



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Strassen ASTRA**  
Abteilung Strassennetze N

# Richtlinie

## Lüftung der Strassentunnel

Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung

Ausgabe 2004 - V1.2

*Mit Beifügung des Anhangs VII:  
Präzisierungen vom 31. Juli 2006*



# Richtlinie

## Lüftung der Strassentunnel

Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung

Ausgabe 2004 - V1.2

### Impressum

#### Autor(en) / Arbeitsgruppe

|                   |                          |
|-------------------|--------------------------|
| Jeanneret A.      | (ASTRA, Vorsitz)         |
| Hofer A.          | (ASTRA, Vorsitz Stv.)    |
| Allemann M.       | (ASTRA)                  |
| Fruttschi F.      | (Kt. Waadt)              |
| Sarrasin H.       | (Kt. Wallis)             |
| Scheidegger H.-R. | (Ing. Büro)              |
| Schneider P.      | (Kt. Neuenburg)          |
| Stähli A.         | (Ing. Büro)              |
| Steinemann U.     | (Ing. Büro)              |
| Zumsteg F.        | (Ing. Büro, Erarbeitung) |

#### Herausgeber

Bundesamt für Strassen ASTRA  
Abteilung Strassennetze N, 3003 Bern

#### Ort, Jahr

Bern, 2004

#### Bezugsquelle

Die Richtlinie kann kostenlos von [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) herunter geladen werden.  
F043-0490



# INHALTSVERZEICHNIS

|  |           |                                   |  |           |
|--|-----------|-----------------------------------|--|-----------|
| <b>Vorwort</b> .....   | <b>1</b>  | <b>12</b>                         | <b>Wartungs- und Unterhaltsarbeiten</b> .....          | <b>32</b> |
| <b>1 Einführung</b> .....  | <b>3</b>  | 12.1                              | Luftqualität im Fahrraum.....                          | 32        |
| 1.1 Zweck der Richtlinie .....   | 3         | 12.2                              | Arbeitsumfang .....                                    | 32        |
| 1.2 Geltung .....  | 3         | <b>ANHÄNGE</b> .....              | <b>33</b>  |           |
| 1.3 Inkrafttreten .....  | 3         | <b>I</b>                          | <b>Verständigung</b> .....                             | <b>35</b> |
| <b>2 Aufgaben der Lüftung</b> .....                                    | <b>4</b>  | I.1                               | Abkürzungen .....                                      | 35        |
| 2.1 Schutzziele .....  | 4         | I.2                               | Einheiten.....   | 36        |
| 2.2 Lüftung bei normalem Verkehr.....                                  | 4         | I.3                               | Glossar .....  | 36        |
| 2.3 Lüftung im Ereignisfall.....                                       | 4         | <b>II</b>                         | <b>Richtwerte zur Verkehrsprognose</b> .....           | <b>38</b> |
| 2.4 Minderung der Umweltbelastung .....                                | 4         | II.1                              | Verkehrsentwicklung .....                              | 38        |
| <b>3 Beschreibung der Lüftungssysteme</b> .....                        | <b>5</b>  | II.2                              | Massgebender stündlicher Verkehr.....                  | 38        |
| 3.1 Hauptgruppen der Lüftungssysteme .....                             | 5         | II.3                              | Stauhäufigkeit.....                                    | 38        |
| 3.2 System der natürlichen Lüftung .....                               | 5         | <b>III</b>                        | <b>Emissionsberechnung</b> .....                       | <b>39</b> |
| 3.3 Mechanische Lüftungssysteme ohne<br>Absaugung im Ereignisfall..... | 5         | III.1                             | Grundlagen .....                                       | 39        |
| 3.4 Mechanische Lüftungssysteme mit<br>Absaugung im Ereignisfall.....  | 6         | III.2                             | Emissionen der Personenwagen.....                      | 39        |
| 3.5 Kombinierte Lüftungssysteme.....                                   | 7         | III.3                             | Emissionen der Lastwagen .....                         | 42        |
| <b>4 Anwendung der Richtlinie</b> .....                                | <b>8</b>  | III.4                             | Zeitliche Entwicklung der<br>Basisemissionen.....      | 45        |
| <b>5 Erforderliche Grunddaten</b> .....                                | <b>9</b>  | <b>IV</b>                         | <b>Strahlventilatoren</b> .....                        | <b>46</b> |
| 5.1 Tunneldaten .....  | 9         | IV.1                              | Allgemeines .....                                      | 46        |
| 5.2 Verkehrsdaten .....  | 9         | IV.2                              | Ventilatoraten .....                                   | 46        |
| 5.3 Übrige Angaben .....   | 9         | IV.3                              | Anordnung .....  | 46        |
| <b>6 Wahl des Lüftungssystems</b> .....                                | <b>10</b> | IV.4                              | Normalbetrieb .....                                    | 46        |
| 6.1 Vorgehen.....  | 10        | IV.5                              | Betrieb im Ereignisfall.....                           | 47        |
| 6.2 Grundlegende Verkehrsarten.....                                    | 10        | <b>V</b>                          | <b>Hinweise zu Komponenten (Checkliste)</b> ..         | <b>48</b> |
| 6.3 Bestimmung der Hauptgruppe des<br>Lüftungssystems .....            | 11        | <b>VI</b>                         | <b>Angaben zur Optimierung der<br/>Auslegung</b> ..... | <b>50</b> |
| 6.4 Bestimmung des Lüftungssystems .....                               | 13        | VI.1                              | Allgemeines .....                                      | 50        |
| <b>7 Dimensionierung</b> .....   | <b>14</b> | VI.2                              | Amortisation des Kapitaleinsatzes .....                | 50        |
| 7.1 Dimensionierung für den Normalbetrieb .....                        | 14        | VI.3                              | Mittlere Kosten.....                                   | 50        |
| 7.2 Dimensionierung für den Betrieb im<br>Ereignisfall.....            | 19        | VI.4                              | Nutzungsdauer resp.<br>Betrachtungsperiode .....       | 51        |
| 7.3 Minderung von Zusatzbelastungen in<br>Portalzonen .....            | 24        | VI.5                              | Kapitalzins und Teuerung.....                          | 52        |
| 7.4 Optimierung der Anlage .....                                       | 24        | VI.6                              | Energiepreise .....                                    | 52        |
| 7.5 Belüftung der Betriebsräume .....                                  | 24        | VI.7                              | Erforderliche Angaben.....                             | 52        |
| 7.6 Dokumentation der Dimensionierung.....                             | 25        | <b>VII</b>                        | <b>Präzisierungen vom 31. Juli 2006</b> .....          | <b>53</b> |
| <b>8 Ausstattung</b> .....   | <b>26</b> | VII.1                             | Geltungsbereich .....                                  | 53        |
| 8.1 Allgemeines.....   | 26        | VII.2                             | Präzisierungen.....                                    | 54        |
| 8.2 Messgeräte und Detektionseinrichtung.....                          | 26        | VII.3                             | Nomogramm zur Abschätzung der<br>Leckagemenge .....    | 56        |
| 8.3 Temperaturbeständigkeit.....                                       | 27        | <b>Literaturverzeichnis</b> ..... | <b>57</b>  |           |
| <b>9 Fluchtwege</b> .....  | <b>28</b> |                                   |  |           |
| 9.1 Allgemeines.....   | 28        |                                   |  |           |
| 9.2 Tunnel mit zwei parallelen Röhren.....                             | 28        |                                   |  |           |
| 9.3 Tunnel mit einer Röhre.....  | 28        |                                   |  |           |
| <b>10 Besondere Überprüfungen</b> .....                                | <b>29</b> |                                   |  |           |
| 10.1 Besondere Anforderungen an<br>Anlagekomponenten .....             | 29        |                                   |  |           |
| 10.2 Inbetriebnahme der Anlage.....                                    | 29        |                                   |  |           |
| 10.3 Überprüfung des Gesamtkonzeptes .....                             | 29        |                                   |  |           |
| <b>11 Betriebsbedingungen</b> .....                                    | <b>30</b> |                                   |  |           |
| 11.1 Luftqualität im Fahrraum .....                                    | 30        |                                   |  |           |
| 11.2 Steuerung.....  | 30        |                                   |  |           |
| 11.3 Nachvollziehbarkeit von besonderen<br>Ereignissen.....            | 31        |                                   |  |           |
| 11.4 Verkehrsbeeinflussung.....  | 31        |                                   |  |           |
| 11.5 Unterbrechungsfreie Stromversorgung<br>(USV).....                 | 31        |                                   |  |           |



## VORWORT

Früher wurden die Lüftungsanlagen der Strassentunnel nach den *"Grundlagen der Belüftung der Strassentunnel"* konzipiert und dimensioniert, einem Bericht, der 1983 im Auftrag des ASTRA erstellt wurde.

In den letzten Jahren haben sich die Bedingungen im Rahmen der Luftreinhaltung stark geändert. Mit der Einführung neuer Emissionsstandards wurde eine einschneidende Minderung der Schadstoffemissionen eingeleitet. Zusammen mit dem grossen Gefahrenpotential von Fahrzeugbränden in Tunneln hat dies dazu geführt, dass sich die Schwerpunkte der Lüftungsdimensionierung von der Luftqualität im Tunnel und in seiner Umgebung zur Erhaltung sicherer Fluchtmöglichkeiten für die Tunnelbenutzer bei einem Ereignisfall verschoben haben.

Im Dezember 1999 wurde die Schaffung der Richtlinie *"Lüftung der Strassentunnel -Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung"* initiiert. Die Richtlinienentwürfe wurden seit Mitte 2000 für die Konzeption und die Auslegung neuer Tunnellüftungen und für Sanierungen bestehender Anlagen verwendet. Dieser praktische Einsatz der Richtlinie über mehrere Jahre erlaubte es, aus den Erfahrungen zu profitieren. In dieser Zeit erfolgte auch ein intensiver Austausch mit Spezialisten anderer Länder, in Gremien der UNO, der EU, des Weltstrassen-Verbandes AIPCR und in der Tunnel Task Force, was zumindest teilweise zu einer Harmonisierung der Anforderungen an Tunnellüftungsanlagen mit den angrenzenden Ländern führte.

### **Bundesamt für Strassen**

Dr. Rudolf Dieterle

Direktor



# 1 EINFÜHRUNG

## 1.1 Zweck der Richtlinie

Die Richtlinie gilt für die Lüftung von Strassentunneln, welche bergmännisch oder im Tagbau erstellt werden. Die Tunnellüftung umfasst sämtliche Einrichtungen zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Luftqualität im Tunnelinnenraum im Normalbetrieb und in Ausnahmesituationen wie Störung des Verkehrsflusses oder Notfälle. Zum System der Tunnellüftung gehören insbesondere der Fahrraum, die Luftkanäle, die Lüftungszentralen, die Ventilatoren, die Mess- und Steuereinrichtungen.

Die Richtlinie beschreibt die zur Zeit der Veröffentlichung gebräuchlichen Lüftungskonzepte. Sie legt Grundsätze und Kriterien für die Systemwahl, die Auslegung und den Betrieb der Lüftungsanlagen der Strassentunnel fest. Sie dient einerseits einer Vereinfachung der Projektierung von Tunnellüftungen und andererseits einer Vereinheitlichung der Systeme und Anlagen.

Die Richtlinie richtet sich vor allem an die folgenden Anwender:

- die Bauherren, indem sie ein Instrument zur Verfügung stellt, das bei einfacheren Projekten eine rasche Erstbeurteilung zulässt,
- die Lüftungsingenieure, indem sie ihnen einheitliche und klare Randbedingungen für die Systemwahl und die Auslegung zur Verfügung stellt,
- die Ingenieure anderer Fachbereiche, indem sie die notwendigen Angaben zur Koordination der Fachbereiche schon in einer frühen Planungsphase liefert,
- die Tunnelbetreiber, indem sie grundlegende Anforderungen zu Inbetriebnahme, Betrieb und Unterhalt der Lüftungsanlage nennt.

## 1.2 Geltung

Die Richtlinie gilt für die Planung, die Systemwahl, die Dimensionierung und die Ausstattung von Tunnellüftungen. Sie nennt auch Anforderungen für den Betrieb und den Unterhalt von Tunnellüftungsanlagen. Die Richtlinie ist für alle vom Bund mitfinanzierten Strassentunnel verbindlich. Für die anderen Strassentunnel soll sie ebenfalls angewendet werden.

Die Richtlinie legt einen Standard fest, der auch bei der Sanierung bestehender Tunnel zu erfüllen ist.

Abweichungen zu den Festlegungen in der vorliegenden Richtlinie sind zulässig, wenn sie mit projektspezifischen Besonderheiten ausreichend begründet werden.

## 1.3 Inkrafttreten

Die vorliegende Richtlinie *Lüftung der Strassentunnel* tritt am 22. Dezember 2004 in Kraft. Sie ersetzt alle Entwurfsversionen sowie den Bericht "*Grundlagen der Belüftung von Strassentunneln*" [1] von Mai 1983 der im Auftrag des ASTRA erstellt wurde.

## **2 AUFGABEN DER LÜFTUNG**

### **2.1 Schutzziele**

Der Betrieb der Tunnellüftungsanlage verfolgt die folgenden, grundsätzlichen Schutzziele:

- die ausreichende Versorgung des Fahrraums mit Frischluft bei normalem Verkehr
- die Minimierung der Ausbreitung und der Konzentration der bei einem Ereignis entstehenden Schadstoffe im Fahrraum und auf den Fluchtwegen
- die Vermeidung übermässiger Schadstoffbelastungen durch Tunnelabluft im Bereich der Portale.

### **2.2 Lüftung bei normalem Verkehr**

Um eine ausreichende Luftqualität zu gewährleisten, muss der Fahrraum mit Frischluft versorgt werden. Zur Bestimmung des Frischluftbedarfs sind neben dem massgebenden stündlichen Verkehr MSV je nach Eintretenswahrscheinlichkeit auch Verkehrsfälle mit stockendem Verkehr und mit Stau zu berücksichtigen. Die Erfordernisse für Unterhalts- und Revisionsarbeiten sind ebenfalls einzuhalten.

### **2.3 Lüftung im Ereignisfall**

Bei einem Fahrzeugbrand im Tunnel soll die Lüftung:

- die Selbstrettung der Tunnelbenützer unterstützen, indem die Verrauchung der Fluchtwege minimiert wird,
- die Zugangswege der Rettungskräfte von Rauch freihalten,
- nach dem Brand den Tunnel entrauchen.

Bei einem Unfall ohne Fahrzeugbrand sollen zudem mit Hilfe der Lüftung soweit als möglich:

- flüchtige, toxische Substanzen von den Tunnelbenützern ferngehalten werden.

### **2.4 Minderung der Umweltbelastung**

Es sind die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Schutz des Umfeldes der Portale vor übermässigen Schadstoffimmissionen durch Tunnelabluft
- Schutz des Umfeldes der Portale und Kamine vor übermässiger Lärmbelastung durch die Lüftungsanlagen
- Rationelle Energienutzung

### 3 BESCHREIBUNG DER LÜFTUNGSSYSTEME

#### 3.1 Hauptgruppen der Lüftungssysteme

Die Lüftungssysteme werden in die folgenden drei Hauptgruppen eingeteilt:

- 1) System der natürlichen Lüftung
- 2) Mechanische Lüftungssysteme ohne Absaugung im Ereignisfall
- 3) Mechanische Lüftungssysteme mit Absaugung im Ereignisfall

#### 3.2 System der natürlichen Lüftung

Das System der natürlichen Lüftung enthält keine mechanischen Lüftungskomponenten.

##### Normalbetrieb

Bei der natürlichen Lüftung stellt sich eine Längsströmung in der Tunnelröhre ein, durch:

- die Druckwirkung des Verkehrs,
- die Druckwirkung von Temperaturdifferenzen,
- die meteorologischen Druckdifferenzen zwischen den Portalen (Wind und barometrischer Druck).

Der Luftaustausch erfolgt ausschliesslich über die Tunnelportale.

##### Betrieb im Ereignisfall

Bei einem Ereignis im Tunnel entweichen die freigesetzten Gase über ein Portal oder beide Portale. Bei einem Tunnel mit Längsneigung strömt der Rauch in der Regel durch das höher gelegene Portal aus.

#### 3.3 Mechanische Lüftungssysteme ohne Absaugung im Ereignisfall

##### 3.3.1 Allgemeines

Die Hauptgruppe der Lüftungssysteme ohne Absaugung im Ereignisfall umfasst die mechanischen Lüftungen von Tunnel oder Tunnelabschnitten, die ausschliesslich durch den Fahrraum längsbelüftet werden.

##### 3.3.2 System der Längslüftung mit Strahlventilatoren

Mit Hilfe von Strahlventilatoren wird die Luft in Längsrichtung durch den Tunnel gefördert. Die Strahlventilatoren sind in der Regel über dem Fahrraum anzuordnen.

##### Normalbetrieb

Bei Tunneln mit Richtungsverkehr ist die Strömungsrichtung meistens durch die Fahrrichtung gegeben.

Bei Tunneln mit Gegenverkehr ist anzustreben, die Strahlventilatoren jeweils unterstützend zu den natürlich wirkenden Kräften infolge des Verkehrs, von Temperaturdifferenzen und von meteorologischen Druckdifferenzen zwischen den Portalen einzusetzen.

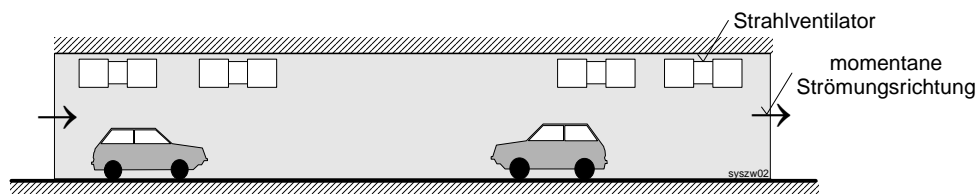


Abb. 1 : Längslüftung mit Strahlventilatoren.  
Bei Gegenverkehr oder Richtungsverkehr anwendbar.

Eine allfällige Absaugung von Tunnelluft vor dem Ausfahrtsportal dient der Minderung von zusätzlichen Schadstoffbelastungen im Umfeld des Ausfahrtsportals bei Tunneln mit Richtungsverkehr (Immissionsschutzlüftung). Die Längsströmung durch den Tunnel wird aber auch in diesem Spezialfall durch die Kolbenwirkung des Verkehrs oder im Fall von stockendem Verkehr oder Stau durch Strahlventilatoren erzeugt. (Für Tunnel mit Gegenverkehr siehe §3.4.2)

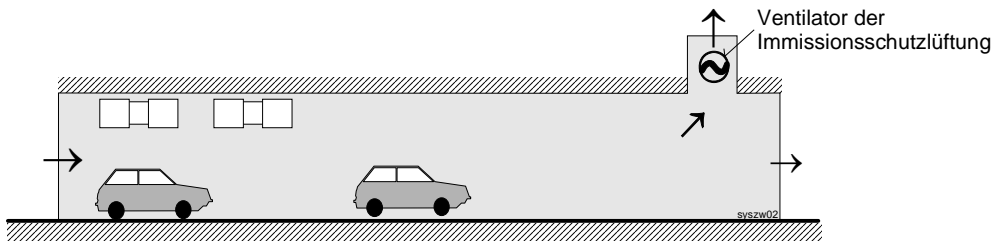


Abb. 2 : Längslüftung mit Strahlventilatoren und Immissionschutzlüftung.  
Zur Minderung der Schadstoffbelastung im Umfeld des Ausfahrtsportals bei Tunneln mit Richtungsverkehr.

### Betrieb im Ereignisfall

Bei einem Ereignis breiten sich die freigesetzten Gase in Längsrichtung durch den Tunnel aus. Richtung und Geschwindigkeit dieser Gase im Fahrraum werden mit Hilfe der Strahlventilatoren beeinflusst.

## 3.4 Mechanische Lüftungssysteme mit Absaugung im Ereignisfall

### 3.4.1 Allgemeines

In der Regel erfolgt die konzentrierte Absaugung im Ereignisfall mit zentralen Ventilatoren durch einen Abluftkanal. Der Kanal wird meist über einer Zwischendecke geführt, in welcher steuerbare Abluftklappen angeordnet sind.

Bei diesen Systemen sind Strahlventilatoren zur Steuerung der Strömung der Luft im Fahrraum erforderlich.

### 3.4.2 Lüftungssystem mit Absaugung ohne Zuluft

#### Normalbetrieb

Ohne Betrieb der Absaugung entspricht das Lüftungssystem einer Längslüftung wie in §3.3.2.

Falls bei Gegenverkehr die Längslüftung von Portal zu Portal nicht ausreicht, um die Konzentrationen im zulässigen Bereich zu halten, kann mit einer gezielten Öffnung von steuerbaren Abluftklappen der Tunnel in zwei Abschnitte mit Längslüftung unterteilt werden.

Bei Tunneln mit Richtungsverkehr kann die punktuelle Absaugung vor dem Ausfahrtsportal der Minderung von zusätzlichen Schadstoffbelastungen im Umfeld des Ausfahrtsportals dienen (vgl. Abb. 2).

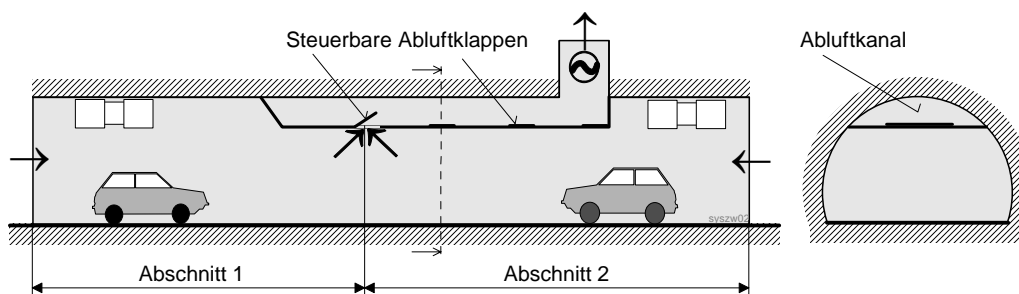


Abb. 3 : Lüftungssystem mit Absaugung ohne Zuluft.

### Betrieb im Ereignisfall

Im Ereignisfall werden die freigesetzten Gase durch steuerbare Abluftklappen am Ereignisort abgesaugt. Falls erforderlich wird die Längsströmung im Fahrraum mit einem geregelten Betrieb der Strahlventilatoren beeinflusst. Die Strahlventilatoren werden nach Möglichkeit in der Nähe der Portale angebracht.

### 3.4.3 Lüftungssystem mit Absaugung und Zuluft

Wenn Zuluft erforderlich ist, muss die Zuluft längenverteilt auf Strassenniveau eingeblasen werden. Dazu ist ein separater Zuluftkanal erforderlich. Solche Systeme weisen immer auch einen Abluftkanal mit steuerbaren Abluftklappen auf.

#### Normalbetrieb

Mit zunehmender Konzentration im Tunnel sind folgende Betriebsweisen der Lüftungsanlage möglich:

- Natürliche Längslüftung (ohne mechanische Unterstützung)
- Längslüftung mit Strahlventilatoren, die natürliche Strömung unterstützend
- Absaugung in Tunnelmitte (siehe §3.4.2) oder Halbquerlüftung
- Querlüftung

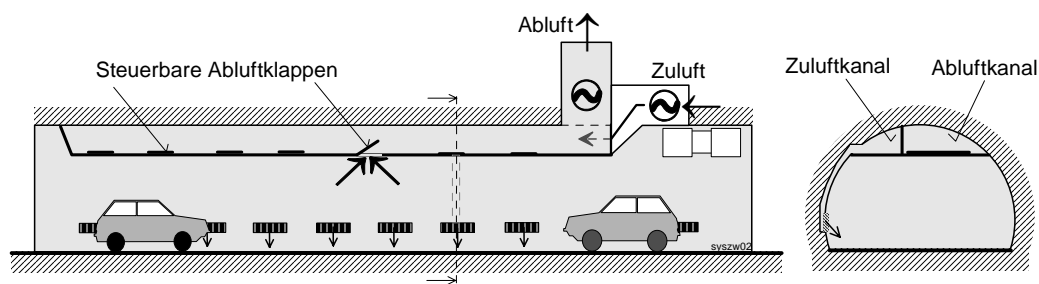


Abb. 4 : Lüftungssystem mit Absaugung und Zuluft.

Halbquerlüftung bezeichnet einen Lüftungsbetrieb, bei dem verteilt über die Länge des Tunnels Zuluft in den Fahrraum eingeblasen wird, wobei die Abluftklappen geschlossen sind. Bei Querlüftung wird zusätzlich verteilt über die Länge des Tunnels durch teilweise geöffnete Abluftklappen Abluft aus dem Fahrraum abgesaugt.

