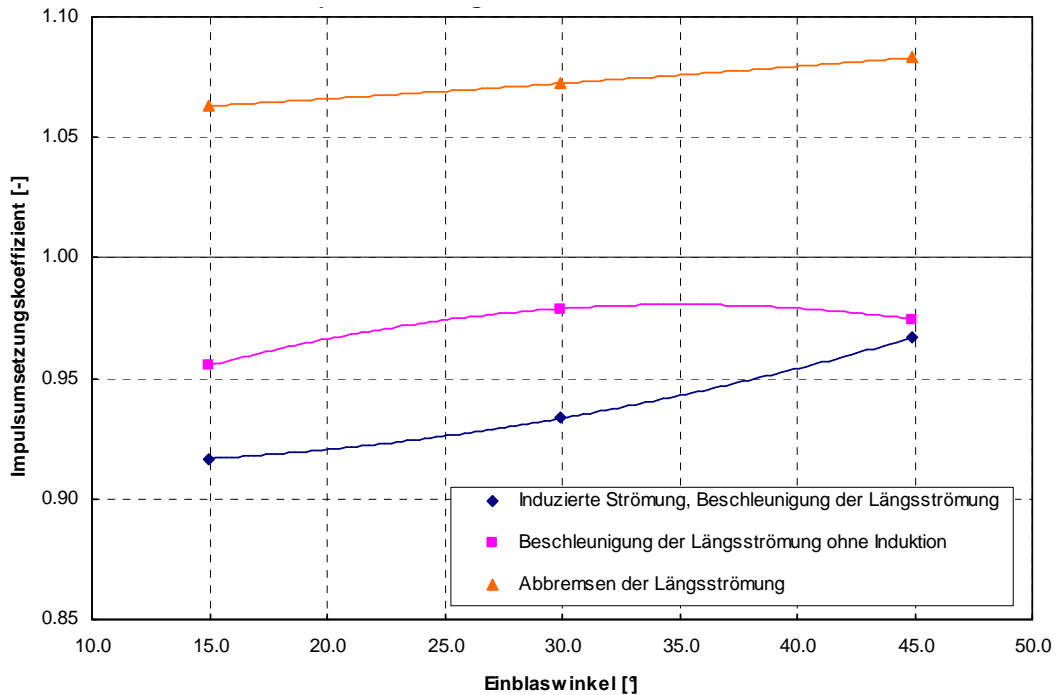


Abbildung 13.21: Impulsumsetzungskoeffizient in Abhängigkeit des Einblaswinkels für verschiedene Strömungszustände (Saccardo System)

Strömungszustand	System	$\varphi$ [°]	$k_{MX}$ [-]	Rechenfall
Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung	SV	0	0.902	17
	Sacc.	15	0.927	8
		30	0.934	11
		45	0.967	14
Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung	Sacc.	15	0.955	9
		30	0.979	12
		45	0.975	15
Abbremsen der Längsströmung	SV	0	1.051	18
	Sacc.	15	1.063	10
		30	1.072	13
		45	1.083	16

Tabelle 13.11: Impulsumsetzungskoeffizienten  $k_{MX}$  des Saccardo Systems und des Systems mit Strahlventilatoren (SV)

Aus den berechneten Werten für Impulsumsetzungskoeffizienten ist Folgendes ersichtlich:

- Bei allen Strömungszustände nimmt tendenziell bei Zunahme des Einblaswinkels der Impulsumsetzungskoeffizienten auch zu. Für die Strömungszustände „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“ und „Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung“ heisst das, dass die eingeleitete Kraft in den Tunnel mit zunehmendem Einblaswinkel optimaler an die Tunnelströmung übertragen wird. Durch einen grösseren Einblaswinkel entstehen geringere Luftgeschwindigkeiten an der Tunneldecke und dadurch geringere Verluste durch Wandreibung.
- Der Unterschied zwischen dem Impulsumsetzungskoeffizient mit einem Einblaswinkel von 30° und 45° für den Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung“ ist sehr klein. In beiden Fällen trifft die eingeblasene Luft auf den Boden des Tunnels und verläuft nicht entlang der Decke. Die grössten Wandreibungsverluste entstehen somit am Boden, welche für beide Fälle in der gleichen Grössenordnung liegen.
- Eine Zunahme des Einblaswinkels ist mit einem grösseren Impulsumsetzungskoeffizienten aber auch mit einem geringeren Wirkungsgrad verbunden. Bei einem Saccardo System mit einem grossen Einblaswinkeln ist eine höhere Einblasgeschwindigkeit notwendig, als bei einem System mit einem kleineren Einblaswinkel, um die gleiche Kraft zu erzeugen.
- Die berechneten Impulsumsetzungskoeffizienten des Strömungszustands „Abbremsen der Längsströmung“ haben einen Wert über 1.0. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Strahl, welcher in Richtung des Bodens umgelenkt wird und am Boden streift, lokal eine hohe Wandreibungskraft entgegen der Längsströmung im Tunnel bewirkt.
- Im Allgemeinen sind in diesem Fall die Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator tiefer als die des Saccardo Systems. Das horizontale Ausblasen der Luft in Deckennähe bewirkt höhere Wandreibungsverluste als beim Saccardo System. Im Saccardo System wird mit dem Einblasen der Luft in einem bestimmten Winkel versucht, den Strahl möglichst von der Decke fern zu halten.

### 13.2.10 Folgerungen

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Impulsumsetzungskoeffizient vom Einblaswinkel und vom Strömungszustand abhängig ist. Die Impulsumsetzungskoeffizienten des Systems mit Strahlventilator mit horizontaler Ausblasung sind tiefer als die des Saccardo Systems. Die Abbildung 13.21 gibt Anhaltswerte für die zu verwendende Impulsumsetzungskoeffizienten für das Saccardo System an.

Für die Dimensionierung des Saccardo Systems im stationären Zustand sind die in Abbildung 13.21 dargestellten Kurven für den Impulsumsetzungskoeffizienten zu benutzen. Konservativ soll für den Strömungszustand „Abbremsen der Längsströmung“ ein Impulsumsetzungskoeffizient von max. 1.0 angenommen werden.

## 13.3 Instationäres Verhalten des Saccardo Systems

### 13.3.1 CFD-Geometrie

Für diese Untersuchung wird ein CFD-Modell für einen 1 km langen Tunnel erstellt, um die Trägheit der Luft im Tunnel zu berücksichtigen. Der Tunnel wird mit einer Fahrraumhöhe von 6.1 m angenommen. Für die Einblasung wird von einem Winkel von  $\varphi = 15^\circ$  ausgegangen. Das CFD-Modell mit den relevanten Angaben wird in Abbildung 13.22 gezeigt.

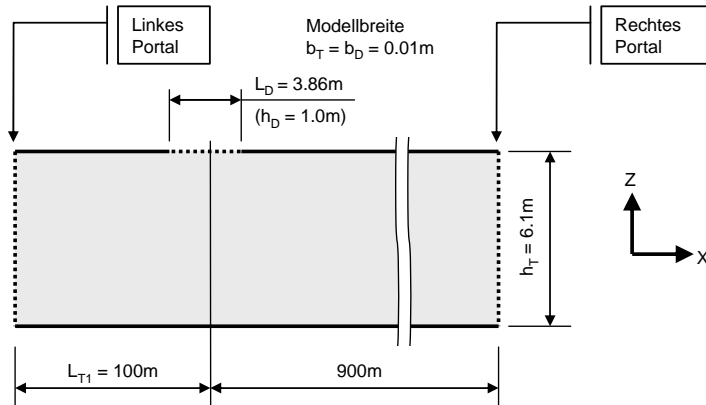


Abbildung 13.22: Geometrie des CFD-Modells mit den relevanten Angaben für die Analyse des instationären Verhaltens des Saccardo Systems

### 13.3.2 CFD-Gitter

Das CFD-Modell besteht aus rund 1'200'000 Zellen. Dieses Gitternetz hat in y-Richtung nur 3 Zellen. Grundsätzlich entspricht das Gitter im Bereich von 250 m vom linken Portal aus dem verwendeten Gitter im Kap. 13.2. Vom genannten Bereich aus in Richtung des rechten Portals ist das Gitter grobmaschiger.

### 13.3.3 Modellierungsgrundlagen

Die Einblasung von Luft in den Fahrraum erfolgt auch hier über eine Öffnung im oberen Bereich des CFD-Modells (siehe Abbildung 13.22). Für die instationären Simulationen wird zu Beginn davon ausgegangen, dass die Einblasung ausgeschaltet ist. Das Einschalten des Saccardo Systems erfolgt mit einer konstanten Rampe von  $U_{Dmin} = 0$  m/s bis zur maximalen Einblasgeschwindigkeit von  $U_{Dmax} = 20.0$  m/s über eine Zeitspanne von  $\Delta t = 30$  s.

Die Simulationen werden isotherm durchgeführt.

Es wird das RANS-basierte Turbulenzmodell k- $\epsilon$  eingesetzt (RANS = Reynolds averaged Navier Stokes) [24].

### 13.3.4 Randbedingungen

Für die Durchführung von instationären Simulationen sind Anfangsbedingungen notwendig. Für die vorliegende Untersuchung werden mit einer stationären Simulation die Anfangsbedingungen bestimmt.

Die Randbedingungen des CFD-Modells werden in Abbildung 13.23 gezeigt und für die stationäre bzw. instationäre Simulation in Tabelle 13.7 bzw. Tabelle 13.13 zusammengefasst.

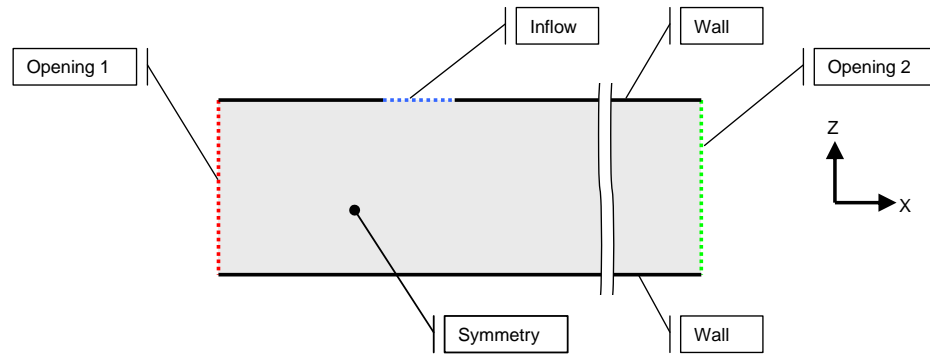


Abbildung 13.23: Festlegung der Randbedingungen für die stationäre und instationäre Simulation

Randbedingung	Eigenschaften	
Inflow	Geschwindigkeitsrandbedingung	- Geschw.-Komponente $u = v = w = 0 \text{ m/s}$
Opening 1	Druckrandbedingung	- Statischer Druck $p_{stat} = 0 \text{ Pa}$ - Verlustbeiwert $\zeta_1$
Opening 2	Druckrandbedingung	- Statischer Druck $p_{stat}$ - Verlustbeiwert $\zeta_2$
Wall	Wandrandbedingung	- Rauigkeit 3 mm

Tabelle 13.12: Festlegung der Randbedingungen für die stationäre Simulation

Randbedingung	Eigenschaften	
Inflow	Geschwindigkeitsrandbedingung	- Geschw.-Komponenten $u$ und $v$ in Abhängigkeit des Einblaswinkels $\varphi = 15^\circ$ und der Zeit (siehe Kap. 13.3.3) - Geschw.-Komponente $w = 0 \text{ m/s}$
Opening 1	Druckrandbedingung	- Statischer Druck $p_{stat} = 0 \text{ Pa}$ - Verlustbeiwert $\zeta_1$
Opening 2	Druckrandbedingung	- Statischer Druck $p_{stat}$ - Verlustbeiwert $\zeta_2$
Wall	Wandrandbedingung	- Rauigkeit 3 mm

Tabelle 13.13: Festlegung der Randbedingungen für die instationäre Simulation

### 13.3.5 Rechenfälle

Um das instationäre Verhalten des Saccardo Systems zu untersuchen, wird ein Fall betrachtet, bei welchem die Luft im Tunnel zu Beginn vom rechten zum linken Portal strömt und dann die Einblasung eingeschaltet wird, um die Strömungsrichtung im Tunnel umzukehren. Die zeitlichen Abläufe sind in Tabelle 13.14 definiert.

Zeitpunkt	Ereignis / Zustand
< 0 s	Luft strömt vom rechten zum linken Portal
0 s	Die Einblasung wird eingeschaltet
30 s	Die Eingeblasene Luft erreicht die maximale Strömungsgeschwindigkeit
360 s	Luft strömt vom linken zum rechten Rand (Ende der Simulation)

Tabelle 13.14: Definition der zeitlichen Abläufe für die Untersuchung des instationären Verhaltens des Saccardo Systems

Der Zustand vor dem Einschalten der Einblasung wird mit einer stationären Simulation ermittelt. In der Tabelle 13.15 sind die Simulationsfälle mit den relevanten Angaben aufgeführt.

Rechenfall	Typ	$\varphi$ [°]	$U_D$ [m/s]	$p_{stat}$ (am rechten Rand) [Pa]
19	stationär	15	0	10
20	instationär	15	0 bis 20.0 <sup>ii</sup>	10

Tabelle 13.15: Zusammenstellung der Rechenfälle für Untersuchung des instationären Verhaltens des Saccardo Systems

### 13.3.6 Ergebnisse, Auswertung

In der Tabelle 13.16 werden die instationären Strömungszustände im Tunnel chronologisch beschrieben, welche aus den Ergebnissen der instationären Simulation resultieren.

Unterstützend zur genannten Beschreibung werden in der Abbildung 13.21 die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten während dem instationären Prozess an der Einblasstelle sowie am rechten und am linken Portal gezeigt.

Die Abbildung 13.25 und Abbildung 13.26 zeigen die Strömungsvektoren im Bereich der Einblasstelle bzw. die statische Druckverteilung in einem Bereich von etwa 250 m vom linken Portal. Die dargestellten Bilder sind entsprechend den Zeitpunkten ausgewählt worden, welche in Tabelle 13.16 beschrieben werden. Die Plots in Abbildung 13.25 und Abbildung 13.26 sind in der Höhe verzerrt worden, damit ein grossen Längenbereich des Tunnels dargestellt werden konnte. Die schwarzen Linien in den Bildern der Abbildung 13.25 stellen Momentaufnahmen von Stromlinien dar, welche von der Einblasstelle gestartet worden sind.

Die instationären Strömungszustände des Rechenfalls 20 sind in Videos ersichtlich, welche diesem Bericht beigelegt sind. Die Videos zeigen die instationären Zustände zwischen 0 s bis 180 s, da in der genannten Zeitspanne die grössten Veränderungen in der Strömung beobachtet werden können.

<sup>ii</sup> Konstante Rampe von 0 m/s bis 20.0 m/s in 30 s

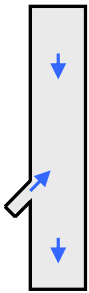
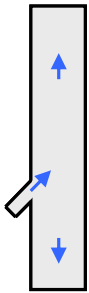
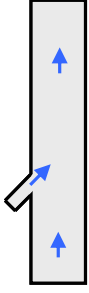