#### Betrieb im Ereignisfall

Im Ereignisfall werden die freigesetzten Gase durch steuerbare Abluftklappen abgesaugt. Der Zuluft eintrag wird im Abschnitt des Ereignisses gestoppt oder auf eine Menge reduziert, die mit der Absaugkapazität abgestimmt ist (§7.2.4). Falls erforderlich wird die Längsströmung im Fahrraum mit Strahlventilatoren beeinflusst.

Das früher verwendete System der Halbquer-/Querlüftung mit Umsteuerung der Zuluft- zu Abluftventilatoren ist nicht mehr zulässig, weil die Absaugkapazität sehr rasch verfügbar sein muss und weil längenverteilte Zuluft immer auf Strassenniveau eingeblasen werden muss.

### 3.5 Kombinierte Lüftungssysteme

Bei komplexen Tunnelsystemen können die oben aufgeführten Grundsysteme kombiniert werden. Dabei sind die Lüftungssysteme und der Lüftungsbetrieb in den einzelnen Tunnelabschnitten aufeinander abzustimmen. Insbesondere ist die Vorbelastung der Tunnelluft beim Übergang in einen anderen Abschnitt zu beachten.

## 4 ANWENDUNG DER RICHTLINIE

Bei der Planung eines Strassentunnels müssen bereits in einer frühen Phase Grundsatzentscheide gefällt werden, welche für den Bau, Unterhalt und Betrieb des Tunnels und der Tunnellüftungsanlage weit reichende Konsequenzen haben. Es ist daher wichtig, dass die Anliegen der verschiedenen Bereiche wie Bau, Sicherheit, Umwelt und Gestaltung aufeinander abgestimmt werden.

Eine Zusammenstellung der verschiedenen Projektphasen ist in der ASTRA-Richtlinie *"Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen"* [2] enthalten.

Die Planungs- und Projektierungsarbeiten im Rahmen der vorliegenden Richtlinie laufen nach den folgenden Teilschritten ab, wobei die Untersuchungstiefe phasengerecht anzupassen ist.

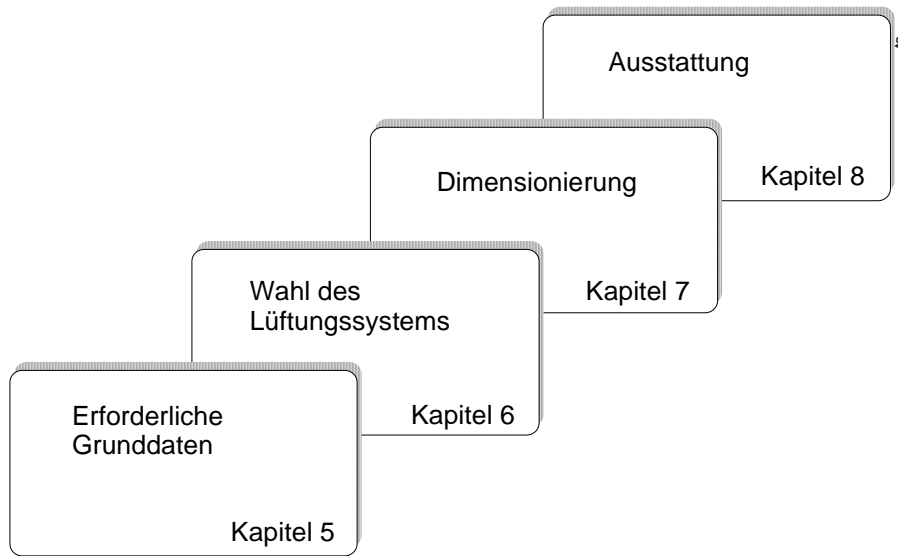


Abb. 5 : Teilschritte in der Anwendung der Richtlinie.

## 5 ERFORDERLICHE GRUNDDATEN

Die nachfolgend aufgeführten Grunddaten müssen für die Systemwahl und die Dimensionierung zur Verfügung stehen. Sie sollen in jeder Bearbeitungsphase überprüft und phasengerecht verfeinert werden.

### 5.1 Tunneldaten

- Lage der Portale
- Anzahl Röhren
- Anzahl Fahrstreifen
- Länge jeder Röhre
- Normalprofil und davon abweichende Querprofile, wo erforderlich mit Angabe der Möglichkeiten zur Anordnung von Strahlventilatoren
- Längenprofil mit Höhenlage über Meer
- Mögliche Anordnung von Lüftungszentralen und Abluftkaminen
- Lage der Notausgänge
- Perspektiven hinsichtlich Ausbautappen oder Erweiterungen

### 5.2 Verkehrsdaten

Für die Wahl des Lüftungssystems nach Kapitel 6 müssen mindestens die folgenden Verkehrsdaten bekannt sein:

- Richtungs- oder Gegenverkehr
- Durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV) im Jahr der geplanten Eröffnung und 10 Jahre danach (Summe beider Fahrrichtungen)
- Anteil der Lastwagen am DTV im Jahr der geplanten Eröffnung und 10 Jahre danach

Zudem werden für die Dimensionierung nach Kapitel 7 die nachfolgend genannten Kenngrößen benötigt. Bei unvollständiger Verkehrsprognose können in einer frühen Projektierungsphase dazu die Richtwerte im Anhang II verwendet werden.

- Massgebender stündlicher Verkehr (MSV) im Jahr der geplanten Eröffnung und 10 Jahre danach.
- Anteil der Lastwagen am MSV im Jahr der geplanten Eröffnung und 10 Jahre danach.
- Mittleres Gesamtgewicht der Lastwagen.
- Aufteilung der oben genannten Werte auf die einzelnen Fahrstreifen.
- Zulässige Höchstgeschwindigkeiten (je Fahrstreifen und je Fahrzeugkategorie).
- Zulassung von Landwirtschaftsfahrzeugen, Motorfahrrädern und Fahrrädern sowie von Fussgängern.
- Stauhäufigkeit pro Tunnelröhre in Anzahl Stautunden im Jahr der geplanten Eröffnung und 10 Jahre danach. Zu berücksichtigen sind Besonderheiten der Streckenführung in den Tunnelvorzonen (Einfahrten, Ausfahrten, Kreuzungen etc.) und die Möglichkeiten der Verkehrsbeeinflussung.
- Beurteilung der Wahrscheinlichkeit von späteren, massgebenden Veränderung der Kenngrößen.

Der Zeitpunkt 10 Jahre nach der geplanten Eröffnung bedeutet in der Planungsphase einen Prognosehorizont zwischen 15 und 25 Jahren. Die Betrachtung eines späteren Zeitpunktes ist aufgrund der Unsicherheiten solcher Prognosen nicht zweckmässig.

### 5.3 Übrige Angaben

Die Systemwahl und die Dimensionierung der Lüftungsanlage können durch weitere Faktoren und Prognosewerte beeinflusst werden. Solche sind:

- Meteorologische Daten bei besonderen Expositionen (Temperatur, Wind, Luftdruck)
- Vorgaben betreffend Umweltverträglichkeit

## 6 WAHL DES LÜFTUNGSSYSTEMS

### 6.1 Vorgehen

Die Wahl der Hauptgruppe des Lüftungssystems erfolgt pro Tunnelröhre mit den folgenden Arbeitsschritten:

- 1) Festlegung der grundlegenden Verkehrsart gemäss §6.2 und Anhang II.3: RV 1, RV 2 oder GV
- 2) Festlegung der massgebenden Tunnellänge. Diese entspricht im Allgemeinen der Distanz zwischen den Portalen. Bei verzweigten Tunnelsystemen ist die maximale Weglänge von Brandrauch für die massgebende Tunnellänge bestimmend.
- 3) Bestimmung der möglichen Hauptgruppe(n) des Lüftungssystems aufgrund der unter 1. und 2. ermittelten Verkehrsart und Tunnellänge mit Hilfe von Abb. 7.
- 4) Befindet man sich im Übergangsbereich von zwei Hauptgruppen von Lüftungssystemen, muss die Wahl mit Hilfe der Einflussgrössen gemäss §6.3.2 verfeinert werden (Zuordnung in die Bereiche A, B oder C).
- 5) Befindet man sich weiterhin im Übergangsbereich von zwei Hauptgruppen von Lüftungssystemen, muss die Wahl mit Hilfe einer umfassenden Beurteilung getroffen werden. Der Entscheid ist nachvollziehbar zu begründen.

Wenn sich in einem zweiröhren Tunnel unterschiedliche Hauptgruppen des Lüftungssystems für die beiden Röhren ergeben, ist zu prüfen, ob dies baulich sinnvoll ist.

Falls gemäss Abbildung 7 keine mechanische Lüftung erforderlich ist, muss dies mit einer Berechnung des Frischluftbedarfs bestätigt werden.

Die Abklärung der Notwendigkeit der Minderung von zusätzlichen Schadstoffbelastungen im Umfeld der Portale erfordert eine separate Betrachtung gemäss §6.3.3. Daraus ergibt sich, ob aus Umweltschutzgründen eine Absaugung von Tunnelluft erforderlich ist oder nicht.

### 6.2 Grundlegende Verkehrsarten

Aus sicherheitstechnischen Überlegungen sind entsprechend [3, Seite 159] drei grundlegende Verkehrsarten zu unterscheiden:

- RV 1: Richtungsverkehr mit geringer Stauhäufigkeit  
 RV 2: Richtungsverkehr mit grosser Stauhäufigkeit  
 GV: Gegenverkehr

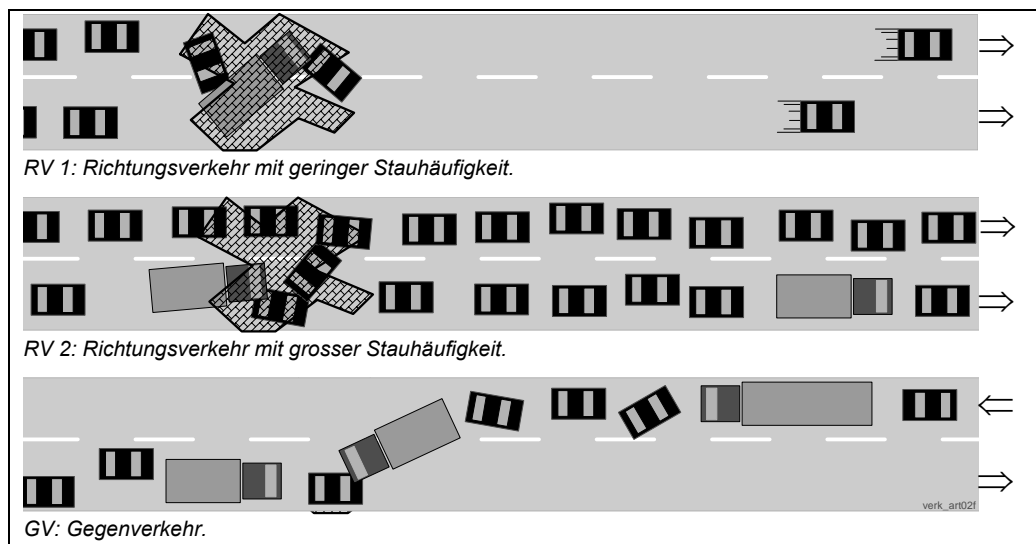


Abb. 6 : Zuordnung zur grundlegenden Verkehrsart anhand der Stausituation im Ereignisfall.

Bei Tunneln mit Richtungsverkehr ist zwischen einem Ereignis bei fliessendem Normalverkehr und einem Ereignis in einem Stau oder am Stauende zu unterscheiden. Im ersten Fall, bei einem Ereignis bei Richtungsverkehr ohne Stau, werden sich freigesetzte Gase zumindest anfänglich in der Fahrrichtung ausbreiten (Abb. 6 RV 1). Die Fahrzeuge, die den Ereignisort schon passiert haben, verlassen den Tunnel. Unmittelbar sind somit keine Tunnelbenützer gefährdet.

Im zweiten Fall, bei einem Ereignis mit Stau, befinden sich beidseits des Ereignisortes Tunnelbenützer und freigesetzte Gase werden sich möglicherweise sofort auf beide Seiten des Ereignisses ausbreiten (Abb. 6 RV 2).

Das gleiche gilt für Tunnel mit Gegenverkehr, bei denen sich die Fahrzeuge immer beidseits des Ereignisses stauen (Abb. 6 GV).

Besteht in einem Tunnel mit Richtungsverkehr eine grosse Stauhäufigkeit, muss die Tunnellüftung auf ein Ereignis in einem Stau oder am Stauende ausgelegt werden. Bei geringer Stauhäufigkeit muss dieser Fall bei der Auslegung der Tunnellüftung nicht berücksichtigt werden.

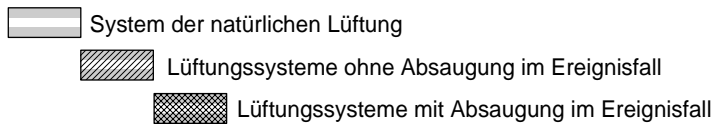
Ausnahme: Gegenverkehr in einem Tunnel mit Richtungsverkehr erfordert keine Auslegung als Tunnel mit Gegenverkehr (§7.2.3)

### 6.3 Bestimmung der Hauptgruppe des Lüftungssystems

Die Angaben in §6.3 sind für Tunnel mit Längsneigungen bis 5 % gültig. Bei grösseren Längsneigungen sind besondere Betrachtungen hinsichtlich zeitlicher Abläufe bei einem Ereignis erforderlich. Die drei Hauptgruppen der Lüftungssysteme sind in Kapitel 3 umschrieben.

#### 6.3.1 Einsatzbereiche der Hauptgruppen der Lüftungssysteme

Die Einsatzbereiche sind in Abhängigkeit der Verkehrsart und der Tunnellänge definiert:



Bei Bedarf erfolgt die Zuordnung in die Bereiche A, B oder C mit den weiteren Einflussgrössen nach §6.3.2.

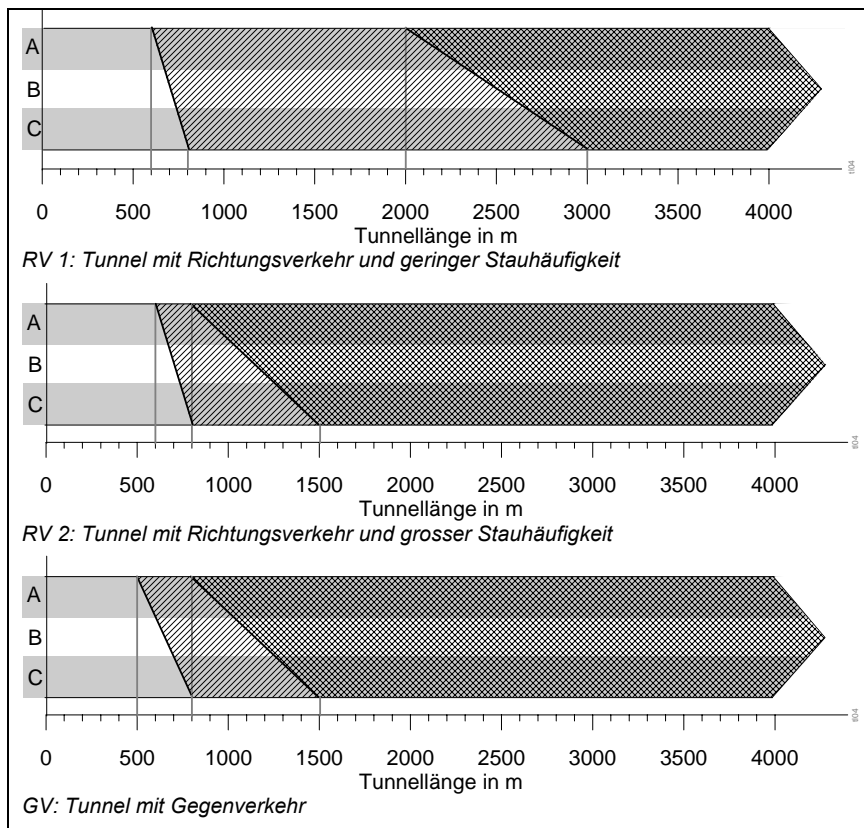


Abb. 7 : Bestimmung der möglichen Hauptgruppe des Lüftungssystems nach sicherheitstechnischen Aspekten. Die Angaben sind gültig für Tunnel mit Längsneigungen bis 5 %.

#### 6.3.2 Weitere Einflussgrössen

Falls aufgrund der Verkehrsart und der Tunnellänge die Hauptgruppe des Lüftungssystems nicht eindeutig zugeordnet werden kann, sind die nachfolgend genannten weiteren Einflussgrössen in die Beurteilung einzubeziehen.

### 6.3.2.1 Gesamtverkehr

Es sind die Verkehrszustände im Jahr der geplanten Eröffnung sowie 10 Jahre danach in die Betrachtungen einzubeziehen. Bewertet wird jeweils der DTV dividiert durch die Anzahl Fahrstreifen. Eine verminderte Leistungsfähigkeit von Einfahrts- und Ausfahrtsstreifen ist zu berücksichtigen.

| Teilbewertung<br>Gesamtverkehr | DTV dividiert durch Anzahl Fahrstreifen |                  |
|--------------------------------|---|------------------|
|                                | Richtungsverkehr                        | Gegenverkehr     |
| O (Oben)                       | > 16'000                                | > 12'000         |
| M (Mitte)                      | 11'000 bis 16'000                       | 8'000 bis 12'000 |
| U (Unten)                      | < 11'000                                | < 8'000          |

Abb. 8 : Bewertung der Einflussgrösse Gesamtverkehr.

### 6.3.2.2 Lastwagenverkehr

Massgebend sind der durchschnittliche tägliche Lastwagenverkehr im Jahr der geplanten Eröffnung und 10 Jahre danach als Anzahl LW pro 24 h und dividiert durch die Anzahl Fahrstreifen.

| Teilbewertung<br>Lastwagenverkehr | Anzahl LW pro 24 h dividiert durch Anzahl Fahrstreifen |               |
|-----------------------------------|--|---------------|
|                                   | Richtungsverkehr                                       | Gegenverkehr  |
| O                                 | > 1'600  | > 1'200       |
| M                                 | 800 bis 1'600  | 500 bis 1'200 |
| U                                 | < 800  | < 500         |

Abb. 9 : Bewertung der Einflussgrösse Lastwagenverkehr.

### 6.3.2.3 Längsneigung im Tunnel

Die Längsneigung beeinflusst die Emissionen der Fahrzeuge und infolge der verminderten Fahrgeschwindigkeit der Lastwagen die Selbstlüftung. Durch den Kamineffekt zwischen den Portalen unterschiedlicher Höhenlage können insbesondere im Fall eines Fahrzeugbrandes hohe Längsströmungen entstehen.

Massgebend ist der ungünstigste Wert für die mittlere Längsneigung über jeweils 800 m Länge (gilt mit und ohne Absaugung). Bei zweiröhren Tunneln ist die Betrachtung für jede Röhre separat vorzunehmen.

| Teilbewertung<br>Längsneigung | Grösster Wert der über beliebige 800 m gemittelten Längsneigung in % |                                   |                    |
|-------------------------------|--|-----------------------------------|--------------------|
|                               | Richtungsverkehr<br>RV 1   | Richtungsverkehr<br>RV 2          | Gegenverkehr<br>GV |
| O                             | < - 3  | < - 3 et > + 3                    | > 3                |
| M                             | - 3 bis + 3  | - 3 bis - 1.5 et<br>+ 1.5 bis + 3 | 1.5 bis 3          |
| U                             | > + 3  | - 1.5 bis + 1.5                   | 0 bis 1.5          |

Abb. 10 : Bewertung der Einflussgrösse Längsneigung; negative Werte: Talfahrt, positive Werte: Bergfahrt.

Längsneigungen von < - 5 % bei Tunneln mit Richtungsverkehr und geringer Stauhäufigkeit und von < - 5 % oder > + 5 % bei Tunneln mit Richtungsverkehr und grosser Stauhäufigkeit erfordern im Hinblick auf die Beherrschung eines Brandfalles vertiefte Abklärungen unter Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe entsprechend §7.2. Dies gilt auch für Tunnel mit Gegenverkehr mit mehr als 5 % Längsneigung.

### 6.3.2.4 Gesamtbewertung

Aus den drei Teilbewertungen gemäss den Abbildungen 8 bis 10 ergibt sich die Gesamtbewertung der Einflussgrössen nach Abbildung 11, welche bei einer verfeinerten Betrachtung in Abbildung 7 zu verwenden ist.

| Gesamtbewertung | Teilbewertungen (unabhängig von der Reihenfolge) |
|-----------------|--|
| A               | O-O-O, O-O-M, O-O-U, O-M-M                       |
| B               | O-M-U, O-U-U, M-M-M, M-M-U                       |
| C               | M-U-U, U-U-U                                     |

Abb. 11 : Gesamtbewertung aus den drei Teilbewertungen der Einflussgrössen.

### 6.3.3 Minderung von Zusatzbelastungen in Portalzonen

Zusätzlich zu den oben genannten Grössen, die entweder die Luftqualität im Tunnel oder die Sicherheit beeinflussen, können die Kriterien zur Einhaltung der Luftqualität in den Portalzonen bestimmte Systeme begünstigen oder zusätzliche Absauganlagen erfordern (§7.3.1).

## 6.4 Bestimmung des Lüftungssystems

### 6.4.1 Allgemeines

Aus den Untersuchungen in §6.3 resultiert die geeignete Hauptgruppe des Lüftungssystems. Die entsprechenden Lüftungssysteme sind in Abbildung 12 ersichtlich.

|                                | Hauptgruppen der Lüftungssysteme |   |  |
|--------------------------------|----------------------------------|---|--|
|                                | Natürliche Lüftung (§3.2)        | Lüftung ohne Absaugung (§3.3)                                       | Lüftung mit Absaugung (§3.4)   |
| <b>Übliche Lüftungssysteme</b> | Natürliche Lüftung               | Längslüftung mit Strahlventilatoren ohne Absaugung (Abb.en 1 und 2) | Lüftung mit Absaugung und Strahlventilatoren ohne Zuluft (Abb. 3)<br><hr style="border-top: 1px dashed black;"/> Lüftung mit Absaugung, Strahlventilatoren und Zuluft (Abb. 4) |

Abb. 12 : Übliche Lüftungssysteme.

### 6.4.2 Hauptgruppe Lüftung ohne Absaugung

Mit den heute gültigen Emissionswerten kann eine Lüftung ohne Absaugung von Brandrauch oder anderen bei einem Ereignis freigesetzten Gasen in der Regel als Längslüftung mit Strahlventilatoren ausgeführt werden. Eine Längslüftung mit zusätzlicher Immissionsschutzlüftung (Abb. 2) kann zweckmässig sein, wenn ein freies Abströmen von Tunnelluft über ein Portal aus Gründen der Umweltbelastung nicht zulässig ist (§7.3.1).

### 6.4.3 Hauptgruppe Lüftung mit Absaugung

Falls eine Lüftung mit Absaugung erforderlich ist, ist das geeignete Lüftungssystem zu bestimmen. Dazu ist eine Dimensionierung und Bewertung der in Frage kommenden Lüftungssysteme entsprechend den Angaben in Kapitel 7 vorzunehmen.

## 7 DIMENSIONIERUNG

Die Dimensionierung der Lüftungsanlage erfolgt für den Normalbetrieb und den Betrieb im Ereignisfall. Die sich daraus ergebende strengere Anforderung ist massgebend.

Die Angaben im Kapitel 7 beschränken sich auf Lüftungstechnische Besonderheiten und empirische Werte zur Vereinheitlichung der Berechnungen. Die grundlegenden physikalischen Gleichungen sind der Fachliteratur zu entnehmen.

### 7.1 Dimensionierung für den Normalbetrieb

Der Begriff Normalbetrieb umfasst alle in der Planung berücksichtigten Verkehrsfälle, gegebenenfalls mit ausnahmsweisem Gegenverkehr in einem Tunnel mit Richtungsverkehr sowie mit stockendem Verkehr und Stau.

In den §7.1.1 bis 7.1.6 werden Angaben betreffend Verkehr, Fahrzeugemissionen, Frischluftbedarfsberechnung und Strömungsberechnung gemacht. Im Weiteren werden Hinweise zu mechanischen Lüftungssystemen gegeben (§7.1.7 und 7.1.8).

#### 7.1.1 Verkehrsdaten

##### 7.1.1.1 Massgebender Verkehr

Zur Dimensionierung der Lüftung ist der höchste Wert des massgebenden stündlichen Verkehrs (MSV) bis 10 Jahre nach der Eröffnung des Tunnels zu verwenden (§5.2). Bei Tunneln mit Richtungsverkehr ist jede Röhre einzeln zu betrachten.