Ström.-Zust.	Zeit	Ereignis / Zustand
	0 s	Vor Einschalten der Einblasung: - Keine Einblasung - Die Luft im Tunnel strömt mit einer mittleren Geschwindigkeit von etwa 2.7 m/s vom rechten zum linken Portal.
	0 s bis 30 s	Einblasung fährt hoch: - Die Strömungsgeschwindigkeit der Einblasung nimmt zu. - Die Luft, welche in den Tunnel eingeblasen wird, wird in Richtung des linken Portals umgelenkt und beschleunigt die Luft im Bereich zwischen der Einblasstelle und dem linken Portal. - Es wird ein statischer Druck vor dem umgelenkten eingeblasenen Strahl aufgebaut und die Luftströmung zwischen der Einblasstelle und dem rechten Portal wird allmählich abgebremst.
	30 s	Einblasung erreicht $U_{Dmax}$ : - Die Strömungsgeschwindigkeit der Einblasung erreicht den Maximalwert von 20 m/s. - Die Luftströmung rechts von der Einblasstelle wird stärker abgebremst. Zwischen Einblasstelle und linkem Portal wird die Luftströmung nicht mehr gegen das linke Portal beschleunigt sondern abgebremst. - Der statische Druck, welcher vor dem umgelenkten eingeblasenen Strahl aufgebaut wurde, hält an.
	47 s	Wechsel des Strömungszustands: - Die Strömungsgeschwindigkeit der Einblasung ist konstant. - Die Luftströmung rechts von der Einblasstelle wurde auf 0 m/s abgebremst und nun wird sie in die andere Richtung (in Richtung des rechten Portals) beschleunigt. - Der statische Druck vor dem eingeblasenen Luftstrahl reduziert sich allmählich.
	47 s bis 112 s	Umschwenken des eingeblasenen Luftstrahls: - Die Strömungsgeschwindigkeit der Einblasung ist konstant. - Der eingeblasene Luftstrahl schwenkt allmählich in Richtung des rechten Portals. - Die Luftströmung rechts von der Einblasstelle wird in Richtung des rechten Portals beschleunigt. Die Luft links von der Einblasstelle, welche immer noch in Richtung des linken Portals strömt, wird abgebremst.
	112 s	Wechsel des Strömungszustands: - Die Strömungsgeschwindigkeit der Einblasung ist konstant. - Der eingeblasene Luftstrahl verläuft kurz nach der Einblasstelle im oberen Bereich des Tunnels horizontal bis er sich danach ausweitet. - Die Luftströmung links von der Einblasstelle ist auf 0 m/s abgebremst worden und nun wird sie in die andere Richtung (in Richtung des rechten Portals) beschleunigt.
	180 s	Antrieb der Luftströmung Richtung rechtes Portal: - Die Strömungsgeschwindigkeit der Einblasung ist konstant. - Die Luftströmung im Tunnel wird beschleunigt. Auf beiden Seiten der Einblasstelle herrscht eine Luftströmung vom linken zum rechten Portal. - Es ist noch keinen stationären Zustand erreicht worden.
	360 s	Ende der Simulation: - Die Strömungsgeschwindigkeit der Einblasung ist konstant. - Auf beiden Seiten der Einblasstelle herrscht eine Luftströmung vom linken zum rechten Portal. - Einen stationären Zustand ist in etwa erreicht worden.

Tabelle 13.16: Beschreibung der instationären Strömungszustände mit dem Saccardo System

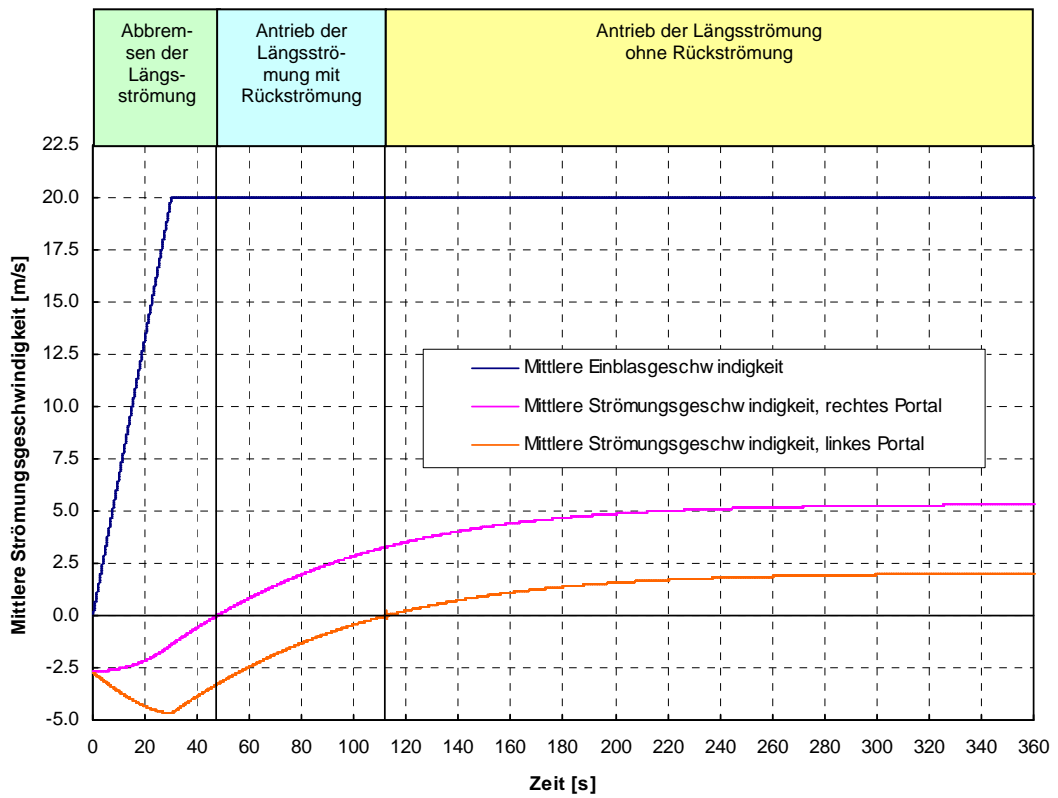


Abbildung 13.24: Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeit an den Portalen und an der Einblasstelle für die instationäre Simulation des Saccardo Systems

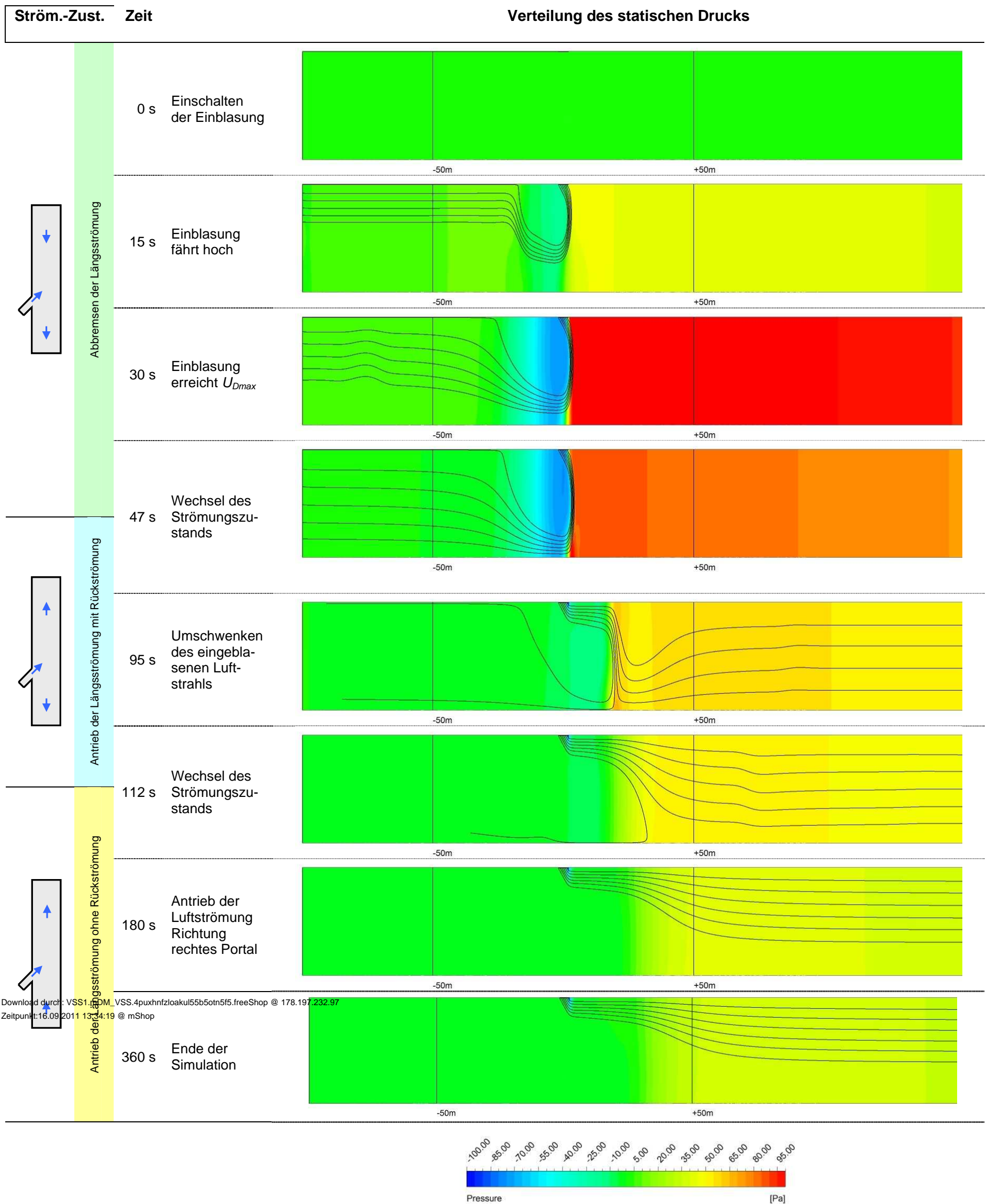
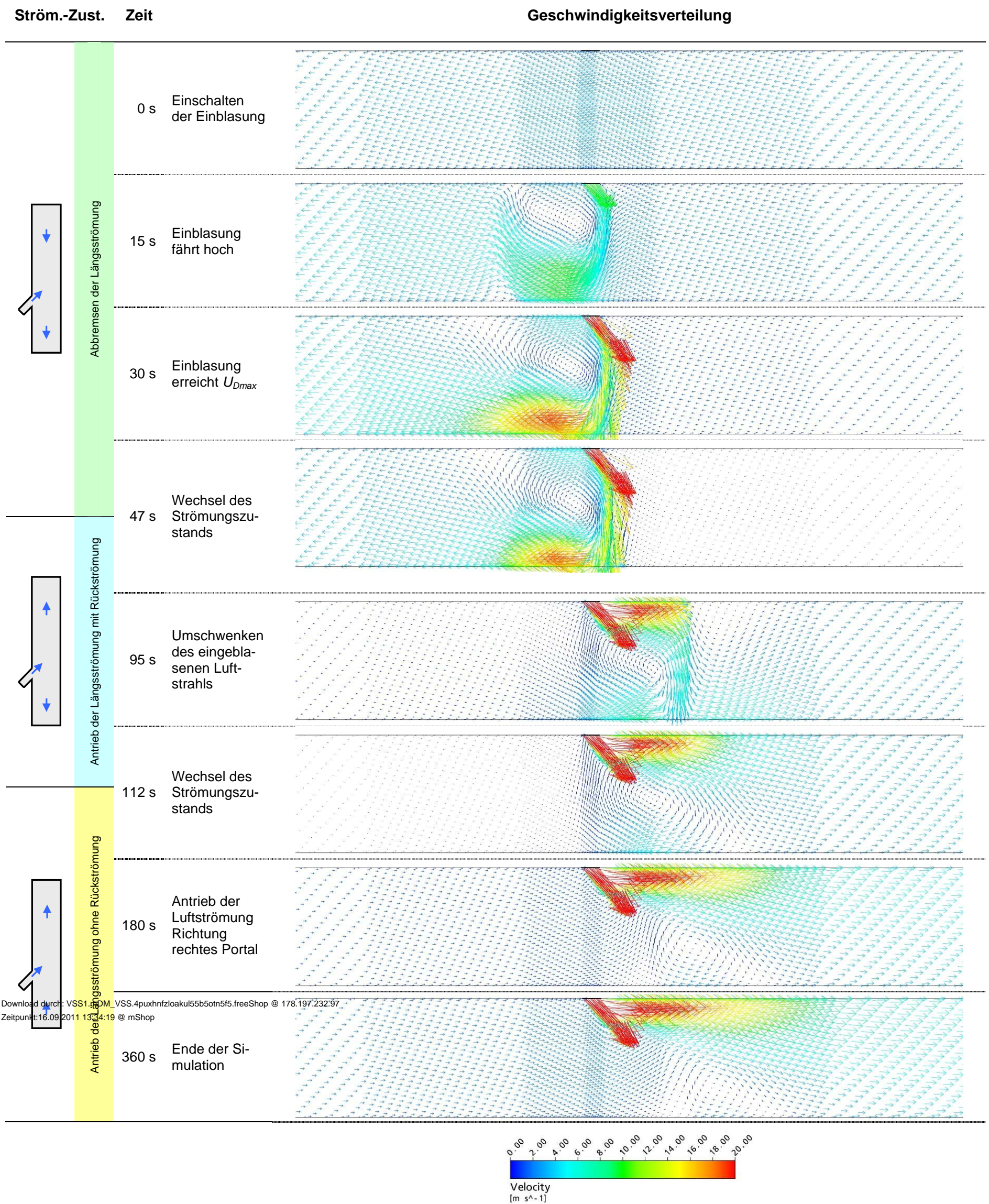


Abbildung 13.25: Verteilung des statischen Drucks in unterschiedlichen Zeitpunkten der instationären Simulation des Saccardo Systems



Download durch: VSS1... DM\_VSS.4puxhntzloakul55b5otn5f5.freeShop @ 178.197.232.97  
Zeitpunkt: 16.09.2011 13:24:19 @ mShop

Abbildung 13.26: Geschwindigkeitsvektoren in unterschiedlichen Zeitpunkten der instationären Simulation des Saccardo Systems

Copyright © bei Auftraggeber gemäss Urheberrecht / BER\_08-003-02\_V3\_BeeinflussungLuftströmung\_2010-09-30\_ohne\_Titelblatt.doc

Aus den Ergebnissen der instationären Simulation resultiert der zeitabhängige Impulsumsetzungskoeffizient, welcher in Abbildung 13.27 dargestellt ist. Die Berechnung des Impulsumsetzungskoeffizienten ist gemäss Kap. 2.3.4 durchgeführt worden.

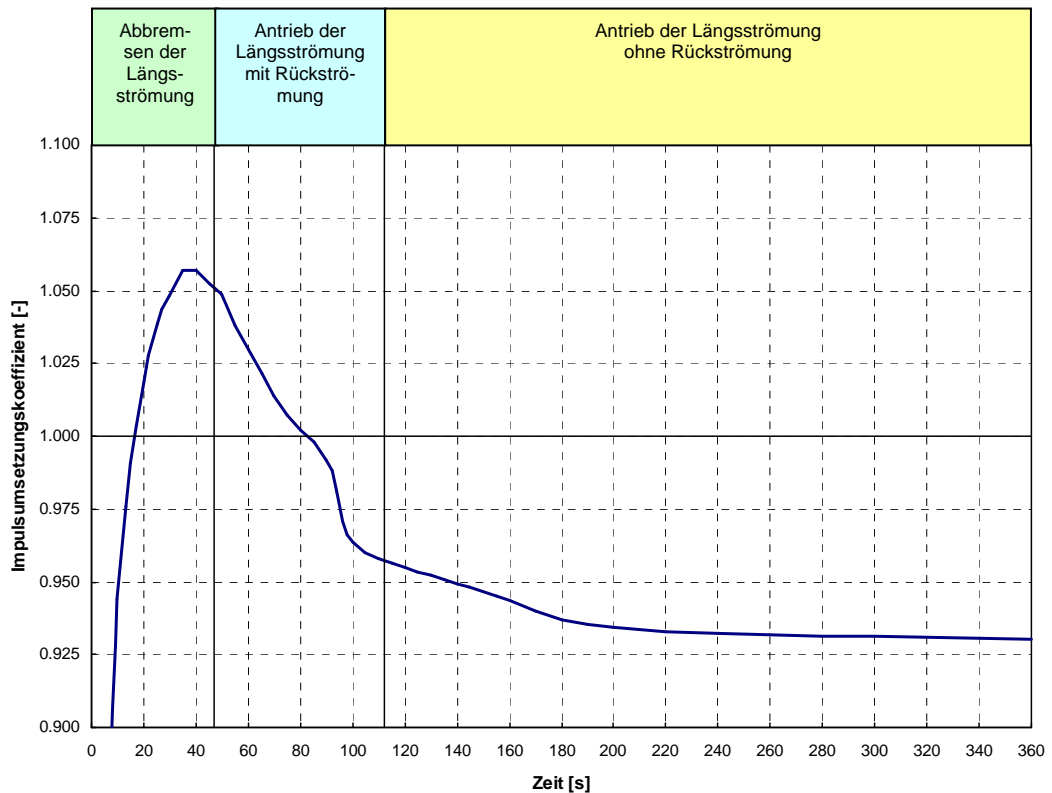


Abbildung 13.27: Impulsumsetzungskoeffizient in Abhängigkeit der Zeit für die instationäre Simulation des Saccardo Systems