##### 7.1.1.2 Verkehrszustand

Zur Dimensionierung der Lüftungsanlage bei Normalbetrieb ist in der Regel von fliessendem Verkehr mit Fahrgeschwindigkeiten von 40 km/h und mehr auszugehen. Stockender Verkehr oder Stau ist nur einzubeziehen, falls regelmässig, d.h. während mehr als 50 Stunden pro Jahr, mit diesen Zuständen gerechnet werden muss. Liegt keine Stauprognose vor, können zur Beurteilung der Stauhäufigkeit die Angaben im Anhang II.3 verwendet werden. Liegt danach der MSV im Bereich grosser Stauhäufigkeit und können die Stausituationen im Tunnel nicht vermieden werden, ist die Lüftungsanlage auf stockenden Verkehr und Stau auszulegen. Besonderheiten der Strassenanlage mit Wirkung auf den Verkehrsfluss, wie Verflechtungen der Fahrstreifen im oder kurz ausserhalb des Tunnels, sind zu berücksichtigen.

##### 7.1.1.3 Ausnahmsweiser Gegenverkehr

Bei der Wahl des Lüftungssystems ist ausnahmsweiser Gegenverkehr in einer Röhre eines Tunnels mit Richtungsverkehr nicht zu berücksichtigen. Bei der Dimensionierung des gewählten Lüftungssystems für den Normalbetrieb muss jedoch ausnahmsweiser Gegenverkehr berücksichtigt werden, wobei Massnahmen, wie Verkehrsumlenkungen und kurzzeitige Betriebseinschränkungen, einzubeziehen sind.

##### 7.1.1.4 Verkehrsdichte

Hinsichtlich des Längenbedarfs von Lastwagen gelten für fahrenden Verkehr in Anlehnung an [4, Seite 7] die folgenden Beziehungen, wobei sich die Werte der Längsneigung auf Mittelwerte über 800 m Länge beziehen (gilt bei Steigung und Gefälle):

- In Abschnitten mit Längsneigungen bis 2.5 %  $2\text{ PWE} \approx 2\text{ PW} \approx 1\text{ LW}$
- In Abschnitten mit Längsneigungen zwischen 2.5 und 4 %  $3\text{ PWE} \approx 3\text{ PW} \approx 1\text{ LW}$
- In Abschnitten mit Längsneigung über 4 %  $4\text{ PWE} \approx 4\text{ PW} \approx 1\text{ LW}$

Bei Stillstand der Fahrzeuge ist pro Fahrstreifen mit einer Verkehrsdichte von 150 PWE/km und  $2\text{ PWE} \approx 2\text{ PW} \approx 1\text{ LW}$  zu rechnen.

**7.1.1.5 Fahrgeschwindigkeit**

Bei unbehindert fliessendem Verkehr sind die folgenden Fahrgeschwindigkeiten zu verwenden:

$$v_{PW} = v_{sig} \quad \text{[km/h]} \quad \text{Gl. 7-1}$$

$$v_{LW} = \text{MIN}(v_{LW,max}, v_{PW}) \quad \text{[km/h]} \quad \text{Gl. 7-2}$$

wobei  $v_{PW}$  und  $v_{LW}$  die Fahrgeschwindigkeiten der Personenwagen bzw. der Lastwagen und  $v_{sig}$  die zulässige Höchstgeschwindigkeit bezeichnen.

$v_{LW,max}$  ist Abbildung 13 zu entnehmen.

|                      | Talfahrt |     |     | Ebene | Bergfahrt |    |    |
|----------------------|----------|-----|-----|-------|-----------|----|----|
| LN in %              | - 6      | - 4 | - 2 | 0     | 2         | 4  | 6  |
| $v_{LW,max}$ in km/h | 60       | 80  | 100 | 100   | 90        | 70 | 60 |

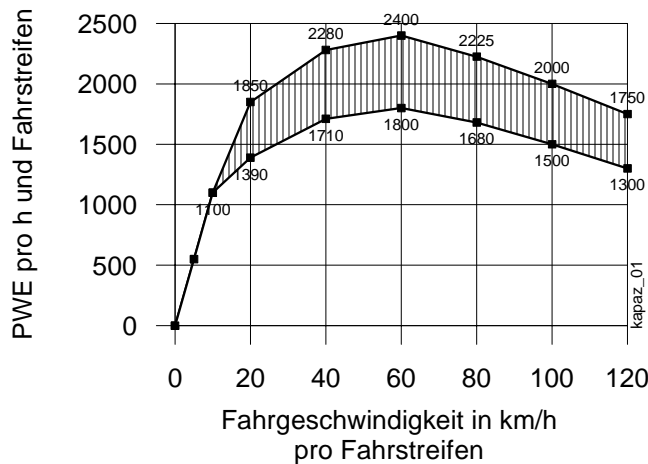
**Abb. 13 :** Maximale Fahrgeschwindigkeit der Lastwagen  $v_{LW,max}$  auf Strecken verschiedener Längsneigung (LN) für die Lüftungsberechnungen.

Die Werte in Abbildung 13 bei grossen Längsneigungen (LN) stammen aus Messungen auf einer Transitstrecke. Bei einem grossen Anteil von regionalem Schwerverkehr sind die maximalen Fahrgeschwindigkeiten der Lastwagen in grossen Längsneigungen kleiner.

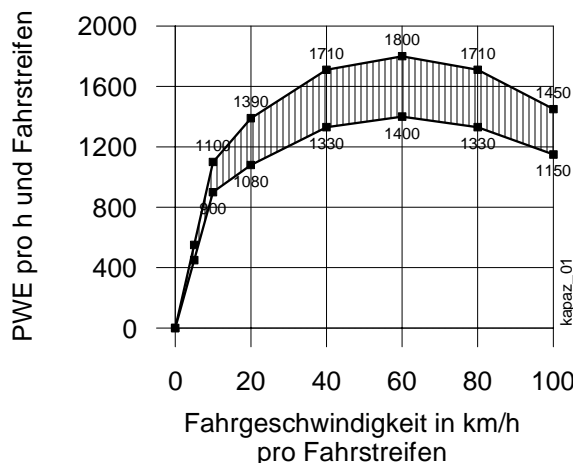
Ist kein Fahrstreifen vorhanden, der das Überholen von Lastwagen zulässt, ist bei der Dimensionierung die Geschwindigkeit der Personenwagen,  $v_{PW}$ , gegebenenfalls auf die Maximalgeschwindigkeit der Lastwagen,  $v_{LW,max}$ , zu begrenzen.

**7.1.1.6 Verkehrskapazität in Tunneln**

In Anlehnung an die Angaben in [4, Seite 7] und aus Analysen von Zählstellen liegt die Verkehrskapazität in Tunneln bei den Werten gemäss den Abbildungen 14 und 15. Dabei entspricht die obere Grenzkurve jeweils einem Tunnel mit weitgehend gerader Streckenführung und einem grossen Anteil an Fern- und Pendlerverkehr. Die untere Grenzkurve entspricht jeweils einem Tunnel bei vorwiegendem Freizeit- und Touristikverkehr.



**Abb. 14 :** Kapazität in Tunneln mit richtungstrennten Röhren.



**Abb. 15 :** Kapazität in Tunneln mit Gegenverkehr.

### 7.1.2 Dimensionierungswerte für die Luftqualität

Für die Dimensionierung der Lüftung sind auf der Grundlage von [5] die folgenden Werte der Luftqualität im Fahrraum zu verwenden:

| CO-Konzentration<br>$c_{lim,CO}$<br>[ppm] | Sichttrübung<br>$k_{lim,T}$<br>[m <sup>-1</sup> ] |
|---|---|
| 70  | 0.005   |

Abb. 16 : Luftqualität im Fahrraum, Dimensionierungswerte.  
(Grenzwerte der Luftqualität im Fahrraum: siehe Abb. 28 Seite 30.)

Für Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub> empfiehlt [6] im Fahrraum einen Maximalwert von 2'000 µg/m<sup>3</sup> (1 ppm) bei einer Stickoxid-Oxidation von 10 % (NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>) einzuhalten. Bei den gegebenen Werten für CO und Sichttrübung wird dieser Wert in jedem Fall eingehalten, so dass auf eine eigene Dimensionierung für NO<sub>2</sub> verzichtet werden kann.

### 7.1.3 Emissionsberechnung

Die Berechnung der Emissionen von CO und Sichttrübe der Einzelfahrzeuge ist im Anhang III beschrieben.

Es gelten die folgenden Regeln:

- Die Kategorie der Personenwagen PW umfasst alle Fahrzeuge ausser den Lastwagen LW.
- Die Kategorie der Personenwagen wird in PW mit Benzinmotoren und in PW mit Dieselmotor aufgeteilt.
- Die Kategorie der Lastwagen LW umfasst hier Busse, Lastwagen, Lastenzüge sowie Sattelschlepper.
- Das mittlere Gesamtgewicht der Lastwagen ist tunnelspezifisch nach den vier unten angeführten Verkehrsanteilen abzuschätzen. Als Richtwerte für das Gesamtgewicht eines LW gelten nach [5]:

|                             |                                   |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Im innerstädtischen Verkehr | 12 t                              |
| Im regionalen Verkehr       | 18 t                              |
| Im nationalen Verkehr       | 22 t                              |
| Im Transitverkehr           | 70 % der örtlichen Gewichtslimite |

### 7.1.4 Frischluftbedarf

Die Berechnung der notwendigen Frischluftmenge  $Q_{FL}$  ist für alle in Betracht fallenden Verkehrsfälle für Sichttrübung und für CO durchzuführen.

Für Tunnel mit Gegenverkehr sind den Berechnungen die folgenden Richtungsaufteilungen des Verkehrs zu Grunde zu legen:

|            |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|
| Richtung 1 | 20 % | 40 % | 60 % | 80 % |
| Richtung 2 | 80 % | 60 % | 40 % | 20 % |

Abb. 17 : Richtungsaufteilung des Verkehrs zur Berechnung des Frischluftbedarfs bei Gegenverkehr.

Die Berechnung des Frischluftbedarfs erfolgt im Anschluss an die Ermittlung der Emissionen der Einzelfahrzeuge gemäss Anhang III.

#### 7.1.4.1 Frischluftbedarf zur Begrenzung der CO-Konzentration

Die gesamte CO-Emission über die Tunnel- bzw. Abschnittslänge  $L_{Tunnel}$  ist:

$$E_{CO} = (n_{PW} \cdot e_{PW,CO} + n_{LW} \cdot e_{LW,CO}) / 3'600 \quad [m^3/s] \quad Gl. 7-3$$

Dabei bezeichnet  $n_{PW}$  die Anzahl der PW und  $n_{LW}$  die Anzahl der LW im Tunnel bzw. im betrachteten Abschnitt bei fließendem Verkehr auf der Grundlage des massgebenden stündlichen Verkehrs MSV und bei instabilem Verkehrsfluss auf der Grundlage der Kapazität gemäss §7.1.1. Bei unterschiedlichen Emissionswerten über die Tunnellänge oder die Fahrstreifen setzt sich die Gesamtemission aus den Teilbeiträgen zusammen.

Die notwendige Frischluftmenge zur ausreichenden Verdünnung der CO-Emission ist:

$$Q_{FL,CO} = \frac{E_{CO}}{c_{lim,CO}} \cdot 10^6 \quad [m^3/s] \quad Gl. 7-4$$

mit  $c_{lim,CO}$  in ppm aus Abbildung 16.

**7.1.4.2 Frischluftbedarf zur Begrenzung der Sichttrübung**

Die gesamte Sichttrübe-Emission über die Tunnel- bzw. Abschnittslänge  $L_{Tunnel}$  ist:

$$E_T = (n_{PW} \cdot e_{PW,T} + n_{LW} \cdot e_{LW,T}) / 3'600 \quad [m^2/s] \quad Gl. 7-5$$

Dabei bezeichnet  $n_{PW}$  die Anzahl der PW und  $n_{LW}$  die Anzahl der LW im Tunnel bzw. im betrachteten Abschnitt bei fließendem Verkehr auf der Grundlage des massgebenden stündlichen Verkehrs MSV und bei instabilem Verkehrsfluss auf der Grundlage der Kapazität gemäss §7.1.1. Bei unterschiedlichen Emissionswerten über die Tunnellänge oder die Fahrstreifen ist die Gesamtemission die Summe der Teilbeiträge.

Die Frischluftmenge zur ausreichenden Verdünnung der Sichttrübe-Emission ist:

$$Q_{FL,T} = \frac{E_T}{k_{lim,T}} \quad [m^3/s] \quad Gl. 7-6$$

mit  $k_{lim,T}$  in  $m^{-1}$  aus Abbildung 16.

**7.1.4.3 Minimaler Frischluftbedarf**

Zur Berücksichtigung instationärer Effekte wird für die Dimensionierung die minimale Frischluftmenge  $Q_{FL,min}$  in Abhängigkeit des Fahrraumquerschnitts  $A_{Tunnel}$  gefordert.

$$Q_{FL,min} = A_{Tunnel} \cdot 1.5 \text{ m/s} \quad [m^3/s] \quad Gl. 7-7$$

Zudem soll eine Längslüftung so ausgelegt werden, dass eine Luftwechselzeit von 20 Minuten erreicht werden kann.

**7.1.4.4 Massgebender Frischluftbedarf**

Die notwendige Frischluftmenge ist für jeden Verkehrsfall einzeln zu bestimmen und beträgt:

$$Q_{FL} = \text{MAX}(Q_{FL,CO}, Q_{FL,T}, Q_{FL,min}) \quad [m^3/s] \quad Gl. 7-8$$

**7.1.5 Meteorologisch-thermische Einflüsse (siehe auch §VII.2.5)**

Die meteorologisch-thermische Druckdifferenz  $\Delta p_{mt}$  umfasst die folgenden Anteile:

**Barometrische Druckdifferenz**

Bei Tunneln, die Bergketten durchstossen, können die barometrischen Druckdifferenzen zwischen den Portalen mehrere Hundert Pa betragen und während längerer Zeit (Stunden, Tage) konstant bleiben. Für die Auslegung ist der 95 %-Wert der jeweils ungünstigeren Richtung zu verwenden.

**Temperaturbedingte Druckdifferenz**

Die Temperatur im Fahrraum ist in der Regel weitgehend konstant und liegt meist einige Kelvin über der mittleren Jahrestemperatur. Der natürliche Auftriebsdruck ändert mit dem Gang der Aussentemperatur während des Tages und über das Jahr. Anhand der Statistik der örtlichen Umgebungstemperatur kann der natürliche Auftriebsdruck abgeschätzt werden (Gleichung 7-19). Für die Auslegung ist der 95 %-Wert der jeweils ungünstigeren Richtung zu verwenden.

**Druckwirkung durch Wind**

Der Winddruck auf die Portale beträgt in der Regel einige Pa und ist meist sehr rasch schwankend. Für die Auslegung ist der Staudruck gebildet mit dem Mittelwert der Windgeschwindigkeit der jeweils ungünstigeren Richtung auf das Portal zu verwenden.

Für die Auslegung ist die ungünstigste Kombination dieser drei Anteile zu verwenden.

**7.1.6 Angaben für die Strömungsberechnungen****Luftdichte**

Für Druckverlustberechnungen ist die mittlere Dichte der Luft in Abhängigkeit der Höhe  $H$  in m über Meer:

$$\rho_L = 1.22 - 1.08 \cdot 10^{-4} \cdot H \quad [kg/m^3] \quad Gl. 7-9$$

Für die Stromversorgung muss der Leistungsbedarf der Ventilatoren bei örtlich angemessenen, tiefen Temperaturen und entsprechend hohen Luftdichten berücksichtigt werden.

**Fahrzeugdaten**

Als Widerstandsfläche eines mittleren PW und eines mittleren LW bei frontaler Anströmung im Tunnel gilt:

$$(c_W \cdot A_{Front})_{PW} = 0.9 \quad [m^2] \quad Gl. 7-10$$

$$(c_W \cdot A_{Front})_{LW} = 5.2 \quad [m^2] \quad Gl. 7-11$$

Die Druckwirkung des Verkehrs auf die Luft im Fahrraum resultiert aus der Summe der Differenzgeschwindigkeiten jedes einzelnen Fahrzeugs zur Luftgeschwindigkeit am Ort des Fahrzeugs.

$$\Delta p_{Fz} = \rho / 2 \cdot (v_{Fz} - v_L)^2 \cdot (c_W \cdot A_{Front})_{Fz} / A_{Tunnel} \quad [Pa] \quad Gl. 7-12$$

$$\Delta p_{Verkehr} = \sum_{Fz} \Delta p_{Fz} \quad [Pa] \quad Gl. 7-13$$

### Tunneln (Richtwerte)

Die Druckverlustkoeffizienten bei der Durchströmung der Tunnelröhre sind:

$$\text{Einströmverlustkoeffizient in die Tunnelröhre} \quad \zeta_e = 0.6 \quad [-] \quad Gl. 7-14$$

$$\text{Ausströmverlustkoeffizient aus der Tunnelröhre} \quad \zeta_a = 1.0 \quad [-] \quad Gl. 7-15$$

$$\text{Reibungskoeffizient der Tunnelröhre (betonierter Innenring mit üblichen Einbauten)} \quad \lambda = 0.015 \quad [-] \quad Gl. 7-16$$

Der Druckverlust an der Tunnelröhre beträgt:

$$\Delta p_{Reibung} = \rho / 2 \cdot v_L^2 \cdot (\zeta_e + \lambda \frac{L_{Tunnel}}{D_H} + \zeta_a) \quad [Pa] \quad Gl. 7-17$$

Gegebenenfalls sind zudem örtliche Verluste, z.B. durch Einbauten und Querschnittänderungen zu berücksichtigen.

## 7.1.7 Hinweise zu Systemen ohne Absaugung

Hinweise, die den Ereignisfall betreffen, sind in §7.2.3 enthalten.

Der von den Strahlventilatoren aufzubringende Druck  $\Delta p_{erf}$  entspricht der Summe der Druckwirkungen durch den Verkehr und der Druckverluste über die Tunnellänge bei Durchströmung mit der notwendigen Frischluftmenge  $Q_{FL}$  sowie der meteorologisch-thermischen Gegendrücke. Die dazu erforderlichen Angaben sind in den §7.1.5 und 7.1.6 enthalten.

$$\Delta p_{erf} = \Delta p_{Verkehr} + \Delta p_{Reibung} + \Delta p_{mt} \quad [Pa] \quad Gl. 7-18$$

Aufgrund der Selbstlüftung durch den Verkehr führt der Verkehrsfall mit grösstem Frischluftbedarf nicht notwendigerweise auf den grössten, mit Strahlventilatoren aufzubringenden Druck. Zur Berechnung des erforderlichen Druckes ist die Richtungsaufteilung des Verkehrs in Schritten von 20 % gemäss Abbildung 17 zu variieren. Ein andauernder ausgeglichener Verkehr in beiden Richtungen ist dabei nicht zu betrachten.

Zu berücksichtigen ist die der Längsneigung entsprechende Maximalgeschwindigkeit der Lastwagen nach Abbildung 13. Die Blasrichtung der Ventilatoren ist unterstützend zur natürlichen Lüftung vorzusehen.

Die maximale, durch die Lüftungsanlage unterstützte Luftgeschwindigkeit im Fahrraum zur Gewährleistung des Frischluftbedarfs darf in Tunneln mit Gegenverkehr 6 m/s und in Tunneln mit Richtungsverkehr 10 m/s nicht überschreiten (in Anlehnung an [4, Seite 47]).

Weitere Angaben zu Strahlventilatoren sind im Anhang IV zu finden.

## 7.1.8 Hinweise zu Systemen mit Absaugung

Hinweise, die den Ereignisfall betreffen, sind in §7.2.4 enthalten.

### 7.1.8.1 Kanalquerschnitte

Der Querschnitt der Kanäle und Schächte kann grossen Einfluss auf die zu installierende Leistung und den entsprechenden Energieverbrauch haben. Die Kanalquerschnitte sind anhand der lüftungstechnischen Dimensionierung zu überprüfen. Gegebenenfalls sind die Dimensionen der Anlage anhand der Angaben im Anhang VI zu optimieren.

Die Lüftungskanäle müssen begehrbar sein.

### 7.1.8.2 Zuluft

In einem Tunnel mit längenverteilter Zuluft muss diese etwa 50 cm über der Fahrbahn eingeblasen werden. Ein Einblasen durch Deckenöffnungen ist nicht zulässig (vergleiche §7.2.4).

In jedem Betriebszustand mit Zuluft muss im Zuluftkanal ein minimaler Überdruck gegenüber dem Fahrraum von 250 Pa gewährleistet sein. Grundlage für die Dimensionierung ist ein stationärer Zustand ohne Fahrzeugeinfluss.

### 7.1.9 Vermeidung von Strömungskurzschlüssen

Die Übertragung von Abluft am Portal von einer Röhre in die Gegenröhre ist zu minimieren. Es sind die Hinweise in §7.2.6 zu beachten.

## 7.2 Dimensionierung für den Betrieb im Ereignisfall

Die §7.2.1 und 7.2.2 enthalten die Angaben zu den Ereignissen, die der Auslegung der Lüftungsanlage zugrunde zu legen sind. Im Weiteren werden Hinweise zu mechanischen Lüftungssystemen gegeben (§7.2.3 bis 7.2.7).

### 7.2.1 Ereignisse zur Lüftungsauslegung

AIPCR [3, Seite 63] schliesst aus verschiedenen Quellen, darunter den EUREKA-Versuchen 1998 [7], dass während einem Brand etwa folgende maximale Brandleistungen mit signifikanter Dauer erwartet werden müssen:

| Brandobjekt       | Brandleistung nominal [MW] |
|-------------------|----------------------------|
| Personenwagen     | 2 bis 5                    |
| Lieferwagen       | 15                         |
| Bus               | 20                         |
| Lastwagen beladen | 20 bis 30                  |

Abb. 18 : Nominale Brandleistungen verschiedener Brandobjekte nach [3].

Bei Bränden von grossen Transportfahrzeugen wie Lastenzüge und Sattelschlepper mit brennendem Ladegut können grössere Brandleistungen entstehen als in Abbildung 18 ausgewiesen sind. Der EUREKA-Versuch mit einem Sattelschlepper, der mit zwei Tonnen Möbeln beladen war, wies eine maximale Brandlast von 100 bis 120 MW auf, allerdings nur während einer sehr kurzen Zeit [7].

Nach der Definition der Brandleistung in [7, 8] wird im Verhältnis zur gesamten Branddauer von rund einer Stunde die nominale Brandleistung nur während weniger Minuten erreicht oder überschritten.

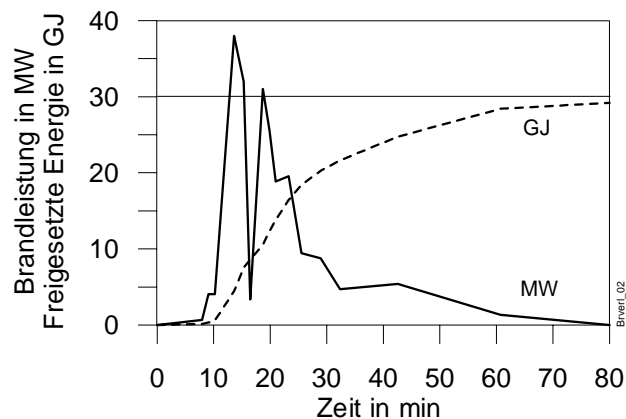


Abb. 19 : Brandleistung und freigesetzte Energie eines beladenen Lastwagens. (Nominale Brandleistung 30 MW [7, 8])

Beim Vollbrand eines beladenen Lastwagens entstehen hohe Temperaturen, wodurch sich bei günstigen aerodynamischen Bedingungen eine geschichtete Rauchausbreitung unter der Decke bis zu einigen 100 m Entfernung vom Brandort einstellen kann. Bei einem Brand mit geringer Wärmeentwicklung und generell bei ungünstigen, aerodynamischen Bedingungen muss mit der Verrau- chung des gesamten Tunnelquerschnittes gerechnet werden.

Im Weiteren sind auch Unfälle mit einer Freisetzung von gefährlichen Substanzen ohne Brand und somit mit einer Brandleistung von 0 MW zu berücksichtigen. Ereignisse ohne Brand können mit den heute üblichen Mess- und Detektionseinrichtungen nur optisch erkannt werden. Ist ein Lastwagen in

ein Ereignis verwickelt, muss grundsätzlich damit gerechnet werden, dass gefährliche, flüchtige Substanzen freigesetzt werden könnten. Es ist sinnvoll, in diesem Fall die Lüftungsanlage wie bei einem Brand zu betreiben.

Aufgrund dieser Grundlagen ist die Lüftungsanlage für Ereignisse mit den folgenden Kenngrössen auszulegen:

|                                      | Ereignis               |                      |
|--------------------------------------|------------------------|----------------------|
|                                      | Schadstoff-Freisetzung | Lastwagenbrand       |
| <b>Brandleistung nominal</b>         | 0 MW                   | 30 MW                |
| <b>Freigesetzte Energie</b>          | 0 GJ                   | 30 GJ                |
| <b>Freisetzung gefährdender Gase</b> | 20 m <sup>3</sup> /s   | 80 m <sup>3</sup> /s |
| <b>Dauer</b>                         | ≥ 20 min               | ≥ 60 min             |

Abb. 20 : Ereignisse für die Auslegung der Lüftungsanlage.

Für die Auslegung der Lüftungsanlage ist ein örtlich stationäres Ereignis zu betrachten. Als möglicher Ereignisort ist die gesamte Tunnellänge zu berücksichtigen.

### 7.2.2 Druckwirkung durch Auftrieb und Portaldruckdifferenzen (siehe auch §VII.2.5)

In Tunneln mit Längsneigung stellt sich infolge Temperaturdifferenzen eine Druckwirkung auf die Luft im Fahrraum ein. Der Auftrieb gemäss Gleichungen 7-19 und 7-20 ist bei der Dimensionierung der Lüftung zu berücksichtigen.

$$\Delta p_{nat} = (\rho_e - \rho_i) \cdot g \cdot L_{Tunnel} \cdot LN \quad [\text{Pa}] \quad \text{Gl. 7-19}$$

$$\Delta p_{Brand} = (\rho_i - \rho_{Brand}) \cdot g \cdot L_{Brand} \cdot LN_{Brand} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Gl. 7-20}$$

$$\text{mit } \rho_n = \frac{p_{atm}}{R_L \cdot T_n} \quad \text{mit } n = \{i, a \text{ oder Brand}\} \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{Gl. 7-21}$$

$LN_{Brand}$  bezeichnet die Längsneigung im Abschnitt mit der Länge  $L_{Brand}$ .

Die Ereignisse zur Auslegung der Lüftungsanlage werden durch folgende Werte (nach [8]) charakterisiert:

|                    | Schadstoff-Freisetzung | Ereignis                 |                   |
|--------------------|------------------------|--------------------------|-------------------|
|                    |                        | Ohne (vor) Absaugbetrieb | Mit Absaugbetrieb |
| $\Delta T_{Brand}$ | 0 K                    | 65 K                     | 135 K             |
| $L_{Brand}$        | -                      | 800 m                    | 300 m             |

Abb. 21 : Normwerte zur Bestimmung des Auftriebs (siehe auch Abb. 22).

Die in [8] dokumentierten Temperaturmesswerte ergeben bei einer Anströmung mit der kritischen Geschwindigkeit und für einen Tunnel konstanter Längsneigung eine Auftriebsverteilung gemäss Abbildung 22. Für andere Situationen (ändernde Längsneigung, Ausströmen aus einem Portal, symmetrische Ausbreitung) kann die Kurve angepasst werden.

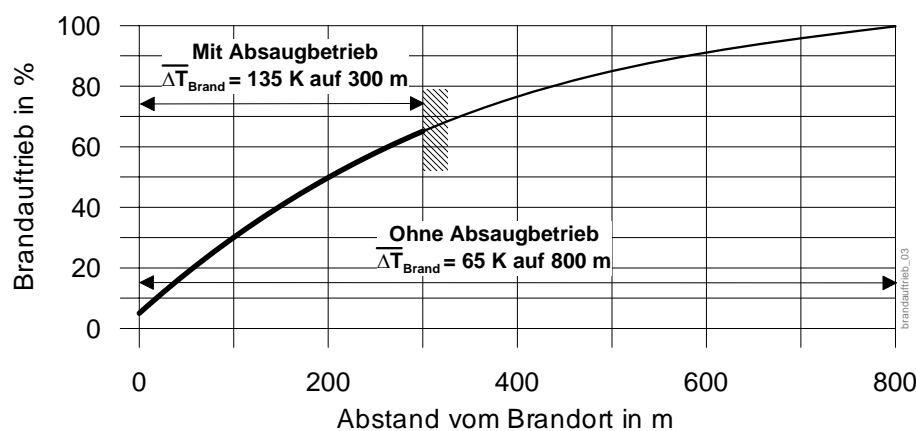


Abb. 22 : Örtliche Verteilung des Brandauftriebs bei Anströmung mit der kritischen Geschwindigkeit und bei konstanter Längsneigung.

Für die Berechnung der instationären Abläufe kann angenommen werden, dass sich der Auftriebsdruck durch die Brandwärme linear über 10 Minuten bis zum Endwert aufbaut.

Als meteorologische Druckdifferenz zwischen den Portalen infolge barometrischer Druckunterschiede und Wind sowie für die natürliche Temperaturdifferenz zwischen Fahrraum und Umgebung sind die Werte gemäss §7.1.5 einzusetzen.

### 7.2.3 Hinweise zu Systemen ohne Absaugung

#### 7.2.3.1 Allgemeines

In Tunneln mit Systemen ohne Absaugung kann die Ausbreitung der Gase im Fahrraum mit Strahlventilatoren beeinflusst werden. Richtwerte zum erforderlichen Druck und zur Bestimmung der Anzahl Strahlventilatoren sind im Anhang IV angegeben.

#### 7.2.3.2 Anforderungen zur Auslegung der Strahlventilatoren

Für die Auslegung der Strahlventilatoren ist der ungünstigste Ereignisort im Tunnel zu berücksichtigen. Die nachfolgend definierten Fälle bilden die Grundlage für die Auslegung der Strahlventilatoren für den Ereignisfall.

| Verkehrsart (§6.1) | Fahrrichtung am Ereignisort | Freigesetzte Energie         | Geforderte Längsströmung                                   |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------|--|
| RV 1               | Talfahrt                    | LW-Brand                     | 3 m/s nach unten   |
|                    | Bergfahrt                   | LW-Brand<br>null             | 3 m/s nach oben<br>1.5 m/s nach oben                       |
| RV 2               | Talfahrt                    | LW-Brand                     | 3 m/s nach unten   |
|                    | Bergfahrt                   | LW-Brand<br>LW-Brand<br>null | 1.5 m/s nach unten<br>3 m/s nach oben<br>1.5 m/s nach oben |
| GV                 | Tal- und Bergfahrt          | LW-Brand                     | 1.5 m/s nach unten   |

Abb. 23 : Anforderungen an die Längsströmung zur Auslegung von Strahlventilatoren bei Systemen ohne Absaugung. (Zum Betrieb der Strahlventilatoren siehe §7.2.3.3).

Als Grundannahme für die Auslegung ist von einer Dauer von 3 Minuten zwischen dem Beginn des Ereignisses und der Inbetriebnahme des entsprechenden Lüftungsregimes der Strahlventilatoren bzw. der Verkehrsbeeinflussung auszugehen. Der Bestimmung der Staulänge vor dem Ereignisort ist der MSV zugrunde zu legen. Darüber hinaus ist bei Tunneln mit Richtungsverkehr und grosser Stauhäufigkeit (RV 2) von einer Staulänge von mindestens 3/4 der Tunnellänge auszugehen. Die meteorologisch-thermischen Einflüsse sind gemäss §7.1.5 entgegen der geforderten Längsströmung einzubeziehen.

Die Lüftung eines Tunnels mit Richtungsverkehr muss nicht auf ein Ereignis bei ausnahmsweisem Gegenverkehr ausgelegt werden, allerdings muss beim Betrieb der Lüftungsanlage der Sonderfall von ausnahmsweisem Gegenverkehr berücksichtigt werden (§7.2.3.3).

#### 7.2.3.3 Anforderungen an den automatischen Betrieb der Strahlventilatoren

Die einzustellende Luftströmung im Fall eines Ereignisses unterscheidet sich insbesondere nach der Verkehrsart und momentanem Verkehrszustand. Falls sich auf beiden Seiten des Ereignisses Tunnelbenutzer aufhalten (GV, gegebenenfalls RV 2 sowie Röhre mit ausnahmsweisem Gegenverkehr), muss die Längsströmung am Ereignisort minimiert werden, damit die Tunnelbenutzer auf beiden Seiten des Ereignisses fliehen können. Der Betrieb der Strahlventilatoren muss anhand der Längsgeschwindigkeit ausserhalb der vom Ereignis beeinflussten Zone geregelt werden. Im Bereich, wo sich Tunnelbenutzer aufhalten, soll eine eventuell vorhandene Rauchsichtung unter der Decke nach Möglichkeit nicht gestört werden.

Falls sich die Tunnelbenutzer nur auf einer Seite des Ereignisses befinden (RV 1 und RV 2 bei fließendem Verkehr), können die Strahlventilatoren ungeregelt in Fahrrichtung betrieben werden.

### 7.2.4 Hinweise zu Systemen mit Absaugung

#### 7.2.4.1 Allgemeines

Die in §7.2.4 gestellten Mindestanforderungen müssen bei zweiröhren Tunneln für jede Röhre einzeln und gleichzeitig erfüllt werden können. Mit Klappen verschliessbare Verbindungen der Abluftkanäle zweier paralleler Röhren sind zulässig, erlauben jedoch keine Auslegung unter die Mindestanforderungen.

Als Grundannahme für die Dimensionierung ist von einer Dauer von 4 Minuten zwischen Beginn des Ereignisses und dem Zeitpunkt bis der vorgesehene Betriebszustand der Absauganlage erreicht ist auszugehen.

### 7.2.4.2 Absaugkapazität und Beeinflussung der Längsströmung (siehe auch §VII.2.1 und §VII.2.2)

Die Absaugkapazität ist so zu bemessen, dass bei den zugrunde zu legenden Ereignissen gemäss §7.2.1 die folgenden Längsströmungen im Fahrraum eingehalten werden können. Die Anforderungen gelten im Fahrraumquerschnitt mit Zwischendecke.

| Verkehrsart (§6.1) | Situation vor dem Ereignis   | Längsströmung gegen Ereignisort | Tunnelbereich  |
|--------------------|------------------------------|---------------------------------|--|
| RV 1               | fließender Verkehr           | 3 m/s<br>0 m/s                  | vor dem Absaugbereich (Fahrzeugstau)<br>nach dem Absaugbereich |
|                    | Ausn. GV*                    | 1.5 m/s                         | beidseits des Absaugbereichs                                   |
| RV 2               | fließender Verkehr           | 3 m/s<br>0 m/s                  | vor dem Absaugbereich (Fahrzeugstau)<br>nach dem Absaugbereich |
|                    | Stau                         | 1.5 m/s                         | beidseits des Absaugbereichs                                   |
|                    | Ausn. GV*                    | 1.5 m/s                         | beidseits des Absaugbereichs                                   |
| GV                 | fließender Verkehr oder Stau | 1.5 m/s                         | beidseits des Absaugbereichs                                   |

\* Ausnahmsweise Gegenverkehr: nicht massgebend für die Auslegung.

**Abb. 24** : Mindestanforderungen an die Längsströmung in Richtung Ereignisort bei Systemen mit Absaugung gültig für die Auslegung und den Betrieb.

Der Zuluftbeitrag  $Q_{ZUL}$  im Bereich der freigesetzten Gase, d.h. bei einem Brand im anfänglich maximal verrauchten Bereich, ist zu minimieren und bei der Festlegung des minimalen Abluftstroms zu berücksichtigen. Zur Einhaltung der Anforderungen in Abbildung 24 ist in allen Fällen beim Ereignisort eine minimale Absaugung  $Q_{ABL,min}$  erforderlich von:

$$Q_{ABL,min} = 3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot A_{Tunnel} + Q_{ZUL} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{Gl. 7-22}$$

wobei:

$$Q_{ABL,min} \geq \text{Volumenstrom freigesetzter Gase} + 20 + Q_{ZUL} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{Gl. 7-23}$$

in jedem Fall erfüllt sein muss (siehe Abb. 20).

Die Längsströmungen gemäss Abbildung 24 müssen in allen Fällen analog Abbildung 23 und bei allen möglichen Ereignisorten eingehalten werden. Dazu muss entweder die Absaugmenge gegenüber dem Minimalwert nach Gleichung 7-22 erhöht werden oder die Längsströmung muss mit Strahlventilatoren kontrolliert werden. Die angemessene Kombination von effektiver Absaugmenge  $Q_{ABL}$  und Strahlventilatoren (Typ, Anzahl, Anordnung) folgt aus einer Optimierung. Dabei ist die Verwendung der Strahlventilatoren bei Normalbetrieb zu berücksichtigen.

Bei der Dimensionierung der Abluftventilatoren ist die Undichtheit der geschlossenen Abluftklappen und der Kanäle  $Q_{Leck}$  einzubeziehen.

$$Q_{Ventilator} = Q_{ABL} + Q_{Leck} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{Gl. 7-24}$$

$Q_{Ventilator}$  ist der minimale Volumenstrom, der durch die Anzahl vorgesehener Abluftventilatoren zu fördern ist (isotherme Betrachtung). Für den Sonderfall der Auslegung der Abluftventilatoren auf 400°C (siehe §8.3.1, Temperaturbeständigkeit), sind diese auf die Luftmenge von  $1.3 \times Q_{Ventilator}$  auszulegen.

### 7.2.4.3 Art der Absaugung

Die Absaugung muss mit steuerbaren Klappen erfolgen. Die Absaugmenge  $Q_{ABL}$  ist im Bereich des Ereignisses auf einer Länge von 200 m abzusaugen. Die Abluftklappen sind im Abstand von rund 100 m anzuordnen. Im Regelfall sind somit 3 Klappen zu öffnen.

Eine Absaugung in Portalnähe ist nur in besonderen Fällen wirkungsvoll. Der Beginn des Abluftkanals kann bis 300 m vom Portal entfernt sein. Die portalnahen Abschnitte eignen sich für die Anordnung von Strahlventilatoren.

Die Abluftklappen sind möglichst breit zu dimensionieren, um ein Vorbeiströmen der freigesetzten Gase zu minimieren. Für die Festlegung der Klappenfläche ist von einer vertikalen Geschwindigkeitskomponente in der Klappe von 15 m/s (isotherme Betrachtung) als Mittel über alle im Bereich des Ereignisses geöffneten Klappen auszugehen. Mit  $Q_{ABL} > Q_{ABL,min}$  ist eine vertikale Durchströmgeschwindigkeit von  $15 \text{ m/s} \cdot Q_{ABL}/Q_{ABL,min}$  zulässig.

Bei der Bestimmung des Kanalquerschnittes sind die lufttechnischen Anforderungen (Druckbedarf des Abluftventilators, Beanspruchung des Kanals, Gleichmässigkeit der Absaugmenge über die geöffneten Abluftklappen) einzubeziehen. Bei der Bestimmung der Kanalhöhe muss ein ausreichender Zugang zu den Klappen einbezogen werden. Erfolgt der Zugang durch den Kanal, muss die lichte Höhe mindestens 1.80 m betragen.

### 7.2.5 Szenarienanalyse

Die Tunnellüftungsanlage wird gemäss den §7.2.3 und 7.2.4 für eine Dauer von 3 bzw. 4 Minuten zwischen Ereignisbeginn und der Funktion der Lüftungsanlage ausgelegt. Die Auswirkungen von Abweichungen von diesen Vorgaben müssen anhand von Szenarien abgeschätzt werden. Gegebenenfalls sind verschiedene Szenarien bei der Erstellung der Programme zur Steuerung des Systems zu berücksichtigen.

Um die Anordnung der Strahlventilatoren und deren Steuerung bzw. Regelung zu bestimmen, sind die instationären Vorgänge bis 20 Minuten nach dem Ereignis zu beachten.

### 7.2.6 Vermeidung von Strömungskurzschlüssen

Die Rezirkulation von Rauch und Schadstoffen von einer Tunnelröhre in eine andere und zwischen Abluftbauwerken und Aussenluftfassungen bzw. Portalen ist durch geeignete bauliche Massnahmen zu vermeiden. Bei Tunneln mit zwei parallelen Röhren genügt es in der Regel zu diesem Zweck eine 100 m lange Ausströmzone von einer 30 m langen Einströmzone (Abb. 25) durch eine Wand mit der Höhe des Fahrraums oder durch einen Versatz der Portale zu trennen. Mit Portallagen in Einschnitten oder mit hohen Lärmschutzwänden sind die Dimensionen zu vergrössern.

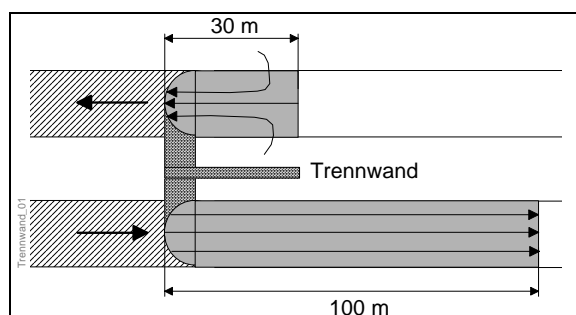


Abb. 25 : Trennwand zur Vermeidung eines Strömungskurzschlusses.

Bei einem Ereignis ist die Lüftung der Gegenröhre so zu betreiben, dass ein Strömungskurzschluss an den Portalen verhindert wird.

Damit zwei sich folgende Tunnel lüftungstechnisch unabhängig voneinander betrachtet werden können, muss der Abstand zwischen den Portalen mindestens 60 m bei Querung eines Tales und 200 m bei einer einseitigen Galerie zwischen den Tunneln betragen.

### 7.2.7 Redundanzen (siehe auch §VII.2.3)

Für die besonders sicherheitsrelevanten Komponenten und Abläufe müssen die folgenden Redundanzen vorhanden sein:

|                    |   |
|--------------------|---|
| Strahlventilatoren | Beim Ausfall einer Strahlventilatorgruppe infolge Brandeinwirkung muss der Schub der verbleibenden Strahlventilatoren mindestens 90 % des Sollwertes betragen.  |
| Abluftventilatoren | Beim Ausfall eines Abluftventilators muss der aus dem Fahrraum abgesaugte Volumenstrom mindestens 65 % von $Q_{Abl}$ (Gl. 7-24) betragen. Die Rückströmung durch den ausgefallenen Ventilator muss mit einer Abschlussklappe vermieden werden. Die Anforderung gilt für jede Röhre einzeln, auch wenn zur Erhöhung der Kapazität eine Verbindung zwischen den Abluftkanälen von benachbarten Röhren besteht.<br><br>Während 72 Stunden in einem Jahr (z.B. während Revisionsarbeiten) ist ein Abluftstrom von 65 % des Volumenstroms $Q_{Ventilator}$ gemäss Gl. 7-24 ohne Redundanz zulässig. In dieser Zeit sind Massnahmen zur Minderung des Ereignisrisikos zu treffen. |
| Abluftklappen      | Wenn eine der zu öffnenden Klappen im Bereich des Ereignisses geschlossen bleibt, muss der Abluftstrom durch die geöffneten Klappen mindestens 90 % des Sollwertes betragen.  |
| Strömungsmessung   | Wird ein Strömungsmesswert zur Steuerung im Ereignisfall verwendet, muss dessen Plausibilität mit 3 unabhängigen Messungen ermittelt werden können (vgl. §8.2).   |

Funktionskontrolle

Die Plausibilität der Ergebnisse automatisierter Funktionskontrollen muss geprüft werden können.

## 7.3 Minderung von Zusatzbelastungen in Portalzonen

### 7.3.1 Luftschadstoffe

Die Grundlage für die Beurteilung der Schadstoffbelastung in der Umgebung ist die Luftreinhalteverordnung (LRV) [9].

Mit einer Absaugung der Tunnelluft vor dem Ausströmen durch das Portal und dem Ausstoss über ein Abluftkamin kann die unmittelbare Umgebung des Portals von Zusatzbelastungen durch Tunnelabluft entlastet werden. Die Notwendigkeit der Abluftabsaugung ist im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung zu untersuchen. Tunnelröhren, deren Portalfrachten die in Abbildung 26 angegebenen Werte überschreiten, benötigen in der Regel Lüftungsanlagen zur Minderung der am Portal freigesetzten Abluftmenge.

| Umfeld                             | Portalfracht in t NO <sub>x</sub> /Jahr |
|------------------------------------|---|
| Innerstädtisch                     | > 10                                    |
| Locker besiedelt, Wohnbereich      | > 20                                    |
| Locker besiedelt, Industriebereich | > 30                                    |
| Unbesiedelt, ländlich              | > 40                                    |

Abb. 26 : Erfahrungswerte für NO<sub>x</sub>-Portalfrachten, bei denen Absauganlagen projiziert werden.

Bei der Dimensionierung von Abluftkaminen ist auf eine ausreichende Kaminhöhe und Strahlgeschwindigkeit an der Mündung zu achten (vergleiche V Seite 48f). In dicht besiedelten Gebieten sind detaillierte Untersuchungen anzustellen.

Mit dem Ziel, die Zusatzbelastung in der Umgebung der Portale insbesondere im Langzeitmittel zu mindern, kann die Anlage nach den Erfahrungswerten betreffend der Ganglinien des Verkehrs gesteuert werden. Eine Verwendung von im direkten Einflussbereich des Tunnels gemessenen Konzentrationswerten zur Steuerung der Lüftungsanlage ist nicht zweckmässig.

Bei der gesamtheitlichen Bilanzierung von Nutzen und Aufwand ist die eingesetzte Energie für den Bau und den Betrieb der Abluftanlage als ökologische Grösse zu berücksichtigen. Aufgrund des heutigen Kenntnisstandes der Schadeneinwirkung der Luftschadstoffe, der Minderung der Emissionen der Motorfahrzeuge und der allgemeinen Einschätzungen der Prioritäten (Reduktion der Emissionen an der Quelle, Minimierung des Energiebedarfs sowie des Bau- und Unterhaltsaufwandes) wird eine Reinigung der Tunnelluft ausgeschlossen.

### 7.3.2 Lärm der Ventilatoren

Die Grundlage für die Beurteilung der Lärmbelastung in der Umgebung ist die Lärmschutzverordnung (LSV) [10].

In der Umgebung der Tunnelportale und im Einflussbereich von Aussenluftfassungen und Abluftkaminen müssen im Betrieb bei normalen Verkehrszuständen die Anforderungen des Schallschutzes eingehalten werden.

## 7.4 Optimierung der Anlage

Bei der Dimensionierung der Anlage sind Investitions- und Betriebskosten einzubeziehen. Zu diesem Zweck ist das Vorgehen in Anhang VI Seite 50ff zu verwenden.

## 7.5 Belüftung der Betriebsräume

In den Betriebsräumen sind die vorgegebenen Arbeitsplatzbedingungen bezüglich Luftqualität, Lufttemperatur und Luftfeuchte zu gewährleisten sowie die Einrichtungen vor Verschmutzung und unzulässigen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten zu schützen. Zu diesem Zweck ist in der Regel eine eigene Lüftungstechnische Anlage, die einen Überdruck gegenüber dem Fahrraum erzeugt, erforderlich.

## **7.6 Dokumentation der Dimensionierung**

Die Dimensionierung der Lüftung einschliesslich der Ausstattung und der vorgesehenen Betriebsweise ist nachvollziehbar zu dokumentieren. Dazu gehören insbesondere die Angaben zu den verwendeten Grunddaten und Berechnungsmethoden. Die Funktion der Anlage für den Normalbetrieb und den Betrieb im Ereignisfall ist umfassend zu beschreiben.

## 8 AUSSTATTUNG

### 8.1 Allgemeines

Die Ausstattung der Strassentunnel muss dem aktuellen Stand der Technik [17] [18] und den Richtlinien des ASTRA [2] [11] [12] [13] entsprechen. Im Weiteren ist auf folgende Punkte zu achten:

- gute Zugänglichkeit für die Wartung und den Unterhalt
- Korrosionsbeständigkeit bzw. Korrosionsschutz der Komponenten
- Verfügbarkeit der Ersatzteile

Es gelten die nachfolgend genannten Mindestanforderungen. Im Anhang V Seite 48f sind im Sinne einer Checkliste weitere Angaben zur Ausstattung gegeben.

### 8.2 Messgeräte und Detektionseinrichtung

#### 8.2.1 Normalbetrieb

##### 8.2.1.1 Allgemeines

Der Einsatz der Lüftung bei Normalbetrieb wird in der Regel durch die Messgrössen

- Sichttrübung
- CO
- Luftrichtung und -geschwindigkeit im Fahrraum

bestimmt. Darüber hinaus kann es zweckmässig sein, die Verkehrswerte vor und im Tunnel oder Erfahrungswerte bezüglich des Verkehrsverlaufs in die Lüftungssteuerung einzubeziehen.