Aus dem zeitabhängigen Impulsumsetzungskoeffizient (siehe Abbildung 13.27) ist folgendes ersichtlich:

- Im Strömungszustand „Abbremsen der Längsströmung“ entsteht einen Impulsumsetzungskoeffizient  $k_{MX}$  grösser als 1.0.
- Im Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung“ wechselt der Impulsumsetzungskoeffizient  $k_{MX}$  von über 1.0 auf niedriger als 1.0.
- Im Strömungszustand „Antrieb der Längsströmung ohne Rückströmung“ ist der Impulsumsetzungskoeffizient  $k_{MX}$  kleiner als der Impulsumsetzungskoeffizient des Strömungszustands „Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung“

Aus der Abbildung 13.27 kann folgendes interpretiert werden:

- Zu Beginn, zwischen 10 s und etwa 18 s, ist der Impulsumsetzungskoeffizient kleiner als 1.0. In dieser Zeitspanne wird der eingeblasene Luftstrahl in Richtung des linken Portals umgelenkt. Der Luftstrahl hat den Boden noch nicht erreicht bzw. die Strömungsgeschwindigkeiten am Boden, welche durch den Strahl erzeugt werden, sind noch klein. Es resultiert somit eine geringere Wandreibungskraft entgegen der vorhandenen Strömungsrichtung im Tunnel als beim gekrümmten Strahl mit maximaler Einblasgeschwindigkeit.

- Ab etwa 18 s nimmt die Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der Einblasung am Boden des Tunnels zu. Dies führt zu einer Zunahme der oben genannten Kraft, welche immer noch entgegen der Strömungsrichtung im Tunnel wirkt, und somit auch zu einer Zunahme des Impulsumsetzungskoeffizienten.
- Der Strömungszustand im Tunnel wechselt etwa 47s nach dem Einschalten der Einblasung vom Zustand „Abbremsen der Luftströmung“ zum Zustand „Antrieb der Längsströmung mit Rückströmung“ (vgl. Tabelle 13.16). Von der Einblasstelle aus entsteht eine Strömung in Richtung des linken und des rechten Portals. Der Impulsumsetzungskoeffizient nimmt ab, da die Wandreibungskraft am Boden des Tunnels im Bereich der Einblasung entsprechend abnimmt.
- Zwischen 90 s und 105 s nimmt der Impulsumsetzungskoeffizient stärker ab, da der Eingeblasene Luftstrahl in dieser Zeitspanne schneller in Richtung des rechten Portals umgeschwenkt wird. Anschliessend nimmt der Impulsumsetzungskoeffizient mit einer geringeren Steigung ab.

# 14 Anhang - 3D-Berechnungen Saccardo-Düse

## 14.1 Antrieb der Längsströmung

$u_{\text{Tunnel}} = + 1.5 \text{ m/s},$ 
 $u_{\text{Einfahrtsportal}} = - 0.9 \text{ m/s},$ 
 $u_{\text{Ausfahrtsportal}} = + 3.9 \text{ m/s},$ 
 $v_{\text{Saccardo}} = 35 \frac{\text{m}}{\text{s}},$