##### 8.2.1.2 Sichttrübungsmessung (siehe auch §8.2.2)

Tunnel mit mechanischer Lüftung sind mit Geräten zur Messung der Sichttrübung auszustatten. Pro Tunnelröhre sind mindestens zwei Geräte zu betreiben.

##### 8.2.1.3 CO-Messung

Falls dies aufgrund der Berechnung des Frischluftbedarfs erforderlich ist, muss die CO-Konzentration in der Fahrraumluft kontinuierlich überwacht und in die Lüftungssteuerung eingebunden werden. Wenn eine CO-Messung erforderlich ist, sind pro Tunnelröhre mindestens zwei Geräte zu betreiben.

##### 8.2.1.4 Strömungsmessung (siehe auch §8.2.2)

Die Messung der Luftströmung im Fahrraum dient zusammen mit den übrigen Messwerten zur Steuerung der Lüftungsanlage und als Kontrolle der Wirkung der Lüftung.

In jeder Tunnelröhre mit mechanischer Lüftung ist pro Lüftungsabschnitt mindestens in einem Fahrraumquerschnitt die Strömungsrichtung und der Volumenstrom bzw. die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum zu ermitteln.

#### 8.2.2 Ereignisfall

##### 8.2.2.1 Detektion

Tunnel mit mechanischer Lüftung sind mit einer Ereignis- und Branddetektion auszurüsten. Der Abstand der Geräte zur Erfassung von Kaltrauch darf 300 m nicht übersteigen. Massgebend sind die Anforderungen in der ASTRA-Richtlinie Branddetektion [11].

Grundsätzlich sind soweit möglich und sinnvoll alle im Tunnel vorhandenen Sensoren, einschliesslich der Videoanlage (siehe ASTRA-Richtlinie Verkehrsfernsehen [12]), in angemessener Weise zur Detektion eines Ereignisses zu verwenden.

##### 8.2.2.2 Strömungsmessung

Entsprechend den Anforderungen in den §7.2.3.3 und 7.2.4.2 sind die Daten der Luftgeschwindigkeitsmessung in die Steuerung einzubeziehen, um im Ereignisfall die Strömung im Fahrraum regeln zu können. Die dazu verwendete Strömungsgeschwindigkeit muss mit Messungen an drei Messorten plausibilisiert werden.

### 8.2.3 Anforderungen

#### 8.2.3.1 Mindestanforderungen an Messbereich und -genauigkeit

Alle Messgeräte müssen für den Einsatz in einem Strassentunnel konzipiert sein und sie müssen die folgenden Mindestanforderungen erfüllen:

| Messgrösse   | Messbereich                          | Messgenauigkeit                                   |
|--|--------------------------------------|---|
| Strömungsgeschwindigkeit<br>- Fahrraum<br>- Kanäle, Schächte | -12 bis +12 m/s<br>entspr. Auslegung | ± 0.1 m/s<br>± 1 % des Endwerts                   |
| Sichttrübung (Normalbetrieb)                                 | 0 bis 0.015 m <sup>-1</sup>          | ± 0.0005 m <sup>-1</sup>                          |
| CO   | 0 bis 250 ppm                        | 0 bis 60 ppm: ± 5 ppm<br>60 bis 250 ppm: ± 15 ppm |

Abb. 27 : Mindestanforderungen an die Messgeräte.

#### 8.2.3.2 Detektionsgeschwindigkeit und -ort

Eine rasche Detektion eines Ereignisses (siehe [11]) ist entscheidend für die Wirksamkeit der installierten Lüftungsanlage. Bei einem System mit steuerbaren Abluftklappen ist zudem die Bestimmung des Ereignisortes entscheidend für den richtigen Betrieb der Lüftung.

#### 8.2.3.3 Mittelungszeiten

Als maximale Mittelungszeiten für die Messsysteme, die zur Ereignisdetektion verwendet werden, sind 10 s anzustreben. Für die Steuerung bei Normalbetrieb ist es zweckmässig, über längere Zeiten gemittelte Messdaten zu verwenden.

### 8.3 Temperaturbeständigkeit

#### 8.3.1 Abluftventilatoren

Die Funktion der Ventilatoren für die Absaugung von Brandgasen ist für eine Temperatur von 250°C während 120 Minuten zu gewährleisten. Für den Sonderfall, bei dem Abluftventilatoren die gesamte Luftmenge durch eine einzige Öffnung aus dem Fahrraum fördern und der Abstand zwischen möglichem Brandort und Ventilatoren weniger als 50 m beträgt, muss die Funktion der Absaugung für eine Temperatur von 400°C während 120 Minuten gewährleistet sein. Es ist dabei sicherzustellen, dass auch die Funktion der übrigen Installationen (z.B. im Ventilatorraum) bei der entstehenden Wärmebelastung gewährleistet bleibt.

#### 8.3.2 Strahlventilatoren

Die Funktion der Strahlventilatoren ist für eine Temperatur von 250°C während 120 Minuten zu gewährleisten.

#### 8.3.3 Abluftklappen

Die Funktion von steuerbaren Abluftklappen, einschliesslich Motor, Zuleitungen usw., muss für eine Temperatur von 250°C über 120 Minuten gewährleistet sein.

## 9 FLUCHTWEGE

### 9.1 Allgemeines

Im Ereignisfall hat die Selbstrettung der Tunnelbenützer erste Priorität. Fluchtwege führen den Benützer vom Ereignisort ins Freie. Das vorrangige Ziel des Lüftungsbetriebs besteht darin, die Fluchtwege frei von schädlichen Gasen und Rauch zu halten.

Konzeption, Auslegung und Signalisation der Fluchtwege sind nach den Anforderungen der SIA-Normen 197 [17] und 197/2 [18], des Leitfadens *Belüftung von Sicherheits- und Querstollen der Strassentunnel* [14] und der ASTRA-Richtlinie *Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Tunneln* [13] durchzuführen.

Die §9.2 und 9.3 enthalten grundlegende Anmerkungen sowie Lüftungstechnische Präzisierungen zu den Anforderungen in den oben genannten Dokumenten.

### 9.2 Tunnel mit zwei parallelen Röhren

Bei Tunneln mit Richtungsverkehr in zwei parallelen Röhren gilt:

- 1) Bei zweiröhriigen Tunneln erfolgt die Flucht durch die zweite Röhre.
- 2) Begehbare Querverbindungen von mehr als 5 m Länge sind jedenfalls mit zwei Türen auszurüsten. Der Durchgang muss für Tunnelbenützer jederzeit möglich sein. Eine eigentliche Schleusenverriegelung ist bei diesen Türen nicht zulässig. Der Ausgang auf die Gegenfahrbahn muss als solcher bezeichnet und gegebenenfalls gesichert sein. Um einen Strömungskurzschluss zwischen den beiden Tunnelröhren zu vermeiden, sind die Türen bei Normalbetrieb geschlossen zu halten.
- 3) Die Gegenröhre und die Querverbindungen sind im Ereignisfall von freigesetzten Gasen und Rauch frei zu halten. Soweit möglich soll dies mit Überdruck in der Gegenröhre erreicht werden. Ein Ereignisalarm initialisiert das dazu erforderliche Lüftungsregime.

### 9.3 Tunnel mit einer Röhre

Bei Tunneln mit Gegenverkehr und Tunneln mit Richtungsverkehr ohne zweite, parallele Röhre gilt:

- 1) Fluchtwege längs über dem Fahrraum sind nicht zulässig. Räume, die nur vom Fahrraum her zugänglich sind, sind kein Ersatz für Fluchtwege.
- 2) Die Fluchtwege nach den Notausgängen sind im Ereignisfall von schädlichen Gasen und Rauch frei zu halten. In der Regel ist ein permanenter Überdruck gegenüber dem Fahrraum einzustellen (siehe [14]). Ein Ereignisalarm initialisiert den im Ereignisfall erforderlichen Lüftungsbetrieb.

## **10 BESONDERE ÜBERPRÜFUNGEN**

### **10.1 Besondere Anforderungen an Anlagekomponenten**

Das Lüftungssystem ist von höchster Bedeutung für die Sicherheit der Tunnelbenützer. Aus diesem Grund sind qualitativ hochstehende und einfache Komponenten einzusetzen, die eine hohe Betriebssicherheit garantieren. Anlagekomponenten, deren Fehlfunktion ein hohes Risiko birgt, sind zu ermitteln, wenn möglich zu vermeiden oder redundant auszuführen. Bezüglich Redundanzen sind die Anforderungen in §7.2.7 zu beachten.

Die elektrischen und elektronischen Komponenten der Lüftungssteuerung sind entsprechend den Kriterien einer hohen Verfügbarkeit und einer geringen Fehlerrate zu wählen. Die Funktion jeder einzelnen Komponente der Lüftung muss periodisch geprüft werden. Soweit möglich und sinnvoll sollen diese Prüfungen automatisiert werden. Diese Tests und ihre Ergebnisse, welche die einwandfreie Funktion der Komponenten und der gesamten Anlage nachzuweisen haben, sind zu dokumentieren.

### **10.2 Inbetriebnahme der Anlage**

Bei der Inbetriebnahme sind in Gegenwart der verantwortlichen Personen des Betriebs alle Komponenten umfassenden Tests zu unterziehen und es sind alle Funktionen zu kontrollieren und zu protokollieren. Die zukünftigen Operateure sind anhand konkreter Situationen mit der Anlage vertraut zu machen und eingehend zu schulen. Von den Operateuren wird die Beherrschung der Anlage sowohl im automatischen wie im manuellen Betrieb und beim Test der Komponenten verlangt.

### **10.3 Überprüfung des Gesamtkonzeptes**

Bei wesentlichen Änderungen der Randbedingungen für die Lüftung ist das System als Ganzes zu überprüfen. Als solche Änderungen gelten insbesondere neue, in der Auslegung nicht vorgesehene Betriebsweisen der Lüftung, massgebende Änderungen der Verkehrsdaten und generell neue Erkenntnisse aus Ereignissen.

# 11 BETRIEBSBEDINGUNGEN

## 11.1 Luftqualität im Fahrraum

Die Auslegung der Lüftung erfolgt auf die Dimensionierungswerte für CO und Sichttrübung gemäss Abb. 16. Für die Steuerung der Anlage sind die Einschaltwerte derart festzulegen, dass der Dimensionierungswert für CO im Mittel über die Tunnellänge und der Dimensionierungswert für Sichttrübung an jedem Ort im Tunnel eingehalten werden.

Werden die in Abbildung 28 angegebenen Werte an einer beliebigen Stelle im Fahrraum für mehr als 3 Minuten überschritten, ist die betroffene Tunnelröhre für einfahrende Fahrzeuge zu sperren.

| CO-Konzentration<br>[ppm] | Sichttrübung<br>[1/m] |
|---------------------------|-----------------------|
| 200                       | 0.012                 |

Abb. 28 : Grenzwerte der Luftqualität im Fahrraum zur Tunnelsperrung.

Überschreitet eine Sichttrübungsmessung den eingestellten Alarmwert für die Rauchdetektion, wird automatisch die Lüftung für den Ereignisfall eingeschaltet.

## 11.2 Steuerung

### 11.2.1 Mess- und Detektionssystem

Angaben zur Instrumentierung sind in Kapitel 8 enthalten.

### 11.2.2 Strahlventilatoren

Strahlventilatoren, die im Ereignisfall zur Einhaltung einer bestimmten Längsströmung betrieben werden, sind während der Dauer des Ereignisses automatisch nachzuregeln. Dazu müssen zuverlässige Messungen der Längsgeschwindigkeit der Luft im Fahrraum vorliegen.

### 11.2.3 Abluftmengen

Die Abluftmenge von  $3 \text{ m/s} \cdot \text{Fahrraumquerschnitt in } \text{m}^2$  gemäss §7.2.4 bezeichnet den minimalen Abluftstrom im Abschnitt des Ereignisses. Stehen grössere Kapazitäten zur Verfügung, sind diese auszunützen.

### 11.2.4 Zuluftbetrieb im Ereignisfall

Der Zuluftbeitrag ist im Bereich des Ereignisses auszuschalten oder zu reduzieren und die Abluftmenge um den Betrag der Zuluft im Bereich der Absaugung zu erhöhen (vgl. §7.2.4). In den Nachbarabschnitten kann es zweckmässig sein, mit grossen Zuluftmengen zu fahren und die Zu- und Abluftmengen aufeinander abzustimmen.

### 11.2.5 Steuerbare Abluftklappen bei Normalbetrieb

Falls erforderlich können die steuerbaren Abluftklappen auch für den Normalbetrieb der Lüftung genutzt werden.

### 11.2.6 Steuerbare Abluftklappen sowie Abluft- und Zuluftventilatoren im Ereignisfall

Steuerbare Abluftklappen sowie Abluft- und Zuluftventilatoren sind im Ereignisfall durch vorgegebene Szenarien mit Bezug auf den Ereignisort automatisch zu steuern. Eine automatische Umsteuerung der Klappen ist im Allgemeinen nicht zweckmässig. Bei mehreren Alarmen in Folge ist die Automatik zunächst entsprechend dem ersten Alarm beizubehalten. Die manuelle Umsteuerung der Klappen und Ventilatoren muss möglich sein.

Mit der automatischen Ereignisdetektion soll die Anlage möglichst rasch auf einen eventuellen Brandausbruch vorbereitet werden (Einstellen der Klappen).

### 11.3 Nachvollziehbarkeit von besonderen Ereignissen

Alle lüftungsrelevanten Messgrößen und Videoaufzeichnungen sind bei jedem Brandalarm automatisch zu speichern.

Für die Untersuchung des Ereignisses und zur Analyse der Lüftungsfunktion ist jedes Brandereignis in einem nachvollziehbaren und vollständigen Bericht zuhanden des ASTRA zu dokumentieren.

### 11.4 Verkehrsbeeinflussung

Stausituationen im Tunnel bei Normalbetrieb sollen mit der Verkehrssteuerung vermieden werden.

Bei einem Ereignis sind die Einfahrten in die Röhre mit dem Ereignis in angemessenem Abstand vor den Portalen zu sperren, und der Verkehr in Richtung Ereignisort ist sofort anzuhalten. Die Ausfahrt von Fahrzeugen, die den Ereignisort bereits passiert haben, ist sicherzustellen. Bei einem zweiröhri- gen Tunnel muss im Fall eines Brandes die Einfahrt in die nicht betroffene Röhre sofort gesperrt werden, und die Fahrzeuge, die sich bereits in der nicht betroffenen Röhre befinden, müssen den Tunnel verlassen können.

### 11.5 Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)

Sicherheitsrelevante Einrichtungen, wie die Mess- und Detektionseinrichtung sowie die Steuerung, sind bei der Auslegung der USV-Anlage einzubeziehen.

Die Axialventilatoren, die Strahlventilatoren sowie die Ventilatoren zur Druckbelüftung der Fluchtwege müssen von zwei unabhängigen Netzen versorgt werden. Ein Betrieb über USV ist nicht praktikabel.

## 12 WARTUNGS- UND UNTERHALTSARBEITEN

### 12.1 Luftqualität im Fahrraum

Bei Wartungs- und Unterhaltsarbeiten im Tunnel sind die von der SUVA geforderten Werte der Luftqualität im Fahrraum einzuhalten. Von der Auslegung bzw. Installation einer Lüftungsanlage ausschliesslich für Wartungs- und Unterhaltsarbeiten ist abzusehen. Wo keine CO-Messgeräte eingebaut sind, kann die Lüftung während Wartungs- und Unterhaltsarbeiten aufgrund der Erfahrung betrieben werden. Bei der erstmaligen Durchführung von typischen Arbeiten empfiehlt sich die Verwendung von mobilen CO-Messgeräten.

### 12.2 Arbeitsumfang

Die üblichen Wartungs- und Unterhaltsarbeiten sind nach den Bestimmungen in den Betriebshandbüchern der Hersteller durchzuführen und zu dokumentieren. Abweichende Erfahrungswerte sind mit Bezug auf die Handbücher zu dokumentieren. Alle Komponenten, die sich gemäss §10.1 als sicherheitstechnisch wesentlich erweisen, sind zur Gewährleistung ihrer Funktionalität in angemessenen Intervallen zu überprüfen. Besondere Aufmerksamkeit ist jenen Lüftungskomponenten zu schenken, die im Normalbetrieb nicht eingesetzt werden.

Wesentliche Komponenten sind insbesondere:

- Detektions- und Messeinrichtungen
  - Brandmeldeanlage
  - Temperaturmessung / Temperatursensoren
  - Sichttrübungsmessung
  - CO-Messung
  - Strömungsmessung im Fahrraum
- Abluftventilatoren
- Strahlventilatoren
- Steuerbare Abluftklappen
- Abschluss- und Bypassklappen
- Steuerungen/Regelungen
- Fluchttüren

In die Überprüfungen sind zudem die Zustandsmeldungen betreffend der Komponenten einzubeziehen (Position der Klappen, Zustand der Ventilatoren usw.).

# ANHÄNGE

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>I</b>   | <b>Verständigung .....</b>                            | <b>35</b> |
| I.1        | Abkürzungen .....                                     | 35        |
| I.2        | Einheiten .....                                       | 36        |
| I.3        | Glossar .....   | 36        |
| <b>II</b>  | <b>Richtwerte zur Verkehrsprognose.....</b>           | <b>38</b> |
| II.1       | Verkehrsentwicklung .....                             | 38        |
| II.2       | Massgebender stündlicher Verkehr .....                | 38        |
| II.3       | Stauhäufigkeit.....                                   | 38        |
| <b>III</b> | <b>Emissionsberechnung.....</b>                       | <b>39</b> |
| III.1      | Grundlagen.....                                       | 39        |
| III.2      | Emissionen der Personenwagen .....                    | 39        |
| III.3      | Emissionen der Lastwagen .....                        | 42        |
| III.4      | Zeitliche Entwicklung der<br>Basisemissionen .....    | 45        |
| <b>IV</b>  | <b>Strahlventilatoren.....</b>                        | <b>46</b> |
| IV.1       | Allgemeines.....                                      | 46        |
| IV.2       | Ventilatoraten .....                                  | 46        |
| IV.3       | Anordnung.....  | 46        |
| IV.4       | Normalbetrieb.....                                    | 46        |
| IV.5       | Betrieb im Ereignisfall.....                          | 47        |
| <b>V</b>   | <b>Hinweise zu Komponenten (Checkliste)..</b>         | <b>48</b> |
| <b>VI</b>  | <b>Angaben zur Optimierung der<br/>Auslegung.....</b> | <b>50</b> |
| VI.1       | Allgemeines.....                                      | 50        |
| VI.2       | Amortisation des Kapitaleinsatzes .....               | 50        |
| VI.3       | Mittlere Kosten .....                                 | 50        |
| VI.4       | Nutzungsdauer resp.<br>Betrachtungsperiode .....      | 51        |
| VI.5       | Kapitalzins und Teuerung .....                        | 52        |
| VI.6       | Energiepreise .....                                   | 52        |
| VI.7       | Erforderliche Angaben.....                            | 52        |
| <b>VII</b> | <b>Präzisierungen vom 31. Juli 2006.....</b>          | <b>53</b> |
| VII.1      | Geltungsbereich .....                                 | 53        |
| VII.2      | Präzisierungen .....                                  | 54        |
| VII.3      | Nomogramm zur Abschätzung der<br>Leckagemenge .....   | 56        |
|            | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                     | <b>57</b> |



# I VERSTÄNDIGUNG

## I.1 Abkürzungen

Abkürzungen, die ausschliesslich in Anhängen verwendet werden, sind in den jeweiligen Anhängen definiert.

| deutsch               | Abkürzung<br>französisch | Einheit       | Bedeutung   |
|-----------------------|--------------------------|---------------|---|
| ASTRA                 | OFROU                    | -             | Bundesamt für Strassen  |
| $A_{Tunnel}$          | $A_{Tunnel}$             | $m^2$         | Querschnittfläche des Tunnelfahrtraums  |
| BUWAL                 | OFEFP                    | -             | Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft   |
| $C_{lim,CO}$          | $C_{lim,CO}$             | ppm           | Dimensionierungswert für CO   |
| CO                    | CO                       | -             | Kohlenmonoxid   |
| $c_w \cdot A_{Front}$ | $c_w \cdot A_{front}$    | $m^2$         | Widerstandsfläche der Fahrzeuge   |
| $D_h$                 | $D_h$                    | m             | Hydraulischer Durchmesser $D_h = 4 \cdot \text{Querschnittfläche} / \text{Umfang}$                        |
| DTV                   | TJM                      | Fz/24h        | Durchschnittlicher täglicher Verkehr (Summe beider Fahrrichtungen zusammen)                               |
| $E_{CO}$              | $E_{CO}$                 | $m^3/s$       | Gesamte CO-Emission   |
| $e_{LW,CO}$           | $e_{PL,CO}$              | $m^3/(h, Fz)$ | Spezifische CO-Emission eines LW  |
| $e_{LW,T}$            | $e_{PL,op}$              | $m^2/(h, Fz)$ | Spezifische Sichttrübe-Emission eines LW  |
| $e_{PW,CO}$           | $e_{VT,CO}$              | $m^3/(h, Fz)$ | Spezifische CO-Emission eines PW  |
| $e_{PW,T}$            | $e_{VT,op}$              | $m^2/(h, Fz)$ | Spezifische Sichttrübe-Emission eines PW  |
| $E_T$                 | $E_{op}$                 | $m^2/s$       | Gesamte Sichttrübe-Emission   |
| g                     | g                        | $m/s^2$       | Erdbeschleunigung = $9.81 m/s^2$  |
| GV                    | TB                       | -             | Gegenverkehr  |
| H                     | alt                      | m ü. M.       | Höhe über Meer  |
| $K_{lim,T}$           | $K_{lim,op}$             | 1/m           | Dimensionierungswert für die Sichttrübung im Tunnel   |
| $L_{Brand}$           | $L_{incendie}$           | m             | Abschnitt im Brandbereich mit erhöhter Temperatur   |
| LN                    | Décl                     | -             | Längsneigung. Positive Werte bezeichnen bei Richtungsverkehr eine Bergfahrt, negative Werte eine Talfahrt |
| $LN_{Brand}$          | $Décl_{incendie}$        | -             | massgebende Längsneigung im Abschnitt $L_{Brand}$   |
| LRV                   | OPair                    | -             | Luftreinhalte-Verordnung  |
| LSV                   | OPbruit                  | -             | Lärmschutz-Verordnung   |
| $L_{Tunnel}$          | $L_{Tunnel}$             | m             | Tunnellänge   |
| LW                    | PL                       | -             | Lastwagen   |
| MSV                   | THD                      | Fz/h          | Massgebender, stündlicher Verkehr   |
| $NO_2$                | $NO_2$                   | -             | Stickstoffdioxid  |
| $NO_x$                | $NO_x$                   | -             | Stickoxid   |
| $p_{atm}$             | $p_{atm}$                | Pa            | Atmosphärischer Druck   |
| PW                    | VT                       | -             | Personenwagen   |
| PWE                   | UVT                      | -             | Personenwagen-Einheit   |
| $Q_{ABL}$             | $Q_{ae}$                 | $m^3/s$       | Volumenstrom der Abluft durch die geöffneten Klappen  |
| $Q_{ABL,min}$         | $Q_{ae,min}$             | $m^3/s$       | Minimaler Volumenstrom der Abluft durch die geöffneten Klappen  |
| $Q_{FL}$              | $Q_{af}$                 | $m^3/s$       | Volumenstrom der Frischluft   |
| $Q_{FL,CO}$           | $Q_{af,CO}$              | $m^3/s$       | Erforderliche Frischluftmenge für CO  |
| $Q_{FL,min}$          | $Q_{af,min}$             | $m^3/s$       | Minimale, erforderliche Frischluftmenge   |
| $Q_{FL,T}$            | $Q_{af,op}$              | $m^3/s$       | Erforderliche Frischluftmenge für Sichttrübe  |
| $Q_{Leck}$            | $Q_{fuites}$             | $m^3/s$       | Leckagestrom an geschlossenen Abluftklappen und an Kanälen  |
| $Q_{Ventilator}$      | $Q_{ventilateur}$        | $m^3/s$       | Volumenstrom an den Abluftventilatoren  |
| $Q_{ZUL}$             | $Q_{ap}$                 | $m^3/s$       | Volumenstrom der Zuluft   |
| $R_L$                 | $R_{air}$                | J/(kg·K)      | Gaskonstante der Luft = $286.7 J/(kg, K)$   |
| RV 1                  | TU 1                     | -             | Richtungsverkehr mit geringer Stauhäufigkeit  |
| RV 2                  | TU 2                     | -             | Richtungsverkehr mit grosser Stauhäufigkeit   |
| T                     | T                        | K             | Temperatur  |
| $T_a$                 | $T_e$                    | K             | Referenztemperatur der Aussenluft   |
| $T_i$                 | $T_i$                    | K             | mittlere Temperatur im Tunnelfahrtraum vor dem Ereignis   |

| Abkürzung            |                         | Einheit           | Bedeutung  |
|----------------------|-------------------------|-------------------|--|
| deutsch              | französisch             |                   |  |
| USV                  | ASC                     | -                 | Unterbrechungsfreie Stromversorgung                                      |
| UVP                  | EIE                     | -                 | Umweltverträglichkeitsprüfung  |
| $V_{Fz}$             | $V_{vhc}$               | km/h              | Fahrzeuggeschwindigkeit  |
| $V_L$                | $V_{air}$               | m/s               | Geschwindigkeit der Luft im Fahrraum                                     |
| $V_{LW,max}$         | $V_{PL,max}$            | km/h              | Grenzgeschwindigkeit der LW je nach Längsneigung                         |
| $V_{PW}$             | $V_{VT}$                | km/h              | Fahrgeschwindigkeit der PW   |
| $V_{sig}$            | $V_{sig}$               | km/h              | Signalisierte Höchstgeschwindigkeit                                      |
| $\Delta p_{Brand}$   | $\Delta p_{incendie}$   | Pa                | Auftrieb durch Brand   |
| $\Delta p_{erf}$     | $\Delta p_{néc}$        | Pa                | Erforderlicher Druck, von Strahlventilatoren aufzubringen                |
| $\Delta p_{Fz}$      | $\Delta p_{vhc}$        | Pa                | Druckwirkung eines Fahrzeugs   |
| $\Delta p_{mt}$      | $\Delta p_{mt}$         | Pa                | Meteorologisch-thermische Druckdifferenz                                 |
| $\Delta p_{nat}$     | $\Delta p_{nat}$        | Pa                | Auf- bzw. Abtrieb durch natürliche Temperaturdifferenz                   |
| $\Delta p_{Reibung}$ | $\Delta p_{frottement}$ | Pa                | Druckverlust an der Tunnelröhre  |
| $\Delta p_{Verkehr}$ | $\Delta p_{trafic}$     | Pa                | Druckwirkung des Verkehrs  |
| $\Delta T_{Brand}$   | $\Delta T_{incendie}$   | K                 | Mittlere Temperaturzunahme durch die Brandwärme im Abschnitt $L_{Brand}$ |
| $\lambda$            | $\lambda$               | -                 | Koeffizient des Reibungsverlustes  |
| $\rho_a$             | $\rho_e$                | kg/m <sup>3</sup> | Dichte der Aussenluft  |
| $\rho_{Brand}$       | $\rho_{incendie}$       | kg/m <sup>3</sup> | Dichte der Luft im Bereich des Brandes                                   |
| $\rho_i$             | $\rho_i$                | kg/m <sup>3</sup> | Dichte der Luft im Tunnel  |
| $\zeta_a$            | $\zeta_s$               | -                 | Koeffizient des Verlustes beim Ausströmen aus dem Tunnel                 |
| $\zeta_e$            | $\zeta_e$               | -                 | Koeffizient des Verlustes beim Einströmen in den Tunnel                  |

## I.2 Einheiten

| Einheit                                    | Physikalische Grösse                         |
|--|--|
| N = kg·m/s <sup>2</sup>                    | Kraft, Schub                                 |
| Pa = N/m <sup>2</sup>                      | Druck  |
| m <sup>2</sup> /s                          | Sichttrübe-Emission, Zähigkeit der Luft      |
| ppm, mg/m <sup>3</sup> , µg/m <sup>3</sup> | Konzentration                                |
| 1/m  | Sichttrübung                                 |
| m <sup>3</sup> /s                          | Volumenstrom                                 |
| kg/m <sup>3</sup>                          | Dichte                                       |
| J = W·s                                    | Wärmeinhalt, Arbeit, Energie                 |
| W = J/s                                    | Leistung                                     |
| K  | Temperaturdifferenz oder absolute Temperatur |
| °C   | Temperatur                                   |

## I.3 Glossar

| Begriff                                      | Bedeutung  |
|--|--|
| Abluft<br><i>Air extrait, air vicié</i>      | Schadstoffbelastete Luft aus dem Tunnelfahrraum.   |
| Abluftklappe<br><i>Clapet de ventilation</i> | Steuerbare Klappe, über die schadstoffbelastete Luft und Brandrauch aus dem Fahrraum abgesaugt wird.   |
| Abrieb<br><i>Abrasion</i>                    | Abrieb von Reifen, Strassenbelag, Bremsen und Kupplungen.  |
| Aufwirbelung<br><i>Resuspension</i>          | Anteil der Partikelbelastung der Luft, der durch Wiederaufwirbelung abgelagerter Teilchen entsteht.  |
| Aussenluft<br><i>Air extérieur</i>           | Luft in der Umgebung des Tunnels. Die Vorbelastung der Aussenluft durch CO und Sichttrübe ist im Allgemeinen für die Belange der Tunnellüftung vernachlässigbar. |

| Begriff  | Bedeutung   |
|--|---|
| Branddauer<br><i>Incendie (durée d')</i>   | Zeitspanne zwischen Brandausbruch und Brandende.  |
| Brandentwicklungszeit<br><i>Incendie (durée de développement de l')</i>            | Zeitspanne zwischen Brandausbruch und Vollbrand.  |
| Brandleistung nominal<br><i>Incendie (puissance nominale d')</i>                   | Bezeichnung des Dimensionierungsbrandes.  |
| Detektionszeit<br><i>Détection (temps de)</i>                                      | Dauer zwischen Ereignis und Alarmierung.  |
| Durchschnittlicher, täglicher Verkehr<br><i>Trafic journalier moyen</i>            | Anzahl der motorisierten Fahrzeuge an einem Strassenquerschnitt in einem Jahr dividiert durch 365 Tage (DTV).   |
| Ereignisfall<br><i>Incident</i>  | Störung im Verkehrsfluss mit akuter Gefährdung der Verkehrsteilnehmer.  |
| EUREKA-Versuche<br><i>Essais EUREKA</i>  | Versuchsreihe zur Bestimmung des Brandverhaltens von Fahrzeugen [7].  |
| Fahrraum<br><i>Espace de circulation</i>   | Tunnelraum begrenzt durch Strasse, Decke und Wände.   |
| Fluchtgeschwindigkeit<br><i>Vitesse de fuite</i>                                   | Fortbewegungsgeschwindigkeit einer zu Fuss flüchtenden Personen, typischer Wert: 5 km/h $\approx$ 1.5 m/s.  |
| Fluchtwegdistanz<br><i>Distance de fuite</i>                                       | Länge des Weges vom Unfallort bis zur nächsten ausreichend geschützten Stelle bei ungünstigster Lage des Ereignisortes, z.B. Abstand zwischen Querschlägen.   |
| Frischlufte<br><i>Air frais</i>  | Aussenluft, die zur Einhaltung der geforderten CO-Konzentration und Sichttrübung in einem bestimmten Tunnelabschnitt erforderlich ist. Die Frischlufte kann als Zuluft, Aussenluft (durch das Portal) oder als Anteil von vorbelasteter Luft in den Abschnitt eingebracht werden. |
| Frischluftebedarf<br><i>Air frais (besoin d')</i>                                  | Erforderlicher Frischluftevolumenstrom zur Einhaltung der Dimensionierungswerte für die Luftqualität im Tunnel.   |
| Halbquer-/Querlüftung<br><i>Ventilation semi-transversale/-transversale</i>        | Das System der Halbquer-/Querlüftung ist nicht mehr zulässig (§3.4.3).  |
| Halbquerlüftung<br><i>Ventilation semi-transversale</i>                            | Lüftungsbetrieb mit längenverteilter Zuluft einblasung auf Strassenniveau. Die Luft strömt durch den Fahrraum ab (§3.4.3).  |
| Längslüftung<br><i>Ventilation longitudinale</i>                                   | Lüftungsbetrieb zur Frischlufteversorgung der Tunnelröhre durch den Fahrraum, in der Regel von Portal zu Portal.  |
| Lastwagen<br><i>Poids lourd</i>  | Bezeichnung des mittleren Fahrzeugs aus der Gruppe der schweren Nutzfahrzeuge zur Berechnung der Emissionen.  |
| Luftgeschwindigkeit<br><i>Vitesse de l'air</i>                                     | Geschwindigkeit der Längsströmung im Tunnelquerschnitt.   |
| Massgebender, stündlicher Verkehr (MSV)<br><i>Trafic horaire déterminant (THD)</i> | Stündlicher Verkehr pro Querschnitt, der während 30 Stunden im Jahr überschritten wird.   |
| Natürliche Lüftung<br><i>Ventilation naturelle</i>                                 | Frischlufteversorgung der Tunnelröhre durch die Wirkung des Verkehrs und durch Portal-druckdifferenzen.   |
| Personenwagen<br><i>Voiture de tourisme</i>  | Bezeichnung des mittleren Fahrzeugs aus den Gruppen der Personenwagen und Lieferwagen zur Berechnung der Emissionen.  |
| Querlüftung<br><i>Ventilation transversale</i>                                     | Lüftungsbetrieb, bei dem gleichzeitig und längenverteilt Zuluft und Ablufte gefahren wird (§3.4.3).   |
| Querschlag<br><i>Galerie transversale</i>  | Begehbare und teilweise befahrbare Verbindung zwischen zwei Tunnelröhren.   |
| Rezirkulation<br><i>Recirculation</i>  | Rückführung von befrachteter Luft in die zweite Tunnelröhre.  |
| Selbstrettungsphase<br><i>Auto-sauvetage (phase d')</i>                            | Zeitspanne vom Ereignis bis zum Eintreffen der Rettungsmannschaft.  |
| Sichttrübe<br><i>Matière opacifiante</i>   | Summe aller Stoffe, welche die Sichttrübung bewirkt.  |
| Sichttrübung<br><i>Opacité</i>   | Trübung der Sicht durch feine Partikel oder Rauch.  |
| Tunnelabschnitt<br><i>Tronçon de tunnel</i>  | Abschnitt des Tunnels mit gleichen geometrischen Dimensionen.   |
| Tunnelquerschnitt<br><i>Section du tunnel</i>                                      | Aerodynamischer Gesamtquerschnitt des Fahrraums.  |
| Zuluft<br><i>Apport d'air frais, air entrant</i>                                   | Aussenluft, die kontrolliert in den Tunnelfahrraum eingeblasen wird.  |

## II RICHTWERTE ZUR VERKEHRSPROGNOSE

Die erforderlichen Verkehrsdaten sind in den §5.2 und §7.1.1 beschrieben.

Sind in frühen Projektierungsphasen die Verkehrsdaten noch nicht vollständig verfügbar, können ausschliesslich für die Dimensionierung der Lüftung die in diesem Anhang angeführten Richtwerte verwendet werden. Für spätere Phasen müssen Daten aus detaillierten Verkehrsuntersuchungen vorliegen.

### II.1 Verkehrsentwicklung

Für eine Abschätzung der Entwicklung des Gesamtverkehrs kann die mittlere jährliche Zuwachsrate von 1.5 % verwendet werden. Der Lastwagenanteil am Gesamtverkehr kann als gleich bleibend angenommen werden.

### II.2 Massgebender stündlicher Verkehr

Zur Ermittlung des massgebenden stündlichen Verkehrs kann die folgende Zuordnung verwendet werden.

| Verkehrscharakter                      | Typ | Klasse   | MSV in % des DTV |
|--|-----|----------|------------------|
| Fernverkehr                            | 1   | Klasse 1 | 11               |
| Fernverkehr mit Pendlerverkehr         | 2   |          |                  |
| Pendlerverkehr                         | 3   |          |                  |
| Ortsverkehr                            | 4   |          |                  |
| Regionalverkehr                        | 5   | Klasse 2 | 14               |
| Freizeitverkehr                        | 6   | Klasse 3 | 16               |
| Touristikverkehr* (zusätzlich zu [15]) | 7   | Klasse 4 | 18               |

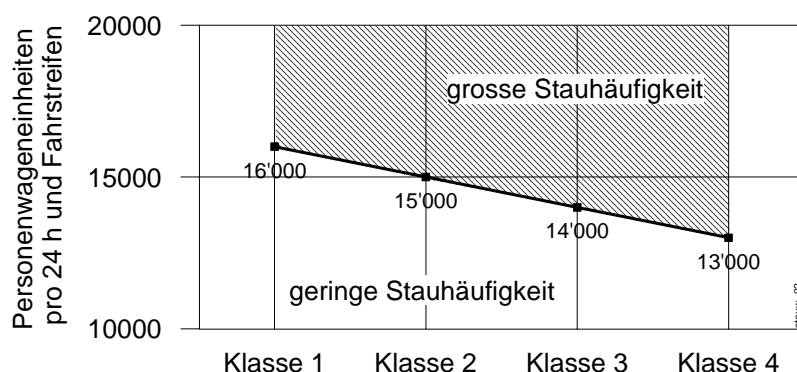
\* von und zu Ferienorten

**Abb. 29 :** Zuordnung der Fahrzwecke zu Typen und Klassen nach [15, Ziffer 5] und massgebender stündlicher Verkehr je nach Fahrzweck. Die Angabe des MSV beruht auf den Angaben in [15] für die Mittelwerte der 30. Stunde.

Als Anteil der Lastwagen am MSV kann 75 % des Anteils der Lastwagen am DTV verwendet werden.

### II.3 Stauhäufigkeit

Bei Tunneln mit Richtungsverkehr wird aufgrund der Stauproggnose unterschieden zwischen Situationen mit geringer und mit grosser Stauhäufigkeit (§6.1). Als Richtwerte gelten die Angaben in Abbildung 30.



**Abb. 30 :** Tunnel mit Richtungsverkehr: Zuordnung zu grosser bzw. geringer Stauhäufigkeit bei fehlender Stauproggnose, abgeleitet nach [14]. PWE bezieht sich auf den DTV und den mittleren LW-Anteil. Die Klassen beziehen sich auf die Fahrzwecke gemäss Abbildung 29. Mit Verflechtungen der Fahrstreifen im oder nahe dem Tunnel kann die Bereichsgrenze bis 20 % tiefer liegen. 1 LW  $\approx$  2 PWE.

### III EMISSIONSBERECHNUNG

#### III.1 Grundlagen

In Ergänzung zu den §7.1.3 und 7.1.4 sind im Folgenden die Grundlagen für die Berechnung der mittleren Emissionen von Kohlenmonoxid CO und Sichttrübe der Fahrzeugkategorien Personenwagen (PW) und Lastwagen (LW) angeführt. Die Emissionswerte, die für die Dimensionierung der Tunnellüftungsanlagen gelten, basieren auf den Angaben nach AIPCR [5] und repräsentieren einen Mittelwerte aus einer grossen Anzahl von Fahrzeugen. Die Emissionen individueller Fahrzeuge können stark von diesen Mittelwerten abweichen.

In der Vergangenheit unterschieden sich die Emissionswerte der in umliegenden Ländern immatrikulierten Fahrzeuge zum Teil stark. Mit den Euro-Normen gleichen sich diese Unterschiede jedoch mehr und mehr an, so dass unabhängig von ihrer Herkunft und mit ausreichender Genauigkeit die hier angegebenen Werte für die drei Fahrzeugkategorien PW mit Benzinmotor, PW mit Dieselmotor und LW verwendet werden können. Zu beachten ist der länderspezifisch unterschiedliche Anteil der PW mit Dieselmotoren (Abb. 31).

#### III.2 Emissionen der Personenwagen

##### III.2.1 Grundgleichungen

Die Emission eines durchschnittlichen Personenwagens mit Benzinmotor  $e_{PW,B}$  ist:

$$e_{PW,B} = (e_0 \cdot f_z \cdot f_H)_{PW,B} + q_{ar,PW} \tag{Gl. III-1}$$

Die Emission eines durchschnittlichen Personenwagens mit Dieselmotor  $e_{PW,D}$  ist:

$$e_{PW,D} = (e_0 \cdot f_z \cdot f_H)_{PW,D} + q_{ar,PW} \tag{Gl. III-2}$$

Die Emission eines durchschnittlichen Personenwagens  $e_{PW}$  ergibt sich damit gemäss:

$$e_{PW} = (1 - a_{PW,D}) \cdot e_{PW,B} + a_{PW,D} \cdot e_{PW,D} \tag{Gl. III-3}$$

Für CO ist  $e_{PW} = e_{PW,CO}$  und für Sichttrübe ist  $e_{PW} = e_{PW,T}$ .

$e_0$  Basiswert der motorischen Emissionen je Schadstoffkomponente in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit und der Längsneigung getrennt nach  $PW_B$  und  $PW_D$  in  $m^3CO/(h,Fz)$  resp.  $m^2/(h,Fz)$  auf 0 m ü.M. im Bezugsjahr 2010

$f_z$  Zeitfaktor je Schadstoffkomponente getrennt nach  $PW_B$  und  $PW_D$

$f_H$  Höhenfaktor je Schadstoffkomponente getrennt nach  $PW_B$  und  $PW_D$

$q_{AR,PW}$  Nicht-motorische Sichttrübe-Emission in  $m^2/(h,Fz)$  aus Abrieb und Aufwirbelung

$a_{PW,D}$  Anteil der PW mit Dieselmotor am PW-Verkehr

$e_{PW,CO}$  CO-Emission des mittleren PW in  $m^3CO/(h,Fz)$

$e_{PW,T}$  Sichttrübe-Emission des mittleren PW in  $m^2/(h,Fz)$

Sofern keine projektbezogenen Angaben zum Anteil der  $PW_D$  gegeben sind, sind die Werte in Abbildung 31 (aus [16]) zu verwenden. Die Werte für die Schweiz enthalten einen durchschnittlichen Anteil ausländischer Fahrzeuge. In grenznahen Gebieten und für Transitstrecken sind die Werte anzupassen.

| Jahr        | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Schweiz     | 6.2  | 6.9  | 8.6  | 16.6 | 27   | 34   | 38   | 40   |
| Deutschland | 18.0 | 18.3 | 18.9 | 27.4 | 36   | 42   | 43   | 44   |
| Österreich  | 20.1 | 36.3 | 58.1 | 71.2 | 77   | 79   | 80   | 80   |

Abb. 31 : Anteil der PW mit Dieselmotor  $a_{PW,D}$  in % am durchschnittlichen PW-Verkehr.

### III.2.2 CO-Emission der PW mit Benzinmotor

| $v_{Fz}$<br>[km/h] | Längsneigung |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | - 6 %        | - 4 % | - 2 % | 0 %   | 2 %   | 4 %   | 6 %   |
| 0                  | 0.004        | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.004 |
| 5                  | 0.011        | 0.015 | 0.020 | 0.024 | 0.029 | 0.034 | 0.039 |
| 10                 | 0.011        | 0.015 | 0.019 | 0.023 | 0.028 | 0.032 | 0.038 |
| 20                 | 0.010        | 0.014 | 0.017 | 0.021 | 0.024 | 0.031 | 0.040 |
| 30                 | 0.010        | 0.013 | 0.017 | 0.020 | 0.023 | 0.032 | 0.044 |
| 40                 | 0.010        | 0.014 | 0.017 | 0.020 | 0.025 | 0.037 | 0.056 |
| 50                 | 0.011        | 0.014 | 0.018 | 0.021 | 0.028 | 0.045 | 0.070 |
| 60                 | 0.011        | 0.014 | 0.018 | 0.022 | 0.033 | 0.070 | 0.105 |
| 70                 | 0.011        | 0.014 | 0.018 | 0.022 | 0.053 | 0.112 | 0.159 |
| 80                 | 0.011        | 0.015 | 0.020 | 0.025 | 0.090 | 0.161 | 0.233 |
| 90                 | 0.014        | 0.019 | 0.026 | 0.035 | 0.137 | 0.240 | 0.385 |
| 100                | 0.018        | 0.026 | 0.038 | 0.054 | 0.222 | 0.397 | 0.673 |
| 110                | 0.026        | 0.040 | 0.060 | 0.089 | 0.374 | 0.707 | 1.253 |
| 120                | 0.041        | 0.064 | 0.100 | 0.154 | 0.626 | 1.060 | 1.911 |

Abb. 32 : CO-Basisemission  $e_0$  der  $PW_B$  in  $m^3/(h,Fz)$ .

| Jahr  | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $f_z$ | 15.4 | 6.50 | 2.67 | 1.32 | 1.00 | 0.81 | 0.76 | 0.75 |

Abb. 33 : Zeitfaktor  $f_z$  für die CO-Emission der  $PW_B$ .

| Höhe in m ü.M. | 0   | 400 | 700 | 1000 | 2000 | 3000 |
|----------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| $f_H$          | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 2.6  | 11.4 | 13.0 |

Abb. 34 : Höhenfaktor  $f_H$  für die CO-Emission der  $PW_B$ .

Für CO ist  $q_{AR,PW} = 0$ .

Die Vorbelastung mit CO in der freien Umgebung kann vernachlässigt werden.

### III.2.3 Sichttrübe-Emission der PW mit Benzinmotor

Die motorische Sichttrübe-Emission bei  $PW_B$  ist vernachlässigbar,  $e_0 = 0$ .

Der Beitrag der nicht-motorischen Sichttrübe-Emission aus Abrieb und Aufwirbelung,  $q_{AR,PW}$ , ist von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Die Werte sind für  $PW_B$  und  $PW_D$  gleich und bleiben über die Zeit konstant.

|                                 |     |      |     |     |     |     |      |
|---------------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|
| $v_{Fz}$ [km/h]                 | 0   | 5    | 10  | 20  | 30  | 40  | 50   |
| $q_{AR,PW}$<br>[ $m^2/(h,Fz)$ ] | 0   | 0.45 | 0.9 | 1.8 | 2.7 | 3.6 | 4.5  |
|                                 | 60  | 70   | 80  | 90  | 100 | 110 | 120  |
|                                 | 5.4 | 6.3  | 7.2 | 8.1 | 9.0 | 9.9 | 10.8 |

Abb. 35 : Nicht-motorische Sichttrübe-Emission der PW  $q_{AR,PW}$  in  $m^2/(h,Fz)$ .

**III.2.4 CO-Emission der PW mit Dieselmotor**

| $V_{Fz}$<br>[km/h] | Längsneigung |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | - 6 %        | - 4 % | - 2 % | 0 %   | 2 %   | 4 %   | 6 %   |
| 0                  | 0.001        | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 5                  | 0.004        | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.005 | 0.006 | 0.007 |
| 10                 | 0.005        | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.007 | 0.008 | 0.010 |
| 20                 | 0.008        | 0.008 | 0.008 | 0.009 | 0.010 | 0.012 | 0.014 |
| 30                 | 0.010        | 0.010 | 0.010 | 0.011 | 0.013 | 0.014 | 0.018 |
| 40                 | 0.010        | 0.010 | 0.011 | 0.011 | 0.013 | 0.015 | 0.018 |
| 50                 | 0.010        | 0.010 | 0.011 | 0.011 | 0.013 | 0.015 | 0.019 |
| 60                 | 0.009        | 0.009 | 0.010 | 0.010 | 0.012 | 0.014 | 0.019 |
| 70                 | 0.009        | 0.009 | 0.009 | 0.010 | 0.011 | 0.014 | 0.020 |
| 80                 | 0.009        | 0.009 | 0.009 | 0.010 | 0.011 | 0.015 | 0.022 |
| 90                 | 0.010        | 0.010 | 0.011 | 0.011 | 0.013 | 0.018 | 0.026 |
| 100                | 0.012        | 0.012 | 0.013 | 0.013 | 0.015 | 0.022 | 0.030 |
| 110                | 0.014        | 0.014 | 0.015 | 0.016 | 0.018 | 0.026 | 0.036 |
| 120                | 0.017        | 0.017 | 0.018 | 0.019 | 0.022 | 0.031 | 0.043 |

Abb. 36 : CO-Basisemission  $e_0$  der  $PW_D$  in  $m^3/(h,Fz)$ .

| Jahr  | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $f_z$ | 3.47 | 2.38 | 1.60 | 1.18 | 1.00 | 0.94 | 0.92 | 0.92 |

Abb. 37 : Zeitfaktor  $f_z$  für die CO-Emission der  $PW_D$ .

| Höhe in m ü.M. [m] | 0    | 400  | 700  | 1000 | 2000 | 3000 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| $f_H$              | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.21 | 1.50 | 1.81 |

Abb. 38 : Höhenfaktor  $f_H$  für die CO-Emission der  $PW_D$ .