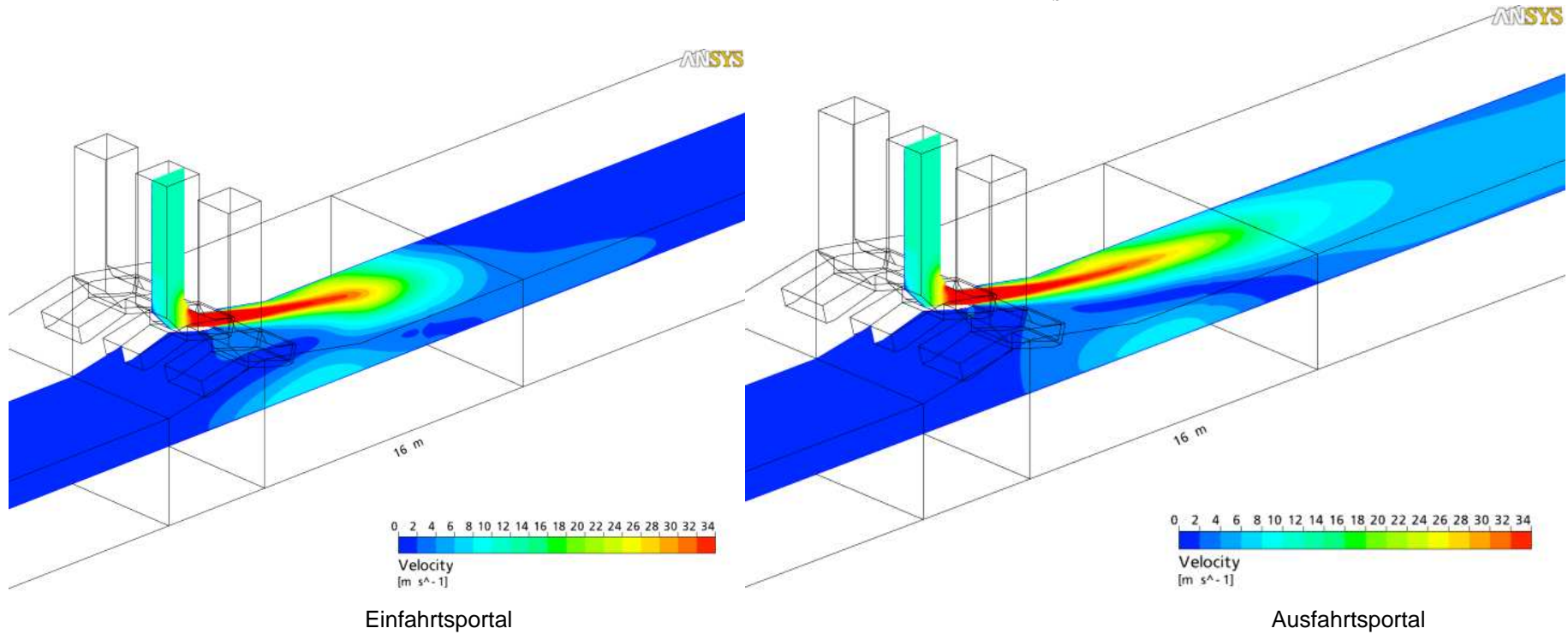


Abbildung 14.1 Beschleunigen, Luftgeschwindigkeiten Vertikalschnitt, Tunnelmitte

Download durch: VSS1.m...  
Zeitpunkt: 16.09.2011 13:34:19 @ mShop

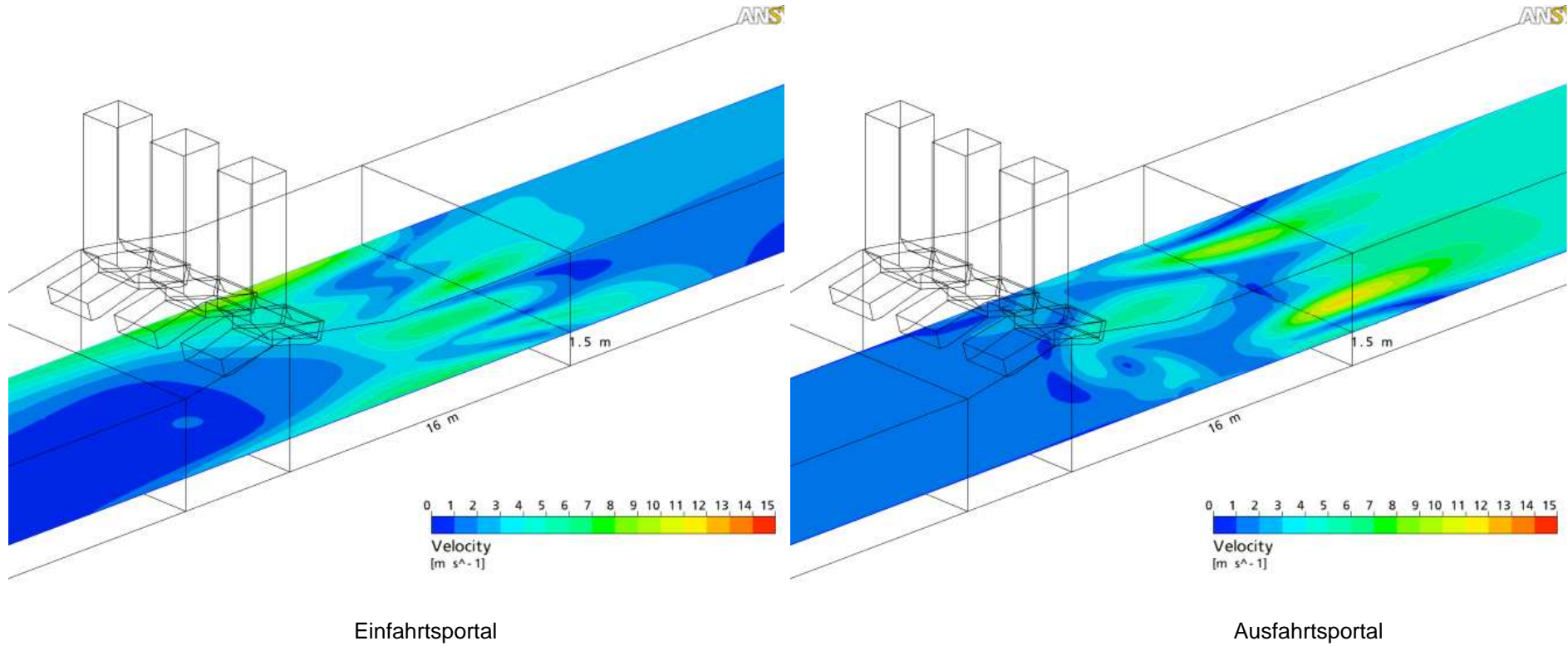


Abbildung 14.2 Beschleunigen, Luftgeschwindigkeiten Horizontalschnitt, H = 1.5 m









### 14.3 Blockieren

$$u_{\text{Tunnel}} = 0 \text{ m/s}, \quad u_{\text{Portal}} = - 2.4 \text{ m/s}, \quad v_{\text{Saccardo}} = 35 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Luftgeschwindigkeiten Vertikalschnitt, Tunnelmitte

Luftgeschwindigkeiten Horizontalschnitt, H = 1.5 m

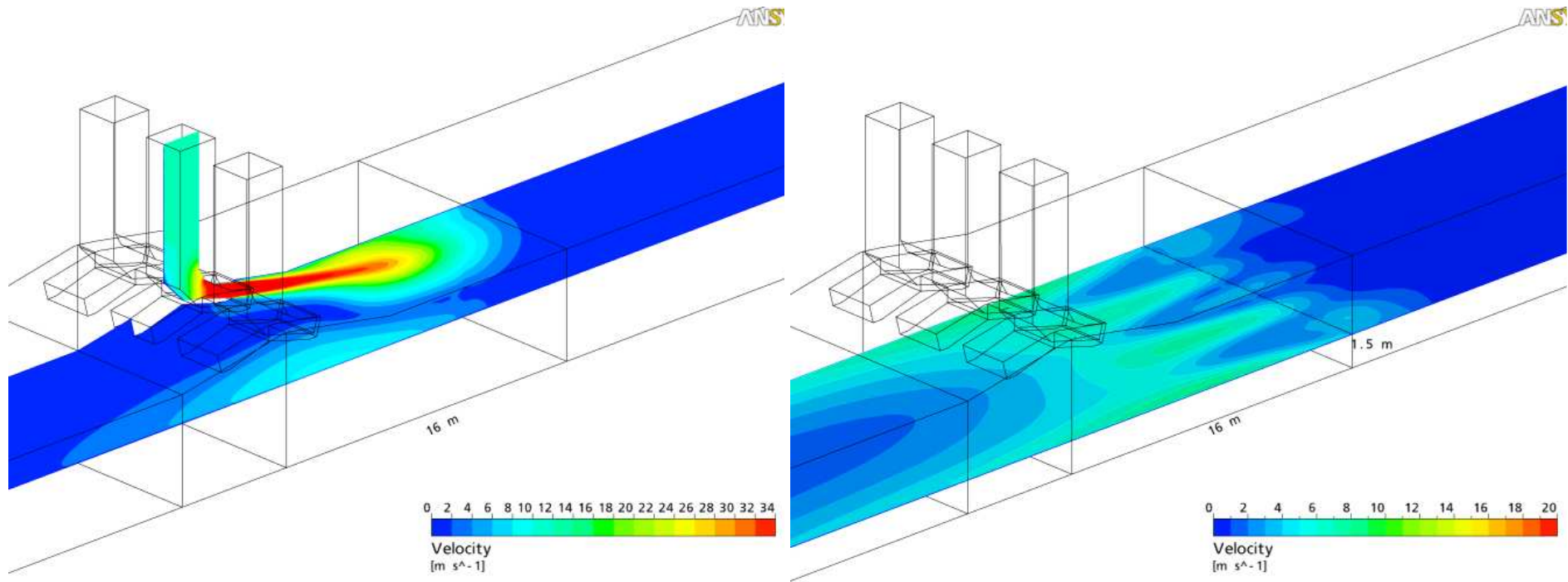
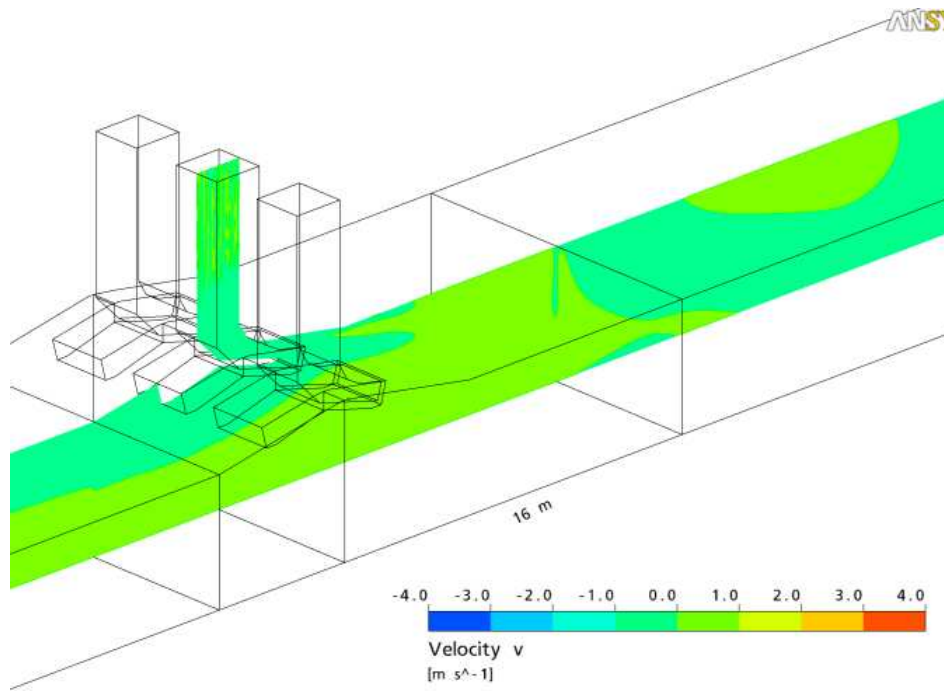


Abbildung 14.7 Blockieren max. Schub, Luftgeschwindigkeiten Vertikal- und Horizontalschnitt

Download durch: VSS1.m...  
Zeitpunkt: 16.09.2011 13:34:19 @ mShop

Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung Vertikalschnitt, Tunnelmitte



Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung Horizontalschnitt, H = 1.5 m