Für CO ist  $q_{AR,PW} = 0$ .

Die Vorbelastung mit CO in der Aussenluft kann vernachlässigt werden.

### III.2.5 Sichttrübe-Emission der PW mit Dieselmotor

| $v_{Fz}$<br>[km/h] | Längsneigung |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | - 6 %        | - 4 % | - 2 % | 0 %   | 2 %   | 4 %   | 6 %   |
| 0                  | 1.10         | 1.10  | 1.10  | 1.10  | 1.10  | 1.10  | 1.10  |
| 5                  | 1.34         | 1.37  | 1.41  | 1.43  | 1.56  | 1.74  | 2.04  |
| 10                 | 1.53         | 1.57  | 1.61  | 1.65  | 1.91  | 2.27  | 2.88  |
| 20                 | 1.88         | 1.95  | 2.03  | 2.11  | 2.59  | 3.31  | 4.54  |
| 30                 | 2.42         | 2.54  | 2.66  | 2.80  | 3.56  | 4.78  | 6.85  |
| 40                 | 3.32         | 3.50  | 3.69  | 3.90  | 5.12  | 7.20  | 10.59 |
| 50                 | 4.18         | 4.45  | 4.73  | 5.06  | 6.77  | 10.39 | 15.56 |
| 60                 | 4.79         | 5.24  | 5.65  | 6.13  | 8.34  | 11.44 | 17.29 |
| 70                 | 4.32         | 4.80  | 5.25  | 5.78  | 7.94  | 9.99  | 15.24 |
| 80                 | 3.31         | 3.78  | 4.27  | 4.84  | 6.75  | 9.64  | 14.87 |
| 90                 | 4.79         | 5.47  | 6.18  | 7.01  | 9.86  | 14.62 | 22.69 |
| 100                | 7.16         | 8.19  | 9.25  | 10.49 | 14.84 | 22.05 | 34.32 |
| 110                | 9.96         | 11.39 | 12.86 | 14.58 | 20.72 | 31.37 | 48.87 |
| 120                | 12.99        | 14.86 | 16.79 | 19.01 | 27.11 | 41.02 | 63.90 |

Abb. 39 : Motorische Sichttrübe-Basisemission  $e_0$  der  $PW_D$  in  $m^2/(h,Fz)$ .

| Jahr  | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $f_z$ | 7.50 | 5.09 | 3.23 | 1.94 | 1.00 | 0.60 | 0.48 | 0.47 |

Abb. 40 : Zeitfaktor  $f_z$  für die motorische Sichttrübe-Basisemission der  $PW_D$ .

| Höhe in m ü.M. | 0    | 400  | 700  | 1000 | 2000 | 3000 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|
| $f_H$          | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.25 | 1.50 |

Abb. 41 : Höhenfaktor  $f_H$  für die Sichttrübe-Emission der  $PW_D$ .

Die nicht-motorische Sichttrübe-Emission aus Abrieb und Aufwirbelung,  $q_{AR,PW}$ , ist für PW mit Dieselmotor gleich wie für PW mit Benzinmotor. Die Werte sind der Abbildung 35 zu entnehmen.

### III.3 Emissionen der Lastwagen

#### III.3.1 Grundgleichungen

Die Emission eines Lastwagens  $e_{LW}$  ist zu berechnen nach:

$$e_{LW} = e_0 \cdot f_z \cdot f_H \cdot f_M + q_{AR,LW}$$

Gl. III-4

Für CO ist  $e_{LW} = e_{LW,CO}$ , und für Sichttrübe ist  $e_{LW} = e_{LW,T}$ .

$e_0$  Basiswert der motorischen Emissionen in  $m^3CO/(h,Fz)$  resp.  $m^2/(h,Fz)$  je Schadstoffkomponente in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Längsneigung auf 0 m ü.M. bei einer Fahrzeugmasse von 10 t im Bezugsjahr 2010

$f_z$  Zeitfaktor je Schadstoffkomponente

$f_H$  Höhenfaktor je Schadstoffkomponente

$f_M$  Massenfaktor je Schadstoffkomponente

$q_{AR,LW}$  Nicht-motorische Sichttrübe-Emission in  $m^2/(h,Fz)$  aus Abrieb und Aufwirbelung

$e_{LW,CO}$  CO-Emission eines LW in  $m^3CO/(h,Fz)$

$e_{LW,T}$  Sichttrübe-Emission eines LW in  $m^2/(h,Fz)$

### III.3.2 CO-Emission der LW

| $v_{Fz}$<br>[km/h] | Längsneigung |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | - 6 %        | - 4 % | - 2 % | 0 %   | 2 %   | 4 %   | 6 %   |
| 0                  | 0.009        | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| 5                  | 0.010        | 0.011 | 0.011 | 0.013 | 0.013 | 0.015 | 0.016 |
| 10                 | 0.011        | 0.012 | 0.012 | 0.014 | 0.015 | 0.017 | 0.020 |
| 20                 | 0.014        | 0.014 | 0.014 | 0.016 | 0.019 | 0.024 | 0.029 |
| 30                 | 0.015        | 0.016 | 0.017 | 0.019 | 0.024 | 0.030 | 0.038 |
| 40                 | 0.016        | 0.017 | 0.018 | 0.021 | 0.028 | 0.035 | 0.045 |
| 50                 | 0.016        | 0.018 | 0.020 | 0.023 | 0.031 | 0.040 | 0.053 |
| 60                 | 0.017        | 0.019 | 0.021 | 0.025 | 0.035 | 0.046 | 0.061 |
| 70                 | 0.017        | 0.021 | 0.023 | 0.027 | 0.039 | 0.052 | 0.061 |
| 80                 |              | 0.024 | 0.026 | 0.031 | 0.046 | 0.052 |       |
| 90                 |              | 0.024 | 0.032 | 0.038 | 0.057 |       |       |
| 100                |              |       | 0.040 | 0.047 | 0.057 |       |       |

Abb. 42 : CO-Basisemission  $e_0$  der LW in  $m^3/(h,Fz)$ .

| Jahr  | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $f_z$ | 8.68 | 6.15 | 3.67 | 1.93 | 1.00 | 0.79 | 0.74 | 0.73 |

Abb. 43 : Zeitfaktor  $f_z$  für die CO-Basisemission der LW.

| Höhe in m ü.M. | 0    | 400  | 700  | 1000 | 2000 | 3000 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|
| $f_H$          | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.35 | 2.75 | 4.00 |

Abb. 44 : Höhenfaktor  $f_H$  für die CO-Emission der LW.

Für CO ist  $q_{AR,LW} = 0$ .

Die Vorbelastung mit CO in der Aussenluft kann vernachlässigt werden.

| Masse<br>[t] | $v_{Fz}$ [km/h] |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|              | 0               | 5   | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 |
| 10           | 1.0             | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 20           | 1.4             | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.3 |
| 30           | 1.4             | 1.7 | 2.1 | 2.6 | 2.6 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.8 | 2.8 |

Abb. 45 : Massfaktor  $f_M$  für die CO-Emission der LW.

### III.3.3 Sichttrübe-Emission der LW

| $v_{Fz}$<br>[km/h] | Längsneigung |       |       |      |      |      |      |
|--------------------|--------------|-------|-------|------|------|------|------|
|                    | - 6 %        | - 4 % | - 2 % | 0 %  | 2 %  | 4 %  | 6 %  |
| 0                  | 5.2          | 5.2   | 5.2   | 5.2  | 5.2  | 5.2  | 5.2  |
| 5                  | 5.8          | 5.8   | 5.8   | 7.2  | 7.7  | 8.4  | 9.2  |
| 10                 | 6.2          | 6.3   | 6.3   | 7.7  | 8.8  | 10.1 | 11.7 |
| 20                 | 7.1          | 7.2   | 7.4   | 9.1  | 11.1 | 13.7 | 16.8 |
| 30                 | 7.8          | 8.2   | 8.6   | 10.6 | 13.6 | 17.2 | 21.6 |
| 40                 | 8.2          | 8.9   | 9.6   | 12.2 | 15.9 | 20.7 | 26.4 |
| 50                 | 8.6          | 9.5   | 10.5  | 13.4 | 18.2 | 24.2 | 31.2 |
| 60                 | 8.9          | 10.2  | 11.4  | 14.9 | 20.8 | 28.1 | 36.6 |
| 70                 | 8.9          | 11.2  | 12.5  | 16.3 | 23.4 | 32.1 | 36.6 |
| 80                 |              | 12.8  | 14.4  | 18.6 | 27.7 | 32.1 |      |
| 90                 |              | 12.8  | 16.9  | 21.6 | 33.7 | 32.1 |      |
| 100                |              |       | 20.3  | 25.1 | 33.7 |      |      |

Abb. 46 : Motorische Sichttrübe-Basisemission  $e_0$  der LW in  $m^2/(h,Fz)$ .

| Jahr  | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $f_z$ | 9.74 | 7.60 | 4.46 | 2.31 | 1.00 | 0.63 | 0.53 | 0.51 |

Abb. 47 : Zeitfaktor  $f_z$  für die motorische Sichttrübe-Emission der LW.

| Höhe in m ü.M. | 0    | 400  | 700  | 1000 | 2000 | 3000 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|
| $f_H$          | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.12 | 1.69 | 2.26 |

Abb. 48 : Höhenfaktor  $f_H$  für die motorische Sichttrübe-Emission der LW.

| Masse<br>[t] | $v_{Fz}$ [km/h] |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|              | 0               | 5   | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 |     |
| 10           | 1.0             | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 20           | 1.9             | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| 30           | 2.3             | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.6 | 2.6 | 2.6 | 2.6 | 2.6 |

Abb. 49 : Massefaktor  $f_M$  für die motorische Sichttrübe-Emission der LW.

Die nicht-motorische Sichttrübe-Emission aus Abrieb und Aufwirbelung,  $q_{AR,LW}$ , ist von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig. Die Werte bleiben über die Zeit konstant.

| $v_{Fz}$ [km/h]                 | 0 | 5   | 10  | 20  | 30   | 40   | 50   |
|---------------------------------|---|-----|-----|-----|------|------|------|
| $q_{AR,LW}$<br>[ $m^2/(h,Fz)$ ] | 0 | 2.3 | 4.5 | 9.0 | 13.5 | 18.0 | 22.5 |

|  | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  |
|--|------|------|------|------|------|
|  | 27.0 | 31.5 | 36.0 | 40.5 | 45.0 |

Abb. 50 : Nicht-motorische Sichttrübe-Emission der LW  $q_{AR,LW}$  in  $m^2/(h,Fz)$ .

### III.4 Zeitliche Entwicklung der Basisemissionen

Die Abbildungen 51 bis 54 zeigen die zeitliche Entwicklung der CO- und der gesamten Sichttrübe-Emissionen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h bei ebener Fahrbahn auf einer Höhe bis 700 m ü.M. Die Werte in den Abbildungen 51 bis 54 sind informativ. Für die Berechnungen sind die Werte in den Abbildungen 31 bis 50 zu verwenden.

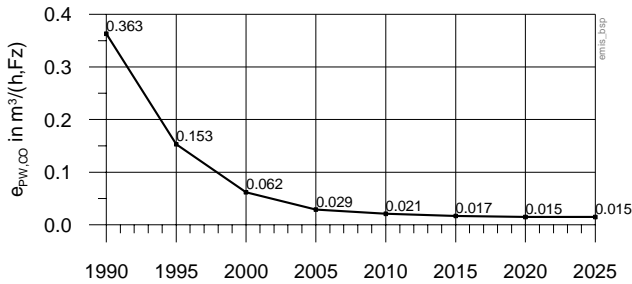


Abb. 51 : Entwicklung der CO-Emission eines mittleren PW.

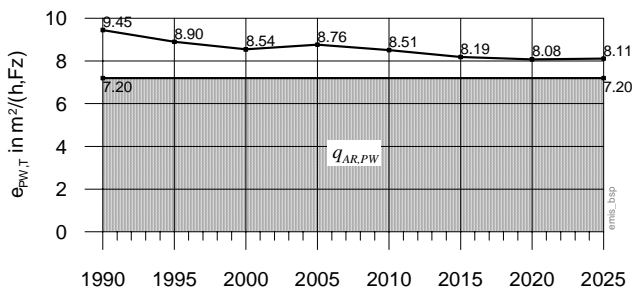


Abb. 52 : Entwicklung der Sichttrübe-Emission eines mittleren PW.

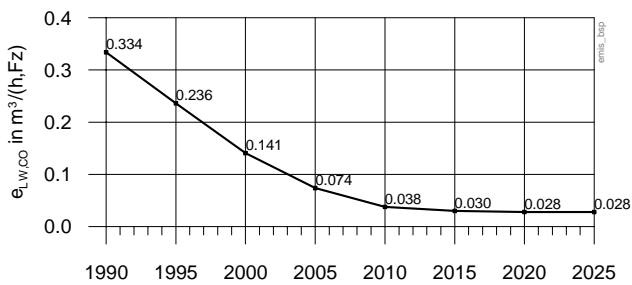


Abb. 53 : Entwicklung der CO-Emission eines LW mit 18t.

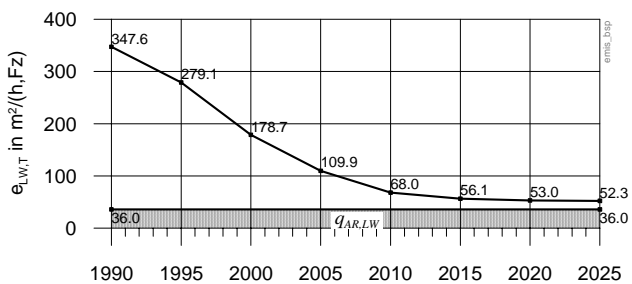


Abb. 54 : Entwicklung der Sichttrübe-Emission eines LW mit 18t.

## IV STRAHLVENTILATOREN

### IV.1 Allgemeines

Bei der Festlegung des Ventilortyps sind die Platzverhältnisse im Tunnel sowie weitere Einflussgrößen wie Kabellängen, Wartung, vorhandene Ventilatoren zu berücksichtigen.

Die Bestimmung der Anzahl Strahlventilatoren  $n_{SV}$  erfolgt nach:

$$n_{SV} = \frac{\Delta p_{erf}}{\Delta p_{SV}} \quad \text{Gl. IV-1}$$

mit

$$\Delta p_{SV} = \frac{\rho_L \cdot (v_{Str} - v_L) \cdot Q_{SV} \cdot \eta_E \cdot \eta_{Schub}}{A_{Tunnel}} = \frac{Schub}{A_{Tunnel}} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Gl. IV-2}$$

- $\Delta p_{erf}$  Erforderlicher Druck in Pa zur Erreichung der geforderten Längsströmung  $v_L$
- $\Delta p_{SV}$  Von 1 Strahlventilator erzeugte Druckdifferenz in Pa
- $\rho_L$  Dichte der Luft in  $\text{kg/m}^3$
- $v_{Str}$  Strahlgeschwindigkeit nach dem Ventilator in m/s
- $v_L$  Mittlere Luftgeschwindigkeit im Fahrraum in m/s
- $Q_{SV}$  Volumenstrom durch den Strahlventilator in  $\text{m}^3/\text{s}$
- $\eta_E$  Einbauwirkungsgrad
- $\eta_{Schub}$  Schubwirkungsgrad (=  $Standschub / (\rho_L \cdot v_{Str} \cdot Q_{SV})$ )
- $A_{Tunnel}$  Querschnitt des Tunnelfahrtraums in  $\text{m}^2$

### IV.2 Ventilatordaten

Für eine Abschätzung der erforderlichen Anzahl Strahlventilatoren können die folgenden typischen Kenndaten von Strahlventilatoren verwendet werden. Die tatsächlichen Werte variieren je nach Hersteller. Die definitive Anzahl der Strahlventilatoren muss daher immer aufgrund der gültigen Herstellerangaben bestimmt werden.

| Laufrad-<br>durchmesser<br>[mm] | $v_{Str}$<br>[m/s] | $Q_{SV}$<br>[ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | $\Delta p_{SV}$ in [Pa]    |                         |                         |
|---------------------------------|--------------------|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                 |                    |                                       | $v_L = -3.0 \text{ m/s}^*$ | $v_L = 1.5 \text{ m/s}$ | $v_L = 3.0 \text{ m/s}$ |
| 630                             | 40                 | 12                                    | 8.8                        | 7.9                     | 7.5                     |
| 1'000                           | 33                 | 23                                    | 14.1                       | 12.3                    | 11.7                    |
| 1'250                           | 33                 | 40                                    | 24.5                       | 21.4                    | 20.4                    |

\* Blasrichtung der Ventilatoren entgegen der Strömungsrichtung im Fahrraum von Tunneln mit grosser Längsneigung zum Abbremsen der Strömung bei Lüftungssystemen mit Absaugung.

Abb. 55 : Typische Kenndaten von ausgewählten Strahlventilatoren:

$\Delta p_{SV}$  gültig bei  $\rho_L = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $A_{Tunnel} = 60 \text{ m}^2$  und  $\eta_E \cdot \eta_{Schub} = 0.85$ .

### IV.3 Anordnung

Die Anordnung der Strahlventilatoren muss mit der Lage von in den Tunnelquerschnitt hineinragenden Elementen und der Lage von Notausgängen abgestimmt werden. In Längsrichtung ist von einem Mindestabstand zwischen Strahlventilatoren von 100 m sowie zwischen Strahlventilatoren und Tunnelportal von 80 m auszugehen. Falls eine Ventilatorgruppe ausschliesslich tunneleinwärts betrieben wird, kann deren Abstand zum Portal bis auf 10 m reduziert werden. Über den Fahrstreifen montierte Ventilatoren müssen einen freien Abstand vom Lichtraumprofil von 30 cm aufweisen. Der Deckenabstand des Gehäuses von Strahlventilatoren soll mindestens 30 cm betragen. Seitlich neben dem Lichtraumprofil angeordnete Strahlventilatoren sind bei neuen Anlagen zu vermeiden. Falls bei einer Nachrüstung einer bestehenden Anlage nur eine seitliche Anordnung möglich ist, muss der Abstand vom Lichtraumprofil mindestens 60 cm betragen.

### IV.4 Normalbetrieb

Die Auslegung der Strahlventilatoren für den Normalbetrieb erfolgt nach §7.1.

### IV.5 Betrieb im Ereignisfall

Die massgebenden Bedingungen zur Dimensionierung der Strahlventilatoren zur Beherrschung eines Ereignisfalles sind in §7.2 für die verschiedenen Verkehrsarten aufgeführt.

Für eine erste Abschätzung der erforderlichen Anzahl Strahlventilatoren können die Angaben in Abbildung 56 zum erforderlichen Druck der Strahlventilatoren zur Erreichung der geforderten Längsströmung im Ereignisfall verwendet werden. Die entsprechende Zahl der Strahlventilatoren ergibt sich zusammen mit Abbildung 55.

Die Angaben gelten ausschliesslich für die folgenden Parameter:

- Tunnel mit Längslüftung ohne Absaugung
- 2-streifige Tunnelröhren mit Fahrraumquerschnitt von 60 m<sup>2</sup> und hydraulischem Durchmesser D<sub>h</sub> von 8.5 m
- Konstante Längsneigung über die ganze Tunnellänge
- Verkehrsdaten je nach Verkehrsfall (vgl. Abb. 29)  
 Richtungsverkehr RV 1: MSV = 3'300 Fz/(h,2FS), LW-Anteil am MSV = 7.5 %  
 Richtungsverkehr RV 2: Stau auf 3/4 der Tunnellänge bei LW-Anteil = 7.5 %  
 Gegenverkehr GV: MSV = 1'100 Fz/(h,FS), LW-Anteil = 7.5 %
- Winddruck von 5 Pa entgegen der Strömung
- Ungünstige natürliche Temperaturdifferenz zwischen Fahrraum und Umgebung von 10 K

| Längsneigung<br>[%] | Tunnellänge     |                 |                 |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                     | 1'000 m<br>[Pa] | 1'500 m<br>[Pa] | 3'000 m<br>[Pa] |
| + 5                 | 64              | 81              | 130             |
| + 3                 | 56              | 69              | 106             |
| + 1                 | 48              | 58              | 83              |
| 0                   | 44              | 51              | 72              |
| - 1                 | 55              | 74              | 99              |
| - 3                 | 95              | 120             | 158             |
| - 5                 | 136             | 165             | 218             |

Tunnel mit Richtungsverkehr und geringer Stauhäufigkeit (RV 1)

| Längsneigung<br>[%] | Tunnellänge     |                 |
|---------------------|-----------------|-----------------|
|                     | 1'000 m<br>[Pa] | 1'500 m<br>[Pa] |
| + 5                 | 68              | 95              |
| + 3                 | 59              | 82              |
| + 1                 | 51              | 69              |
| 0                   | 46              | 62              |
| - 1                 | 68              | 87              |
| - 3                 | 112             | 135             |
| - 5                 | 156             | 183             |

Tunnel mit Richtungsverkehr mit grosser Stauhäufigkeit (RV 2)

| Längsneigung<br>[%] | Tunnellänge     |                 |
|---------------------|-----------------|-----------------|
|                     | 1'000 m<br>[Pa] | 1'500 m<br>[Pa] |
| 0                   | 14              | 16              |
| 1                   | 33              | 38              |
| 3                   | 70              | 83              |
| 5                   | 106             | 128             |

Tunnel mit Gegenverkehr (GV)

**Abb. 56** : Erforderlicher Druck der Strahlventilatoren  $\Delta p_{\text{erf}}$  in Pa. Die Angaben sind nur gültig für die oben angegebenen Grundlagedaten.

## V HINWEISE ZU KOMPONENTEN (CHECKLISTE)

| Komponente  | Anforderungen  | Hinweise   |
|---|--|--|
| Zu- und Abluftventilatoren (Ventilator, Motor, Antrieb inkl. Lager) | Auslegung $Q/\Delta p$ für alle Betriebszustände mit Sicherheitsabstand zur Ablösegrenze | Ungünstigsten Betriebspunkt mit je $\pm 10\%$ auf $\Delta p$ und $Q$ sowie instationäres Anfahrverhalten berücksichtigen |
|   | Temperaturbeständigkeit  | evtl. Brandfall massgebend, siehe §8.3   |
|   | Zugänglichkeit für Wartung und Ersatz  |  |
|   | Lärmemissionen / Schalldämpfer   | Anforderungen LSV [10] resp. UVP beachten  |
|   | Temperaturüberwachung Motor  |  |
|   | Schwingungsüberwachung (Strömungsablösung)   | Strömungsablösungen möglichst weitgehend vermeiden   |
|   | Luftdichtheit der Anschlüsse   | Brandfall beachten   |
|   | Energie- und Steuerkabel hitzegeschützt  |  |
| Strahlventilatoren  | Sichere Anordnung, Abstände einhalten, Absturzsicherung                                  | Bei Anordnung in seitlichen Nischen Schutzmassnahmen treffen   |
|   | Lärmemissionen / Schalldämpfer   | Anforderungen LSV [10] resp. UVP beachten  |
|   | Schwingungsdämpfung  |  |
|   | Korrosionsschutz   |  |
| Zu- und Abluftkanäle  | Begehbarkeit   |  |
|   | Angemessene Luftdichtheit  | Leckage in Auslegung berücksichtigen, periodisch prüfen  |
|   | Wasserdichtheit untenliegender Kanäle  | Periodisch prüfen  |
|   | Aerodynamische Ausgestaltung, vor allem der Umlenkungen                                  |  |
|   | Zwischendecke: Statik und Temperaturfestigkeit   | Einbau von Abluftklappen beachten  |
| Zuluftöffnungen gegen Fahrraum                                      | Einstellbarkeit (nicht ferngesteuert)  |  |
|   | Zugänglichkeit   |  |

| Komponente                       | Anforderungen  | Hinweise   |
|----------------------------------|--|--|
| Abluftklappen                    | Stromlos in aktueller Stellung bleibend  |  |
|                                  | Grosse freie Öffnung unterteilen (Sicherheit)  | Max. freie Fläche ohne Unterteilung ca. 0.5 m <sup>2</sup>   |
|                                  | Luftdichtheit  | Besonders gute Dichtheit nicht erforderlich, Leckage aber in Auslegung berücksichtigen. Dichtheit periodisch prüfen (Evtl. automatisiert durch v-Messung im Kanal bei definierten Randbedingungen) |
|                                  | Stromversorgung sternförmig resp. redundant  |  |
|                                  | Antrieb und Elektrokabel hitzegeschützt  | z.B. im Zuluftkanal (siehe Kapitel 8)  |
|                                  | Automatisierte Funktionsprüfung  |  |
| Punktabsaugung bei Normalbetrieb | Max. punktuelle Absaugmenge = $10 \cdot A_{\text{Tunnel}}$ in m <sup>3</sup> /s                          | Sicherheit Motorradfahrer  |
|                                  | Max. Strömungsgeschwindigkeit an der Lichtraumprofilgrenze 5 m/s seitlich und 10 m/s oben                | Sicherheit Motorradfahrer  |
| Abschlussklappen                 | Alle Zu- und Abluftventilatoren mit Abschlussklappen   | Zustand überwachen   |
|                                  | Automatisierte Funktionsprüfung  |  |
| Aussenluftansaugung              | Effektive Luftgeschwindigkeit nicht zu gross   | max. ca. 2 m/s   |
|                                  | Schneerausfallraum   |  |
|                                  | Schutzgitter bei der Luftfassung   |  |
|                                  | Schalldämmung  | LSV [10] resp. UVP beachten  |
| Abluftkamin                      | Ausbreitungssituation beim Standort prüfen   | LRV [9] und LSV [10] resp. UVP beachten  |
|                                  | Austrittsgeschwindigkeit 7 – 15 m/s  | Teillastbetrieb beachten   |
|                                  | Bauhöhe mindestens 10 m über Terrain oder 3 m über Baumwipfel, für Brandabluft 3 m über Terrain genügend | LRV [9] bzw. UVP beachten  |

## VI ANGABEN ZUR OPTIMIERUNG DER AUSLEGUNG

### VI.1 Allgemeines

Die Investitions- und Betriebskosten bilden ein wesentliches Beurteilungskriterium für verschiedene Lösungen. Die diesbezüglichen Berechnungen können einheitlich nach den im Folgenden beschriebenen Regeln erfolgen.