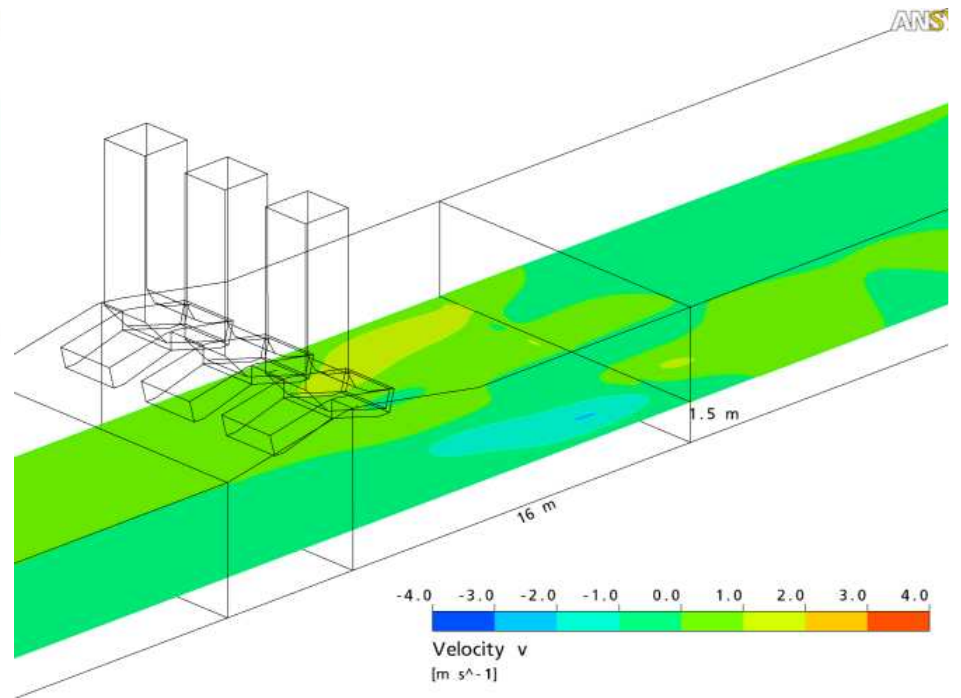


Abbildung 14.8 Blockieren max. Schub, Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung

### 14.4 Umluftsystem (äquivalent zu Strahlventilator zu Vergleichszwecken)

$$u_{\text{Tunnel}} = -4 \text{ m/s}, \quad u_{\text{Portal}} = -4 \text{ m/s}, \quad v_{\text{Strahlventilator}} = 35 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

Luftgeschwindigkeiten Vertikalschnitt, Tunnelmitte

Luftgeschwindigkeiten Horizontalschnitt, H = 1.5 m

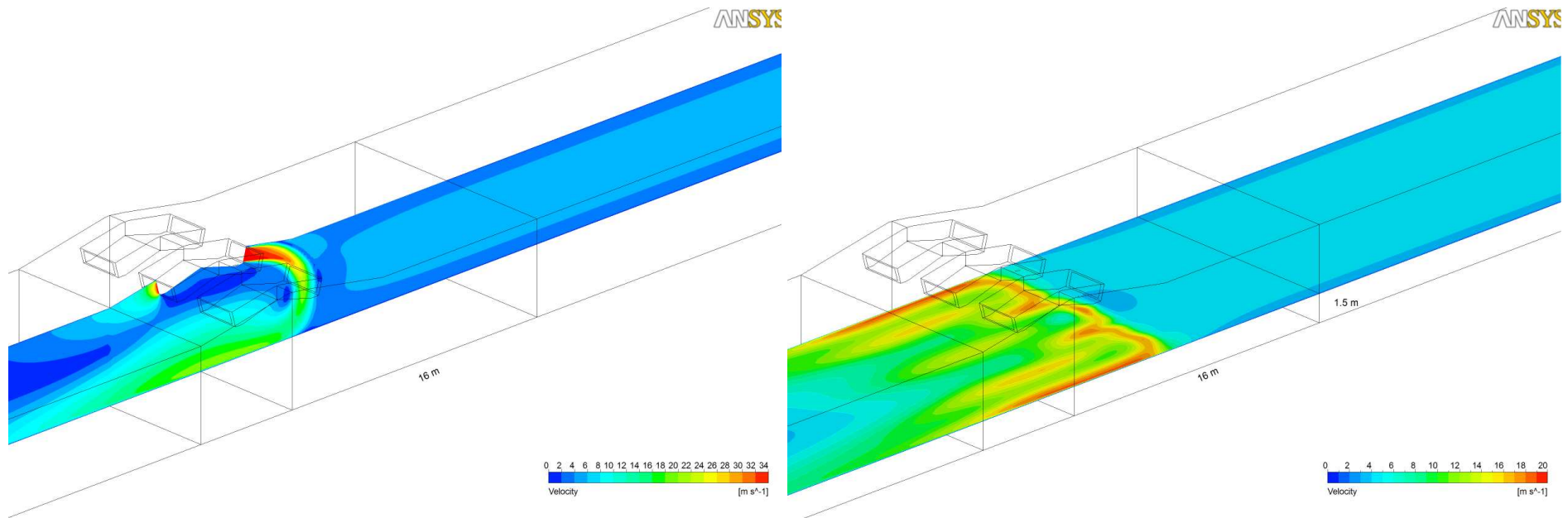


Abbildung 14.9 Umluftsystem, Luftgeschwindigkeiten Vertikal- und Horizontalschnitt

Download durch: VSS1.m...  
Zeitpunkt: 16.09.2011 13:34:19 @ mShop

Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung Vertikalschnitt, Tunnelmitte

Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung Horizontalschnitt, H = 1.5 m

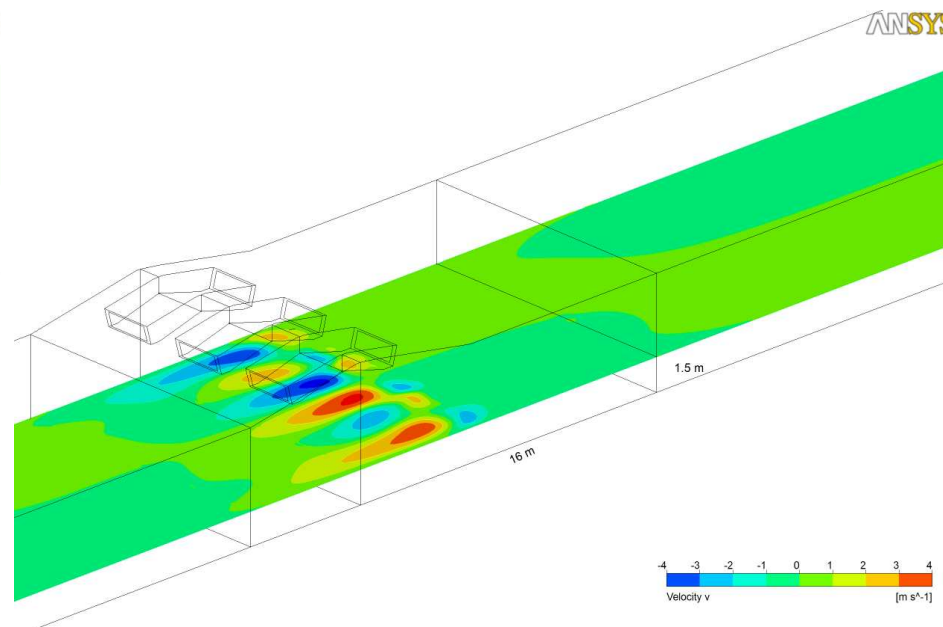
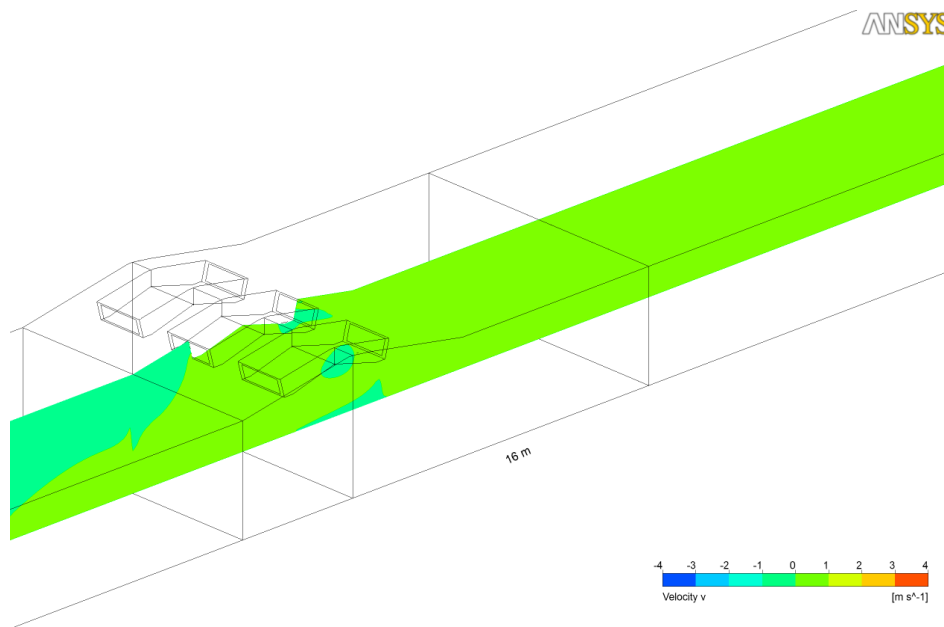