Technische und insbesondere bauliche Investitionen sind langfristiger Natur. Es ist daher mittels Verzinsung und Diskontierung zu berücksichtigen, dass die Kosten einer Investition zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen. Dies erfolgt mit der Annuitätenmethode. Dabei werden die Investitionskosten durch Multiplikation mit dem Annuitätsfaktor in über die Nutzungszeit gleich bleibende jährliche Raten umgerechnet. Jährlich anfallende Kosten  $JK$  können direkt übernommen werden, wenn sie konstant sind. Andernfalls sind Mittelwerte über die Nutzungszeit zu berechnen. Generell ist mit Realwerten zu rechnen. Die vergleichbaren Gesamtkosten sind:

$$GK = KK + JK \quad \text{Gl. VI-1}$$

$GK$  Mittlere jährliche Gesamtkosten

$KK$  Mittlere jährliche Kapitalkosten

$JK$  Mittlere jährliche Kosten

Die aktuellen Randbedingungen für Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden vom Bundesamt für Strassen und vom Bundesamt für Energie periodisch publiziert. Nachfolgend werden die heute (1999) gültigen Randbedingungen genannt.

Allgemeine Hinweise zur Projektierung von Kunstbauten finden sich in der ASTRA-Richtlinie, *Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen*, [2].

### VI.2 Amortisation des Kapitaleinsatzes

Unter der Annahme nachschüssiger Zahlungen und eines gleich bleibenden Kapitalzinssatzes über die ganze Nutzungsdauer resp. Betrachtungsperiode gilt:

$$KK = IK_0 \cdot a = IK_0 \cdot \frac{(1+p)^n \cdot p}{(1+p)^n - 1} \quad \text{Gl. VI-2}$$

$KK$  Mittlere jährliche Kapitalkosten über  $n$  in Fr./a

$IK_0$  Investitionskosten (im Zeitpunkt 0) in Fr.

$a$  Annuitätsfaktor

$p$  Kalkulatorischer Kapital-Jahreszinssatz (Realzinssatz)

$n$  Nutzungsdauer resp. Betrachtungsperiode in Jahren

| $n$ in Jahren | 15    | 20    | 25    | 30    | 35    | 40    | 50    | 80    |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $a$           | 0.084 | 0.067 | 0.057 | 0.051 | 0.047 | 0.043 | 0.039 | 0.033 |

Abb. 57 : Annuitätsfaktoren bei  $p = 3\%$  (Beispiel, andere Werte nach Gl. VI-2).

### VI.3 Mittlere Kosten

Unter der Annahme konstanter jährlicher Teuerungsraten gilt:

$$JK = JK_1 \cdot m_K \quad \text{Gl. VI-3}$$

$JK$  Mittlere jährliche Kosten

$JK_1$  Kosten im ersten Jahr

$m_K$  Mittelwertfaktor für die Kosten

Die Mittelwertfaktoren können für jährlich gleichmässig ansteigende nachschüssige Zahlungen wie folgt berechnet werden:

$$m = \frac{1}{1+p} \cdot \frac{\left(\frac{1+t}{1+p}\right)^n - 1}{\left(\frac{1+t}{1+p}\right)^n - 1} \cdot \frac{p}{1 - \frac{1}{(1+p)^n}} \quad \text{Gl. VI-4}$$

Bei  $t = p$  gilt:

$$m = \frac{n}{1+t} \cdot \frac{t}{1 - \frac{1}{(1+t)^n}}$$

Gl. VI-5

- $m$  Mittelwertfaktor
- $t$  Jährliche Teuerung der Kosten
- $p$  kalkulatorischer Jahres-Zinssatz (Realzinssatz)
- $n$  Nutzungsdauer resp. Betrachtungsperiode in Jahren

| $n$ in Jahren | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40   | 50   | 80   |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $m$           | 1.14 | 1.19 | 1.24 | 1.29 | 1.35 | 1.40 | 1.50 | 1.79 |

Abb. 58 : Mittelwertfaktoren bei  $p = 3\%$  und  $t = 2\%$  (Bsp., andere Werte nach Gleichung VI-4 bzw. VI-5).

### VI.4 Nutzungsdauer resp. Betrachtungsperiode

Für allgemeine Wirtschaftlichkeitsberechnungen kann von den folgenden Nutzungsdauern ausgegangen werden:

- Elektronik 10 - 15 Jahre
- Elektrik und Mechanik 20 - 25 Jahre
- Bau 50 - 80 Jahre

Für detailliertere Wirtschaftlichkeitsberechnungen enthält die Abbildung 59 Beispiele zur Nutzungsdauer und zu den Unterhaltskosten verschiedener Komponenten.

|                       | Komponente                    | Nutzungsdauer<br>ND<br>[Jahre] | Unterhaltskosten<br>UK<br>[% von $IK_0$ ] |
|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------|---|
| Bau                   | Tunnelbau                     | 80                             | 1   |
|                       | Stahlbeton                    | 80                             | 1   |
|                       | Konventionelle Bauten         | 80                             | 1   |
| Luftdurchlässe        | Allgemein                     | 25                             | 4   |
|                       | Zuluft in Tunnel              | 25                             | 6   |
|                       | Abluft aus Tunnel             | 25                             | 8   |
| Lüftungskanäle        | Aus Metall                    | 40                             | 6   |
|                       | Zwischendecke in Stahlbeton   | 60                             | 6   |
|                       | andere Bauwerke in Stahlbeton | 80                             | 6   |
| Lüftungsklappen       | Abschlussklappen              | 25                             | 4   |
|                       | Ferngesteuerte Absaugklappen  | 25                             | 8   |
| Motoren               | Elektrisch                    | 20                             | 1   |
|                       | Diesel                        | 20                             | 4   |
| Schalldämpfer         |                               | 25                             | 1   |
| Umlenkbleche          |                               | 25                             | 1   |
| Ventilatoren          | Raumlüftung                   | 15                             | 4   |
|                       | Strahlventilatoren            | 20                             | 5   |
|                       | Axialventilatoren             | 30                             | 4   |
| Elektroinstallationen | Regelung                      | 10                             | 5   |
|                       | Messeinrichtung, Detektion    | 15                             | 5   |
|                       | Frequenzumformer              | 15                             | 2   |
|                       | Transformatoren               | 30                             | 2   |
|                       | Verkabelung                   | 25                             | 1   |

Abb. 59 : Beispiele für die Nutzungsdauer und die jährlichen Unterhaltskosten.

## VI.5 Kapitalzins und Teuerung

Für Wirtschaftlichkeitsberechnungen ist ein Realzinssatz von  $p = 3\%$  und eine Teuerung von  $t = 2\%$  anzunehmen.

## VI.6 Energiepreise

Die Energiepreise setzen sich zusammen aus einem Grundpreis und einem kalkulatorischen Zuschlag zur Berücksichtigung von externen Kosten. Für Wirtschaftlichkeitsrechnungen sind die Strompreise gemäss Abbildung 60 zu verwenden.

| Energieträger       | Grundpreis | Zuschlag  | Heutiger Gesamtpreis |
|---------------------|------------|-----------|----------------------|
| <b>Elektrizität</b> |            |           |                      |
| HT                  | 20 Rp./kWh | 5 Rp./kWh | 25 Rp./kWh           |
| NT                  | 10 Rp./kWh | 5 Rp./kWh | 15 Rp./kWh           |
| Mittel              | 15 Rp./kWh | 5 Rp./kWh | 20 Rp./kWh           |

Abb. 60 : Energiepreise mit kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen (Stand 2004).

Bei der Angabe von zu erwartenden Energiekosten sind die mutmasslichen Tarife des Energielieferanten zu verwenden. Dabei ist neben dem Arbeitspreis pro kWh auch der Leistungspreis pro kW zu berücksichtigen.

## VI.7 Erforderliche Angaben

Die Berechnungen zu den Investitions- und Betriebskosten müssen unter Verwendung der oben stehenden Grundlagen nachvollziehbar dargestellt werden. Es sind insbesondere die folgenden Angaben erforderlich:

### Investitionskosten

- Realzinssatz  $p$  und Nutzungsdauer  $n$
- Investitionskosten  $IK_0$  mit definiertem Preisstand
- Mittlere jährliche Kapitalkosten  $KK$

### Betriebs- und Unterhaltskosten

- Heutige Energiepreise (Grundpreis, Zuschlag)
- Realzinssatz  $p$ , Teuerung  $t$  und Nutzungsdauer  $n$
- Kosten  $JK_1$  im ersten Betriebsjahr
- Mittlere jährliche Betriebs- und Unterhaltskosten  $JK$

## VII PRÄZISIERUNGEN VOM 31. JULI 2006

### VII.1 Geltungsbereich

#### VII.1.1 Zweck

Der vorliegende Anhang VII präzisiert einige Punkte in der Richtlinie *Lüftung der Strassentunnel - Ausgabe 2004*. Diese Präzisierungen haben zum Ziel, die Auslegung der Tunnellüftungen weiter zu vereinheitlichen und Unsicherheiten zu eliminieren.

#### VII.1.2 Gegenstand und Geltung

Die Präzisierungen im vorliegenden Anhang beziehen sich auf die Paragraphen in der Richtlinie *Lüftung der Strassentunnel - Ausgabe 2004* gemäss nachstehender Tabelle (Abb. 61).

Diese Präzisierungen sind bei der Anwendung der Richtlinie einzubeziehen.

| Präzisierungen (Anhang VII, 31. Juli 2006) | Richtlinie "Lüftung der Strassentunnel" - Ausgabe 2004  |
|--|---|
| §VII.2.1 Absaugmenge am Ereignisort        | §7.2.4.2 Absaugkapazität und Beeinflussung der Längsströmung  |
| §VII.2.2 Leckagemengen                     | §7.2.4.2 Absaugkapazität und Beeinflussung der Längsströmung  |
| §VII.2.3 Absaugmenge im Redundanzfall      | §7.2.7 Redundanzen  |
| §VII.2.4 Unterdruck im Abluftkanal         | In der Richtlinie nicht enthalten   |
| §VII.2.5 Natürlicher Auftrieb              | §7.1.5 Meteorologisch-thermische Einflüsse<br>§7.2.2 Druckwirkung durch Auftrieb und Portaldruckdifferenzen |

Abb. 61 : Bezug der Präzisierungen zu den Textstellen in der Richtlinie.

Die Angaben im vorliegenden Anhang können Rückwirkungen auf die Dimensionierung der Lüftungsanlagen sowie deren Raum- und Energiebedarf haben. Die Berücksichtigung ist deshalb bereits in einer frühen Planungsphase erforderlich.

## VII.2 Präzisierungen

### VII.2.1 Absaugmenge am Ereignisort

#### Anforderungen in der Richtlinie §7.2.4.2

Die zu erreichenden Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrraum bei Betrieb der Absaugung sind in der Abbildung 24 der Richtlinie beschrieben.

Die minimal geforderte Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s bzw. von  $2 \times 1.5$  m/s führt auf eine theoretische minimale Absaugmenge am Ereignisort von  $Q_{ABL,min} = 3 \text{ m/s} \times A_{Tunnel}$ , wobei auch ein allfälliger Zuluft eintrag  $Q_{ZUL}$  gemäss Richtlinie Gleichung 7-22 zu berücksichtigen ist. Die effektive Absaugmenge am Ereignisort  $Q_{ABL}$  ist aus der minimalen Absaugmenge  $Q_{ABL,min}$  so zu bestimmen, dass die in Abbildung 24 geforderten Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrraum eingehalten werden können.

#### Präzisierung

Um diese Anforderungen unter Beachtung einer ausreichenden Steuerbarkeit des Gesamtsystems erfüllen zu können, ist die Absaugmenge am Ereignisort  $Q_{ABL}$  mit einem Zuschlag aus dem Minimalwert  $Q_{ABL,min}$  zu erhöhen. Die Grösse dieses Zuschlags wird vor allem durch die Verkehrsart im Tunnel und die Komplexität des Tunnelsystems beeinflusst.

#### Richtwerte

Für Tunnel mit Richtungsverkehr und geringer Stauhäufigkeit (RV 1) genügt in aller Regel ein Zuschlag von  $0.1 \times Q_{ABL,min}$ , währenddem für Tunnel mit Gegenverkehr (GV) ein Zuschlag von  $1/3 \times Q_{ABL,min}$  erforderlich ist. Für Anlagen mit grosser Längsneigung und für Tunnelsysteme mit zusätzlichen Einfahrten und Ausfahrten sind besondere Betrachtungen erforderlich.

### VII.2.2 Leckagemengen

#### Anforderung in der Richtlinie §7.2.4.2

Der Leckagemenge zwischen Absaugort und Abluftventilatoren  $Q_{Leck}$  muss bei der Festlegung des Abluftmenge durch die Abluftventilatoren  $Q_{Ventilator}$  berücksichtigt werden (Richtlinie Gl. 7-24).

#### Präzisierung

Das Problem undichter Kanäle stellt sich seit der Verwendung von steuerbaren Klappen. Einerseits erfordert eine Leckage des Abluftkanals eine höhere Absaugmenge am Abluftventilator und andererseits beeinflusst die Leckage aus dem Fahrraum die Längsströmung im Fahrraum nachteilig.

Die Leckage in den Abluftkanal setzt sich aus der Klappenleckage und der Bauleckage zusammen. Die Leckage der Klappen umfasst den Luftstrom durch die geschlossene Klappe innerhalb des Klappenrahmens. Die Bauleckage enthält alle übrigen Leckageströme in den Abluftkanal einschliesslich der Luftmengen durch Undichtheiten zwischen Bauwerk und Klappenrahmen. Es ist zu beachten, dass die Bauleckage durch die Alterung des Bauwerks und die Leckage durch die geschlossenen Klappen durch Verschmutzung und Kraffeinwirkungen zunehmen kann.

#### Richtwerte

Aufgrund des heutigen Kenntnisstandes kann bei der Auslegung der Lüftungsanlage als Richtwerte für die Leckage von den folgenden Werten ausgegangen werden.  $\Delta p$  bezeichnet dabei die lokale Druckdifferenz zwischen Fahrraum und Kanal.

Leckagemenge am Bauwerk pro Laufmeter Kanal:

$$q_{Leck,Bau} = \frac{3}{10'000} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad \frac{(m^3 \cdot s^{-1})}{m} \quad \text{Gl. VII-1}$$

Leckagemenge durch geschlossene Klappen pro Fläche innerhalb Klappenrahmen:

$$q_{Leck,Klappe} = \frac{3}{1'000} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad \frac{(m^3 \cdot s^{-1})}{m^2} \quad \text{Gl. VII-2}$$

Ein Nomogramm zur Abschätzung der Gesamtleckagemenge ist in §VII.3 enthalten.

### VII.2.3 Absaugmenge im Redundanzfall

#### Anforderung in der Richtlinie §7.2.7

Beim Ausfall eines Abluftventilators muss der aus dem Fahrraum abgesaugte Volumenstrom am Ereignisort mindestens 65 % von  $Q_{ABL}$  (Richtlinie Gl. 7-24) betragen.

#### Präzisierung

Die beim Ausfall eines Abluftventilators geforderte Restmenge von 65 % bezieht sich auf die unter §VII.2.1 in diesem Anhang genannte Auslegemenge  $Q_{ABL}$  einschliesslich des angeführten Zuschlags.

### VII.2.4 Unterdruck im Abluftkanal

#### Anforderung in der Richtlinie

keine

#### Präzisierung

Ein kleiner Unterdruck im Kanal beansprucht das Bauwerk und die mechanischen Komponenten weniger und hat eine geringere Leckagemenge zur Folge. Zudem ist eine deutlich geringere elektrische Leistung für den Betrieb der Anlage erforderlich. Bereits eine kleine Querschnittserweiterung des Kanals kann einen erheblichen Nutzen zur Folge haben.

#### Richtwert

Bei neuen Anlagen sollte die Druckdifferenz zwischen Fahrraum und Kanal den Richtwert von 2'500 Pa nicht überschreiten.

### VII.2.5 Natürlicher Auftrieb

#### Anforderung in der Richtlinie §7.1.5

Die Temperatur im Fahrraum ist in der Regel weitgehend konstant und liegt meist einige Kelvin über der mittleren Jahrestemperatur ausserhalb des Tunnels. Der natürliche Auftriebsdruck ändert mit dem Gang der Aussentemperatur während des Tages und über das Jahr. Anhand der Statistik der örtlichen Umgebungstemperatur kann der natürliche Auftriebsdruck abgeschätzt werden (Richtlinie Gl. 7-19). Für die Auslegung ist der 95 %-Wert der jeweils ungünstigeren Richtung zu verwenden.

#### Präzisierung

Aufgrund von Temperaturmessungen in Tunneln lassen sich konkretere Angaben zu den massgebenden Temperaturdifferenzen machen.

#### Richtwerte

Falls keine örtlichen Messungen vorliegen, können zur Bestimmung des natürlichen Auftriebs in bergmännisch erstellten Tunneln die folgenden Richtwerte (95-Perzentile) der Temperaturdifferenz zwischen Fahrraum und Umgebung verwendet werden:

- Für Tunnel im Mittelland: 1°C pro 450 m Tunnellänge.
- Für Alpentunnel: 2°C pro 450 m Tunnellänge.

Für Tunnel von mehr als etwa 5 km Länge sind besondere Erhebungen notwendig.

### VII.3 Nomogramm zur Abschätzung der Leckagemenge

entsprechend §VII.2.2

Die Angaben im Nomogramm sind gültig für:

- homogene Kanaleigenschaften über die gesamte Länge
- Klappenabstand 100 m
- Klappenfläche 4 m<sup>2</sup>
- Kanalenddruck  $p_0 = 250$  Pa

$p_1$  bezeichnet den Druck am Kanalanschluss auf der Seite des Ventilators. Der Druck im Fahrraum wurde konstant angenommen. Das Nomogramm kann sinngemäss für zweiseitige Absaugung verwendet werden.

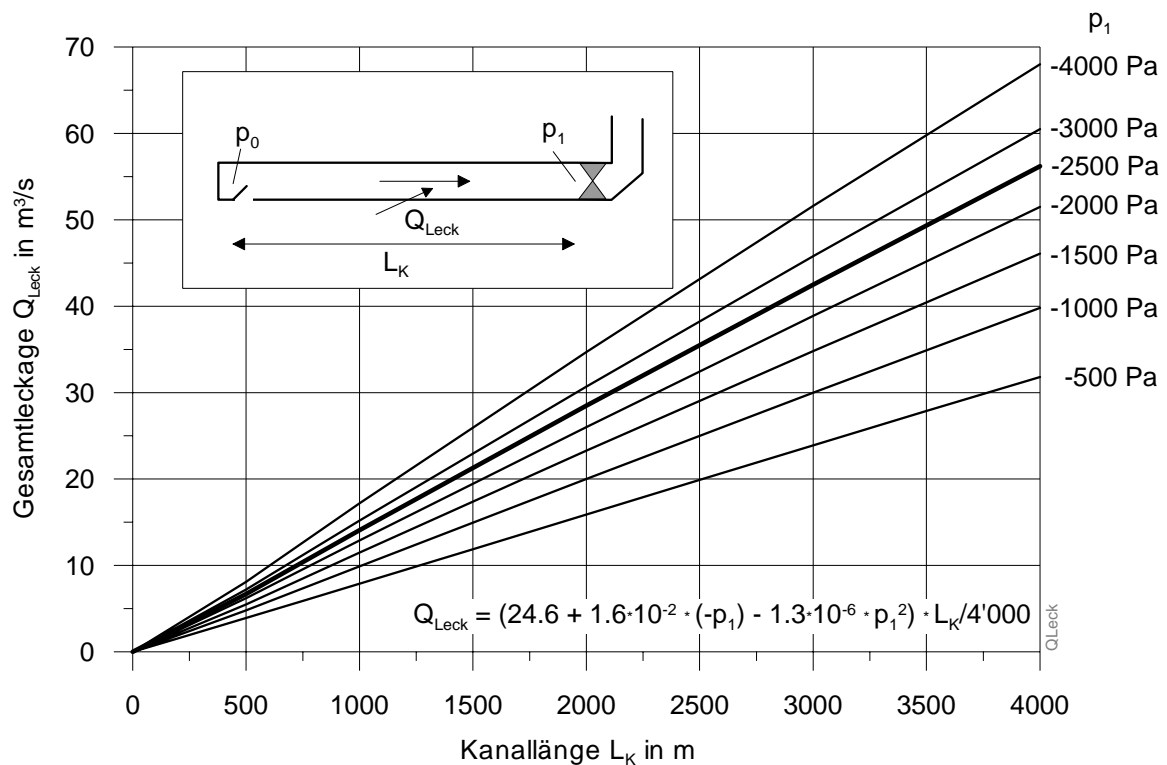


Abb. 62 : Nomogramm zur Abschätzung der Leckagemenge in den Abluftkanal.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bundesamt für Strassenbau ASB (Mai 1983), "**Grundlagen der Belüftung von Strassentunneln**", *SHB-Bericht*.
- [2] Bundesamt für Strassen ASTRA (1999), "**Richtlinie Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen**".
- [3] Association mondiale de la route AIPCR (1999), "**Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers**".
- [4] Association mondiale de la route AIPCR (1995), "**Tunnels routiers : Émissions, ventilation, environnement**".
- [5] Association mondiale de la route AIPCR (November 2004), "**Tunnels routiers : Émissions des véhicules et besoin en air pour la ventilation**", *Bericht 05.14.B*.
- [6] Association mondiale de la route AIPCR (1999), "**Tunnels routiers : Émissions, ventilation, environnement**", *Bericht der Arbeitsgruppe 2*, Kuala Lumpur.
- [7] Studiengesellschaft Stahlanwendung (Juli 1998), "**Brände in Verkehrstunneln**", *Projekt 145.2 (EUREKA-Versuche)*, Düsseldorf.
- [8] Federal Highway Administration (November 1995), "**Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program**".
- [9] Luftreinhalteverordnung des Bundes (LRV).
- [10] Lärmschutzverordnung des Bundes (LSV).
- [11] Bundesamt für Strassen ASTRA (Entwurf 2004), "**Richtlinie - Branddetektion**".
- [12] Bundesamt für Strassen ASTRA (Entwurf 2004), "**Richtlinie - Verkehrsfernsehen**".
- [13] Bundesamt für Strassen ASTRA (Entwurf 2004), "**Richtlinie - Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Tunneln**".
- [14] Tiefbauamt des Kantons Graubünden (3. März 2003), "**Belüftung von Sicherheits- und Querstollen von Strassentunneln**", *Bericht US+FZ*.
- [15] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (1998), "**Massgebender Verkehr**", *SN 640 016a*.
- [16] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (2004), "**Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA** Version 2.1".
- [17] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), "**Projektierung Tunnel - Grundlagen**", *SIA-Norm 197*.
- [18] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), "**Projektierung Tunnel - Strassentunnel**", *SIA-Norm 197/2*.