Abbildung 14.10 Umluftsystem, Luftgeschwindigkeiten quer zur Fahrtrichtung

# 15 Anhang - Messdaten Crapteig Tunnel

Ansicht von Süd

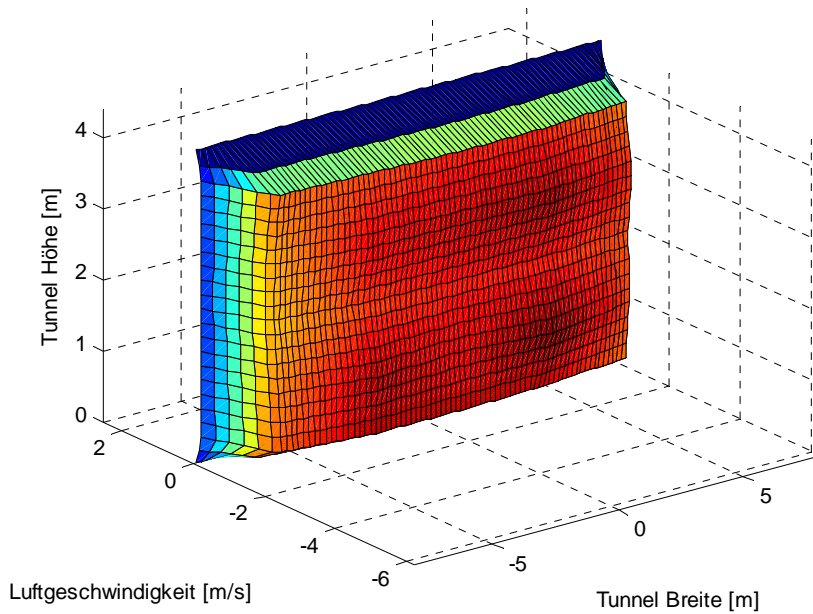


Abbildung 15.1 Natürliche Strömung → N, 0:33 h

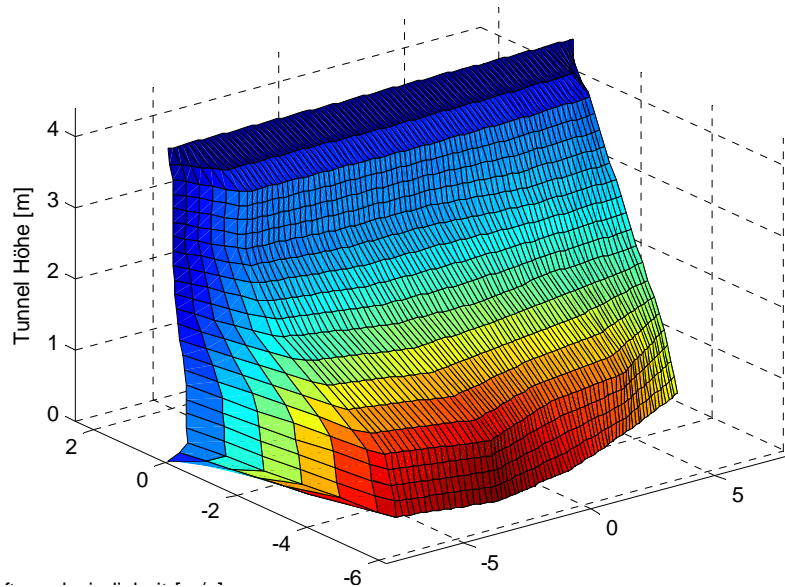


Abbildung 15.2 Beschleunigung der Strömung mit Saccardo-Düse → N, 0:45 h

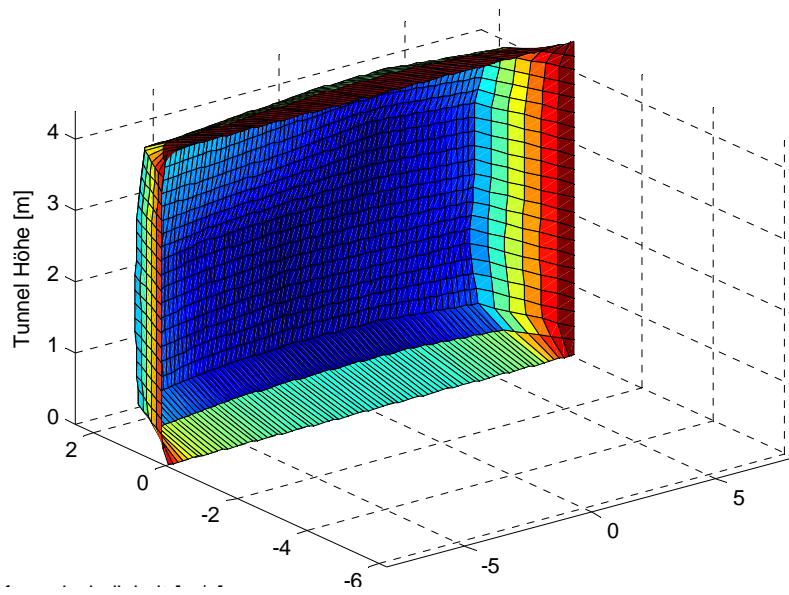


Abbildung 15.3 Strömung mit mobilem Strahlventilator → S, 1:20 h

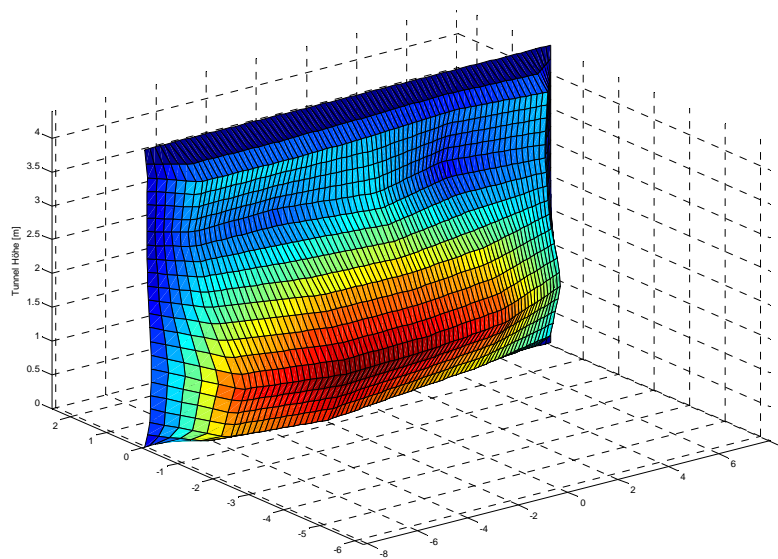


Abbildung 15.4 Abbremsen und Umkehren der Strömung mit Saccardo-Düse → N, 1:35 h